

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАКОВЕЙЧУК ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 004.932 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
ПОБУДОВИ І ВИКОРИСТАННЯ ВІЗУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ
СТРУКТУР ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

05.13.06 – інформаційні технології
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.М.Маковейчук

Науковий консультант

Рубан Ігор Вікторович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Маковейчук О. М. Моделі, методи та інформаційна технологія побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 "Інформаційні технології" – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова проблема розробки теоретичних основ створення моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації.

Метою роботи є забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності шляхом розробки моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур.

Для досягнення мети дисертації необхідно вирішити такі завдання:

- провести критичний аналіз існуючих моделей, методів, та інформаційних технологій в системах доповненої реальності;
- розвинути теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності для забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності в умовах несприятливих зовнішніх впливів;
- створити системне уявлення візуальної інформаційної структури доповненої реальності та розробити її модель;
- розробити метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

- розробити модель та метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації;
- розробити метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності;
- розробити інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, яка дозволяє забезпечити вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності;
- провести порівняльну оцінку якості використання існуючих та мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності в умовах часткової втрати інформації;
- провести оцінку криптостійкості методу кодування інформації у мозаїчних стохастичних маркерах доповненої реальності.

Об'єктом дослідження є процес побудови і використання візуальних інформаційних структур у системах доповненої реальності. Предметом дослідження є моделі, методи та інформаційна технологія побудови і використання візуальних інформаційних структур у системах доповненої реальності.

Дослідження базується на критичному аналізі відомих методів, моделей та інформаційних технологій побудови і використання маркерів в системах доповненої реальності. При аналізі існуючих методів, моделей та інформаційних технологій в системах доповненої реальності використовувалися математичні методи порівняння зображень, методи цифрової обробки зображень, методи комп'ютерного зору. При розвитку теоретичних основ побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності для забезпечення стійкого функціонування

системи в умовах несприятливих зовнішніх впливів використовувалися методи теорії категорій, цифрової обробки зображень, комп'ютерного зору. При розробці моделі візуальних інформаційних структур, методу формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, моделі та методу виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності використовувалися методи теорії ймовірності, методи комбінаторики, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій, методи теорії оптимізації. При розробці методу визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації, методу декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, методу проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, розробці інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності використовувалися методи теорії матриць, методи аналітичної геометрії, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій, методи теорії оптимізації. Для оцінки якості методів використання існуючих та мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, оцінки криптостійкості методу кодування інформації у мозаїчних стохастичних маркерах доповненої реальності використовувалися методи теорії ймовірності, методи теорії груп, методи математичної статистики, методи кластеризації даних, математичний апарат теорії матриць, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій.

В дисертаційній роботі:

– вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності та метод їх формування, який базується на

процедурах масштабування зображення-повідомлення методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності;

– вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення;

– вперше розроблено метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера;

– вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію перматованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації;

– отримали подальший розвиток теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, які, на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного формування, перетворення та декодування

візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем доповненої реальності;

– удосконалено модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних;

– отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потoku в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення;

– удосконалено інформаційну технологію доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє забезпечити вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, що дозволяє формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукової і науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи "Методи, системи і засоби криптографічного захисту інформації з гарантованим рівнем стійкості та підвищеною швидкодією" (№ ДР 0115U002431), господарсько-договірної науково-дослідної роботи № 17-13 "Розробка моделей, механізмів, методів та засобів симетричного шифрування та гешування, методи оцінювання їх стійкості" шифр "Стійкість" (№ ДР 0118U003807), плану наукової і науково-технічної

діяльності Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи "Створення програмного модуля обробки різнорідних і різночасових даних, отриманих від оптико-електронних засобів безпілотних літальних апаратів та супутникових систем" шифр "Мозаїка-ПС" (№ ДР 0101U002020).

Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у розробці інформаційної технології функціонування систем доповненої реальності, автоматизації процесу побудови візуальних об'єктів в існуючих та перспективних інформаційних системах доповненої реальності.

Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані: у військовій частині А2667, м. Київ; в приватному акціонерному товаристві "Авікос", м. Львів; в Державному підприємстві "Центр державного земельного кадастру" Державного агентства земельних ресурсів України, м. Київ; в Національному центрі управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, м. Київ; в освітньому процесі Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати можуть бути використані: в організаціях, що є замовниками науково-технічної продукції та в науково-дослідних організаціях при обґрунтуванні технічних вимог до перспективних систем обробки зображень та комп'ютерного зору; в науково-виробничих організаціях промисловості при розробці нових систем і комплексів обробки зображень та комп'ютерного зору; у вищих навчальних закладах, що займаються підготовкою фахівців з обробки зображень та комп'ютерного зору.

Встановлено, що розроблений мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності має такі показники якості:

– час виявлення $\tau_p < 1/30$ сек, що в 3 рази менше, ніж час виявлення QR-кодів і приблизно у 5 разів менше ніж для маркерів-зображень;

- кількість кольорів, що необхідні для побудови маркера, $n_c = 3$ – бінарне зображення і додатковий проміжний колір;
- середня ентропія повідомлення що закодована в ньому, за побудовою складає $e_m = 1/9$ біт/піксел, що приблизно у 4,5 разів менше за інформативність QR-кодів і приблизно у 50 разів більше ніж у колових маркерів, у решта маркерів інформативність – 0;
- кількість помилково декодованих бітів повідомлення $n_e < 1$ при $q \leq 1/2$, для QR-кодів $n_e > 1$, для решта маркерів робастність – 0;
- існує можливість визначення положення камери по зображенню маркера;
- середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апіорної інформації, $n_p = 63^2$! при розмірі блоку рівним розміру зображення, для решта маркерів криптостійкість 0;
- кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера ~ 1 , в той час, як для QR-кодів ~ 10 , для маркерів-зображень ~ 100 .

Впровадження розроблених у дисертаційній роботі моделей і методів в модернізацію існуючих і розробку перспективних систем доповненої реальності дозволить забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій та систем доповненої реальності шляхом побудови та використання мозаїчних стохастичних маркерів.

Ключові слова: модель, метод, інформаційна технологія, обробка зображень, візуальна інформаційна структура, доповнена реальність, стійкий мозаїчний стохастичний маркер, проєктивне перетворення, декодування, проєціювання, віртуальний об'єкт.

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати.

1. Маковейчук О. М. Інформаційна технологія побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності.

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2019. № 4 (10). С. 55–68.

2. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Том 3, № 3. С. 43–48.

3. Маковейчук О. М. Метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера без врахування додаткової апіорної інформації. *Системи обробки інформації*. 2019. Вип. 4 (159). С. 36–43.

4. Маковейчук О. М. Науково-прикладні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 5 (57). С. 59–66.

5. Маковейчук О. М. Метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Том 3, № 4. С. 80–86.

6. Маковейчук О. М. Метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 6 (58). С. 54–57.

7. Бутко І. М., Маковейчук О. М. Визначення джерел лісових пожеж за супутниковими знімками. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.3. С. 80–84.

8. Маковейчук А. Н., Бутко І. Н., Жуйков Д. Б., Худов Г. В. Анализ показателей оценки качества обработки изображений фрактальным методом при воздействии протяженных маскирующих помех. *Системи обробки інформації*. 2012. Вип. 7 (105). С. 104–108.

9. Пелешко Д., Маковейчук О., Ковальчук А., Клювак А. Усунення динамічних часткових спотворень для відтворення зображень на основі інтегрально-диференціального підходу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 751. С. 320–332.

10. Павлій В. О., Маковейчук О. М., Худов Г. В. Показники

ефективності відновлення дефокусованих оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені змазом. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*. 2013. № 3 (66). С. 106–112.

11. Худов В. Г., Маковейчук О. М. Генетичні алгоритми для сегментування зображень систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 2 (23). С. 142–145.

12. Худов В. Г., Кучук Г. А., Маковейчук О. М., Крижний А. В. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 9 (146). С. 77–80.

13. Клювак А., Пелешко Д., Маковейчук О., Ізонін І. Двоетапне сегментування зображення із складним фоном на основі методу Отсу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2016. № 843. С. 335–341.

14. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості еволюційного методу сегментування зображення, що отримано з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 4 (44). С. 133–137.

15. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості сегментування оптико-електронного зображення шляхом оцінки комплексних показників та відстані Кульбака-Лейблера. *Системи обробки інформації*. 2017. Вип. 4 (150). С. 27–30.

16. Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109904>.

17. Ruban I.V., Khudov V.G., Khizhnyak I.A., Makoveichuk O.M.

Segmentation of multiple image sequences, which obtained from optoelectronic observations of the aircraft. *News of Science and Education*. 2017. № 5 (53). P. 103–110.

18. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Рубан І.В., Худов Г.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 1 (47). С. 146–152.

19. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г., Подліпаєв В.О., Горбань Г.В., Худов Г.В. Метод ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії (АВС)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 2 (48). С. 91–96.

20. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Інформаційна ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 3 (49). С. 26–32.

21. Хижняк І.А., Худов Г.В., Рубан І.В., Маковейчук О.М., Соломоненко Ю.С., Худов В.Г. Метод тематичного сегментування кольорового зображення бортової системи оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 5 (51). С. 13–19.

22. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Худов Р.Г. Цільова функція методу тематичного сегментування зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 4 (33). С. 36–42.

23. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод визначення об'єктів міської забудови на зображеннях бортових систем оптико-електронного спостереження з використанням перетворення Хафа. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 6 (52). С. 20–24.

24. Худов Г.В., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Ройовий метод тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу. *Екологічні науки*. 2018. № 4 (23). С. 24–28.

25. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Khudov V., Podlipaiev V., Shumeiko V., Atrasevych O., Nikitin A., Khudov R. Segmentation of optical-electronic images from on-board systems of remote sensing of the Earth by the artificial bee colony method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/9 (98). P. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161860>.

26. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Березіна С.І., Соломоненко Ю.С. Метод багатомасштабного оброблення зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження для визначення елементів міської інфраструктури. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 3 (55). С. 3–7.

27. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Lukova-Chuiko N., Pevtsov G., Sheviakov Y., Yuzova I., Drob Y., Tytarenko O. Method for determining elements of urban infrastructure objects based on the results from air monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/9 (100). P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174576>.

28. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56). С. 72–81.

29. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Chomik M., Khudov V., Khizhnyak I., Podlipaiev V., Sheviakov Y., Baranik O., Irkha A. Construction of methods for determining the contours of objects of tonal aerospace images based on the ant algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9 (101). P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.177817>.

30. Khudov H., Ruban I., Makoveichuk O, Pevtsov H., Khudov V., Khizhnyak I., Fryz S., Podlipaiev V., Polonskyi Y, Khudov R. Development of methods for determining the contours of objects for a complex structured color image based on the ant colony optimization algorithm. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. № 1, P. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001108>.

31. Павлій В. А., Маковейчук А. Н., Худов Г. В. Функция размытия точки оптико-электронных изображений при смазе и дефокусировке, обусловленных неоднородностью атмосферы. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2013. Вип. 4 (37). С. 75–78.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

1. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Жуйков Д.Б. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах впливу маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 8 наук. конф. (Харків, 18–19 квіт. 2012). Харків: ХУПС, 2012. С. 315.

2. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Бутко І.М., Жуйков Д.Б. Методи захисту зображень технічних систем розвідки і спостереження від дії маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 9 наук. конф. (Харків, 17–18 квіт. 2013). Харків: ХУПС, 2013. С. 325.

3. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Павлій В.О., Подліпаєв В.О. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазу. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 11 наук. конф. (Харків, 08–09 квіт. 2015). Харків: ХУПС, 2015. С. 363.

4. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Кухарський І.А., Худов Р.Г. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 14 наук. конф. (Харків, 11–12 квіт. 2018). Харків: ХНУПС, 2018. С. 469–470.

5. Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Худов Г.В. Двоетапний метод визначення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях з використанням перетворення Хафа. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 15 Міжнар. наук. конф. (Харків, 10–11 квіт. 2019). Харків: ХНУПС, 2019. С. 525.

6. Izonin I., Malets I., Makoveichuk O., Peleshko D., Ivanov Y., Batyuk D., Lotoshunska N. Adaptive Moving Object Segmentation Algorithms in Cluttered Environments. *Proceeding in 13 International scient.-pract. confer Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. 2015. P. 97–99. DOI: 10.1109/CADSM.2015.7230806.

7. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Сердюк О.В. Мультиагентний метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО*: Тези допов. IX наук.-практ. конф. (Київ, 25 листопада 2016). Київ: ВІТІ, 2016. С. 194.

8. Хижняк І.А., Сердюк О.В., Маковейчук О.М. Ройовий метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах*: Тези допов. 17 наук.-техн. конф. (Чернігів, 7-8 вересня 2017). Чернігів: ДНДІ ОВТ, 2017. С. 369–370.

9. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Хижняк І.А. Удосконалений еволюційний метод сегментування багатомасштабної послідовності зображень, отриманих з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи*: Тези допов. четвертої Всеукр. наук.-практ. конф. (Одеса 7–8 вересня 2017). Одеса: Військова академія, НА ДПС України, 2017. С. 172–173.

10. Бутко І., Маковейчук О., Медвецька Т. Використання даних дистанційного зондування для контролю за станом земель запасу та резервного фонду. *Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law*: Збірник міжнар. наук. праць (Словаччина-Чехія-Чернігів, 24-28 квітня 2018). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 131–134.

11. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Тематичне сегментування оптико-електронного зображення методом ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (АВС)). *Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції*: Тези допов. ХХІІ Всеукр. наук.-практ. конф. (Житомир, 26–27 квітня 2018). Житомир: ЖВІ, 2018. С. 251–252.

12. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Сердюк О.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 17-18 травня 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 241.

13. Рубан І.В., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Генетичні методи обробки зображень в системах доповненої реальності військового призначення. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 16-17 травня 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 256.

14. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Подліпаєв В.О. Інформаційна технологія тематичного сегментування тонових та кольорових зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. восьмої Міжнар. наук.-техн. конф. (Полтава, Баку, Харків, Жиліна, 26–27 квітня 2018). Полтава: ПНТУ; Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ

ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2018. С. 58.

15. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Двоетапний метод виявлення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. дев'ятої Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку, Харків, Жиліна, 11–12 квітня 2019). Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2019. С. 12.

16. Ruban I., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I. A swarm method for segmentation of images obtained from on-board optoelectronic surveillance systems. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 5th International scientific-practical conference (Kharkiv, October, 9–12, 2018). Kharkiv: IEEE, 2018. P. 613–618. DOI: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632045>.

17. Ruban I., Makoveichuk O., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I., Yuzova I, Drob Y. The Method for Selecting the Urban Infrastructure Objects Contours. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 6th International scientific-practical conference (Kiev, October, 8–11, 2019). Kiev: IEEE, 2019. P. 689–693. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061267.

18. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В., Худов Р.Г., Сердюк О.В. Метод тематичного сегментування оптико-електронних зображень. *Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів*: Тези допов. XXII Всеукр.наук.-практ.конф. (Житомир, 1–2 лист. 2018). ЖВІ, 2018. С. 164–168.

19. Худов Г.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М. Метод обробки багатомасштабної послідовності зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 15 листопада 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 159.

20. Худов Г.В., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г. Застосування алгоритмів ройового інтелекту для вирішення задачі сегментування аерокосмічних зображень. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 14-15 листопада 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 209–210.

21. Худов Г.В., Хижняк І.А., Подліпаєв В.О., Худов Р.Г. Удосконалений метод обробки багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: Thesis of International scientific and practical conference (Wloclawek, Republic of Poland, December, 21-22, 2018). Wloclawek: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2018. P. 29–32.

22. Khudov H., Pavlii V, Khizhnyak I., Makoveichuk O., Khudov R. Image segmentation method for onboard environmental monitoring systems. *Science, Research, Development # 14. Technics and Technology*: Thesis of International scientific and practical conference (London, February, 27-28, 2019). London, 2019. P. 23–25.

23. Рубан І.В., Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод визначення контурів елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях бортових систем. *Комп'ютерні та інформаційні системи і технології*: Тези допов. третьої Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 23-24 квітня 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 20–21.

24. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод виявлення об'єктів міської інфраструктури на багатомасштабній послідовності зображень з бортових систем дистанційного зондування Землі. *Наукоємні технології в інфокомунікаціях (НІСТ`2019)*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, Кам'янець-Подільський, 23-25 травня 2019). Харків: ХНУПС, ХНУРЕ; Кам'янець-Подільський: Кам.-Поділ. нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2019. С. 93–94.

25. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Рубан І.В. Метод визначення

інверсних псевдовипадкових блочних перестановок на основі генетичних алгоритмів. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*: Тези допов. VII наук.-техн. конф. (Київ, 09-10 жовтня 2019). Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2019. С. 413–414.

26. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод виявлення об'єктів інтересу на зображеннях з безпілотних літальних апаратів в інтересах охорони державного кордону. *Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Хмельницький, 22 листопада 2019). Хмельницький: Нац. академія держ. прикор. служби ім. Б. Хмельницького, 2019. С. 828–829.

27. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил*: Тези допов. XII наук.-практ. конф. (Київ, 14-15 листопада 2019). Київ: ВІТІ, Київ, 2019. С. 189–190.

28. Маковейчук О.М. Знаходження інверсних блочних перестановок в задачах комп'ютерного зору. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики АРАМС-2019*: Тези допов. XXV Всеукр. наук. конф. (Львів, 24–27 вересня 2019). Львів: Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2019. С. 102–105.

29. Ruban I., Khudov H., Makoveychuk O., Khizhnyak I., Khudov V., and Lishchenko V. The model and the method for forming a mosaic sustainable marker of augmented reality. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET)*: Thesis of 2020 IEEE 15th International Conference (Slavske, February 25–29, 2020). Slavske: IEEE, 2020. P. 402–406. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235463>.

ANNOTATION

Makoveichuk O. M. Models, Methods and Information Technology of Designing and Use of Visual Information Structures of Augmented Reality. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Engineering Sciences in specialty 05.13.06 "Information technologies" (05 – technical sciences). – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The actual scientific problem of the development of a theoretical base for the creation of models, methods, and information technology of designing and use of visual information structures in augmented reality systems for application in various spheres of information processing that has essential value in technical sciences is solved in the thesis.

The research objective is to ensure stable operation of augmented reality systems by building models, methods, and information technology of designing and use of visual information structures in augmented reality systems.

To achieve the objective of the thesis the following tasks need to be solved:

- to conduct a critical analysis of existing methods, models, and information technologies of augmented reality systems;
- to build on the theoretical bases of designing and application of visual information structures in augmented reality for ensuring the stable operation of augmented reality systems under adverse external influences;
- to create a systematic representation of the visual information structures of augmented reality and develop their model;
- to develop a method of designing stable mosaic stochastic markers of augmented reality;

- to develop a model and method for detecting mosaic stochastic markers of augmented reality;
- to develop a method for determining the parameters for the projective transformation of mosaic stochastic markers of augmented reality without considering additional a priori information;
- to develop a method for decoding mosaic stochastic markers of augmented reality;
- to develop a method for projecting virtual objects on the plane of the augmented reality marker;
- to develop the information technology for designing and use of augmented reality markers that adheres to the requirements to the visual information structures of augmented reality;
- to conduct a comparative assessment of the quality of use of existing and mosaic stochastic augmented reality markers in conditions of partial loss of information;
- to assess the cryptographic stability of the method of encoding information in mosaic stochastic markers of augmented reality.

The research object is the process of designing and application of visual information structures in augmented reality systems. The research subject encompasses models, methods, and information technology of designing and application of visual information structures in augmented reality systems.

The research is based on a critical analysis of known methods, models, and information technologies of designing and use of augmented reality markers. In the course of the analysis of existing methods, models, and information technologies of augmented reality systems, the mathematical methods of image comparison, digital image processing, and computer vision were applied. In the course of developing the theoretical foundations of building and application of visual information systems of augmented reality for ensuring the stable operation of the system under adverse external influences, the methods of category theory, digital image processing, and computer vision were

applied. In the course of developing the model of visual information structure, model of forming stable mosaic stochastic augmented reality markers, model and method of detecting mosaic stochastic augmented reality markers, the methods of probability theory, combinatorics, mathematical modeling, digital image processing, mathematical logic, information technology creation, optimization theory were applied. In the course of developing a method for determining the parameters for the projective transformation of mosaic stochastic augmented reality markers without considering additional a priori information, a method for decoding mosaic stochastic augmented reality markers, a method of projecting virtual objects on the plane of mosaic stochastic augmented reality markers, and the development of information technology for designing and use of augmented reality markers, the methods of matrix theory, analytical geometry, mathematical modeling, digital image processing, mathematical logic, information technologies creation, optimization theory were applied. To assess the quality of the methods for use of existing and mosaic stochastic augmented reality markers, the cryptographic stability of the method for encoding information in mosaic stochastic augmented reality markers, the methods of probability theory, group theory, mathematical statistics, data clustering, mathematical modeling, digital image processing, mathematical logic, information technologies creation, and mathematical apparatus of matrix theory were applied.

In the thesis:

- for the first time, there has been developed a model of stable mosaic stochastic augmented reality markers and the method for their forming that is based on the procedures of scaling the image-message with the nearest-neighbor approach, mixing pixels using a known pseudo-random permutation and the pixels color coding based on the marker image cells color that are separated by a frame, which ensures stable data transmission and correct display of visual objects of augmented reality;

- for the first time, there has been developed a method of detecting mosaic stochastic augmented reality markers that, based on local dispersion binarization, detects the marker area on the original image and finds bit container masks through segmentation and subsequent morphological filtering of the masked image area, which enables correct decoding of messages under adverse external conditions;

- for the first time, there has been developed a method of determining the parameters of the projective transformation of mosaic stochastic markers, that finds the four reference points, iteratively maximizing the sum of variances of the mean values of the union of the bit container masks that are calculated by rows and columns without considering additional a priori information that enables unified detection and decoding regardless of the conditions of marker registration;

- for the first time, there has been developed a method of decoding mosaic stochastic augmented reality markers that, based on the suggested system of indicators, determines the size of the marker bit matrix, builds the marker bit matrix from the transformed image of the bit container, determines the shift in the full bit matrix, and implements the filtering of the permuted image that ensures correct reproduction and visualization of the information under adverse external influences;

- the further development received theoretical bases of the designing and use of visual information structures of augmented that, unlike the known theories, are based on scientifically based models and methods of system design, transformation, and decoding of visual information that ensures stable operation of augmented reality systems under adverse external influences;

- the model of visual information structures of augmented reality has been improved that, unlike the known models, was built by introducing redundancy, stochastic rearrangement, and containerization of data that enables stable recovery of information in cases of partial data loss;

– the further development received a method of projecting virtual objects on the plane of the augmented reality marker that, unlike the known methods, implements the proposed procedures for camera calibration on the existing image of the mosaic stochastic marker, which allows visualizing three-dimensional objects and video stream rendering in the marker area and ensures the versatility and unification regardless of the physical and geometric properties of the image recording means;

– the augmented reality information technology was improved that, in contrast to the known technologies, uses models and methods of stable mosaic stochastic markers processing which allows meeting the requirements for visual information structures of augmented reality that allows to formalize and automate the process of building visual objects in the projects for creating new information systems of augmented reality.

The thesis work was performed under the plan of scientific and technical activity of the Kharkiv National University of Radio Electronics within the framework of the state-funded Research Program "Methods, Systems and Means of Cryptographic Information Security with Guaranteed Level of Resistance and Improved Performance" (№ DR 0115U002431), Economic Contract № 17-13 "Development of models, mechanisms, methods, and means of symmetric encryption and gestation, methods for evaluating their resilience", the code "Sustainability" (№ DR 0118U003807), the plan of scientific and technical activity of Ivan Kozhedub Kharkiv National University of Air Forces within the frameworks of state-funded Research Program "Designing a software module for the processing of heterogeneous and time-based data obtained from optical-electronic means of unmanned aerial vehicles and satellite systems" the code "Mosaic-PS" (№ DR 0101U002020).

The practical significance of the obtained theoretical results of the dissertation is to develop information technology for the functioning of augmented reality systems, automation of the process of designing visual objects in existing and promising augmented reality information systems.

The results of the dissertation work are implemented and enacted: in the military unit A2667, Kyiv; in the private joint-stock company "Avikos", Lviv; in the State Enterprise "Center of State Land Cadastre" of the State Agency of Land Resources of Ukraine, Kyiv; at the National Space Control and Testing Center of the State Space Agency of Ukraine, Kyiv; in the educational process of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv.

The scientific results obtained in the dissertation can be used: in the organizations that are the end-users of scientific and technical products and in the research organizations in justifying the technical requirements for advanced image processing and computer vision systems; in research and production industrial organizations in the course of designing and developing of new systems and complexes of image processing and computer vision; at higher education institutions for image processing and computer vision professionals.

It is established that the developed mosaic stochastic augmented reality marker has the following quality indicators:

- detection time $\tau_D < 1/30$ sec, which is 3 times less than the time of QR codes detection and about 5 times less than of image markers;
- the number of colors required to build the marker $n_c = 3$ – binary image and additional intermediate color;
- the average entropy of the message encoded in it, $e_m = 1/9$, bit per pixel, which is 4,5 times less than the information capacity of QR-codes and is 50 times more than the capacity of circle markers while the information capacity for other markers is 0;
- the number of erroneously decoded bits of the message $n_e < 1$ at $q \leq 1/2$, for QR-codes $n_e > 1$, robustness for other markers is 0;
- the fundamental possibility of determining the position of the camera based on the image of the marker - exists;
- the average number of attempts required for the optimal decoding

algorithm in the absence of additional a priori information $n_p = 63^2!$ is achieved when the block size is equal to the image size, crypto-stability for the remaining markers is 0;

– the number of additional parameters required to use an AR marker ~ 1 , while for QR codes ~ 10 , for image markers ~ 100 .

The implementation of the models and methods developed in the dissertation in the modernization of existing and development of perspective augmented reality systems will ensure the stable functioning of information technologies and augmented reality systems through designing and using mosaic stochastic markers.

Keywords: model, method, information technology, image processing, visual information structure, augmented reality, stable mosaic stochastic marker, projective transformation, decoding, projection, virtual object.

List of publications that include the main scientific results:

1. Маковейчук О. М. Інформаційна технологія побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 4 (10). С. 55–68.

2. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Том 3, № 3. С. 43–48.

3. Маковейчук О. М. Метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчного стохастичного маркера без врахування додаткової апіорної інформації. *Системи обробки інформації*. 2019. Вип. 4 (159). С. 36–43.

4. Маковейчук О. М. Науково-прикладні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 5 (57). С. 59–66.

5. Маковейчук О. М. Метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019.

Том 3, № 4. С. 80–86.

6. Маковейчук О. М. Метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 6 (58). С. 54–57.

7. Бутко І. М., Маковейчук О. М. Визначення джерел лісових пожеж за супутниковими знімками. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.3. С. 80–84.

8. Маковейчук А. Н., Бутко И. Н., Жуйков Д. Б., Худов Г. В. Анализ показателей оценки качества обработки изображений фрактальным методом при воздействии протяженных маскирующих помех. *Системи обробки інформації*. 2012. Вип. 7 (105). С. 104–108.

9. Пелешко Д., Маковейчук О., Ковальчук А., Клювак А. Усунення динамічних часткових спотворень для відтворення зображень на основі інтегрально-диференціального підходу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 751. С. 320–332.

10. Павлій В. О., Маковейчук О. М., Худов Г. В. Показники ефективності відновлення дефокусованих оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені змазом. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*. 2013. № 3 (66). С. 106–112.

11. Худов В. Г., Маковейчук О. М. Генетичні алгоритми для сегментування зображень систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 2 (23). С. 142–145.

12. Худов В. Г., Кучук Г. А., Маковейчук О. М., Крижний А. В. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 9 (146). С. 77–80.

13. Клювак А., Пелешко Д., Маковейчук О., Ізонін І. Двоетапне

сегментування зображення із складним фоном на основі методу Отсу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2016. № 843. С. 335–341.

14. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості еволюційного методу сегментування зображення, що отримано з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 4 (44). С. 133–137.

15. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості сегментування оптико-електронного зображення шляхом оцінки комплексних показників та відстані Кульбака-Лейблера. *Системи обробки інформації*. 2017. Вип. 4 (150). С. 27–30.

16. Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109904>.

17. Ruban I.V., Khudov V.G., Khizhnyak I.A., Makoveichuk O.M. Segmentation of multiple image sequences, which obtained from optoelectronic observations of the aircraft. *News of Science and Education*. 2017. № 5 (53). P. 103–110.

18. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Рубан І.В., Худов Г.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 1 (47). С. 146–152.

19. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г., Подліпаєв В.О., Горбань Г.В., Худов Г.В. Метод ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії (АВС)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 2 (48). С. 91–96.

20. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Інформаційна ройова

технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 3 (49). С. 26–32.

21. Хижняк І.А., Худов Г.В., Рубан І.В., Маковейчук О.М., Соломоненко Ю.С., Худов В.Г. Метод тематичного сегментування кольорового зображення бортової системи оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 5 (51). С. 13–19.

22. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Худов Р.Г. Цільова функція методу тематичного сегментування зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 4 (33). С. 36–42.

23. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод визначення об'єктів міської забудови на зображеннях бортових систем оптико-електронного спостереження з використанням перетворення Хафа. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 6 (52). С. 20–24.

24. Худов Г.В., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Ройовий метод тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу. *Екологічні науки*. 2018. № 4 (23). С. 24–28.

25. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Khudov V., Podlipaiev V., Shumeiko V., Atrasevych O., Nikitin A., Khudov R. Segmentation of optical-electronic images from on-board systems of remote sensing of the Earth by the artificial bee colony method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/9 (98). P. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161860>.

26. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Березіна С.І., Соломоненко Ю.С. Метод багатомасштабного оброблення зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження для визначення елементів міської інфраструктури. *Системи управління, навігації та*

зв'язку. 2019. № 3 (55). С. 3–7.

27. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Lukova-Chuiko N., Pevtsov G., Sheviakov Y., Yuzova I., Drob Y., Tytarenko O. Method for determining elements of urban infrastructure objects based on the results from air monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/9 (100). P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174576>.

28. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56). С. 72–81.

29. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Chomik M., Khudov V., Khizhnyak I., Podlipaiev V., Sheviakov Y., Baranik O., Irkha A. Construction of methods for determining the contours of objects of tonal aerospace images based on the ant algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9 (101). P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.177817>.

30. Khudov H., Ruban I., Makoveichuk O., Pevtsov H., Khudov V., Khizhnyak I., Fryz S., Podlipaiev V., Polonskyi Y., Khudov R. Development of methods for determining the contours of objects for a complex structured color image based on the ant colony optimization algorithm. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. № 1, P. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001108>.

31. Павлий В. А., Маковейчук А. Н., Худов Г. В. Функция размытия точки оптико-электронных изображений при смазе и дефокусировке, обусловленных неоднородностью атмосферы. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2013. Вип. 4 (37). С. 75–78.

List of publications confirming the approbation of materials thesis.

1. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Жуйков Д.Б. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах впливу маскуючих перешкод.

Новітні технології – для захисту повітряного простору: Тези допов. 8 наук. конф. (Харків, 18–19 квіт. 2012). Харків: ХУПС, 2012. С. 315.

2. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Бутко І.М., Жуйков Д.Б. Методи захисту зображень технічних систем розвідки і спостереження від дії маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 9 наук. конф. (Харків, 17–18 квіт. 2013). Харків: ХУПС, 2013. С. 325.

3. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Павлій В.О., Подліпаєв В.О. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазу. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 11 наук. конф. (Харків, 08–09 квіт. 2015). Харків: ХУПС, 2015. С. 363.

4. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Кухарський І.А., Худов Р.Г. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 14 наук. конф. (Харків, 11–12 квіт. 2018). Харків: ХНУПС, 2018. С. 469–470.

5. Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Худов Г.В. Двоетапний метод визначення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях з використанням перетворення Хафа. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 15 Міжнар. наук. конф. (Харків, 10–11 квіт. 2019). Харків: ХНУПС, 2019. С. 525.

6. Izonin I., Malets I., Makoveichuk O., Peleshko D., Ivanov Y., Batyuk D., Lotoshunkska N. Adaptive Moving Object Segmentation Algorithms in Cluttered Environments. *Proceeding in 13 International scient.-pract. confer Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. 2015. P. 97–99. DOI: 10.1109/CADSM.2015.7230806.

7. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Сердюк О.В. Мультиагентний метод сегментування зображень, що отримані з бортових

систем оптико-електронного спостереження. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО: Тези допов. IX наук.-практ. конф. (Київ, 25 листопада 2016). Київ: ВІТІ, 2016. С. 194.*

8. Хижняк І.А., Сердюк О.В., Маковейчук О.М. Ройовий метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: Тези допов. 17 наук.-техн. конф. (Чернігів, 7-8 вересня 2017). Чернігів: ДНДІ ОВТ, 2017. С. 369–370.*

9. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Хижняк І.А. Удосконалений еволюційний метод сегментування багатомасштабної послідовності зображень, отриманих з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи: Тези допов. четвертої Всеукр. наук.-практ. конф. (Одеса 7–8 вересня 2017). Одеса: Військова академія, НА ДПС України, 2017. С. 172–173.*

10. Бутко І., Маковейчук О., Медвецька Т. Використання даних дистанційного зондування для контролю за станом земель запасу та резервного фонду. *Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law: Збірник міжнар. наук. праць (Словаччина-Чехія-Чернігів, 24-28 квітня 2018). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 131–134.*

11. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Тематичне сегментування оптико-електронного зображення методом ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії (АВС)). *Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції: Тези допов. XXII Всеукр. наук.-практ. конф. (Житомир, 26–27 квітня 2018). Житомир: ЖВІ, 2018. С. 251–252.*

12. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Сердюк О.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 17-18 травня 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 241.

13. Рубан І.В., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Генетичні методи обробки зображень в системах доповненої реальності військового призначення. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 16-17 травня 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 256.

14. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Подліпасєв В.О. Інформаційна технологія тематичного сегментування тонових та кольорових зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. восьмої Міжнар. наук.-техн. конф. (Полтава, Баку, Харків, Жиліна, 26–27 квітня 2018). Полтава: ПНТУ; Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2018. С. 58.

15. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Двоетапний метод виявлення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. дев'ятої Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку, Харків, Жиліна, 11–12 квітня 2019). Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2019. С. 12.

16. Ruban I., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I. A swarm method for segmentation of images obtained from on-board optoelectronic surveillance systems. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 5th International scientific-practical conference (Kharkiv, October, 9–12, 2018).

Kharkiv: IEEE, 2018. P. 613–618.

DOI: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632045>.

17. Ruban I., Makoveichuk O., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I., Yuzova I, Drob Y. The Method for Selecting the Urban Infrastructure Objects Contours. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 6th International scientific-practical conference (Kiev, October, 8–11, 2019). Kiev: IEEE, 2019. P. 689–693. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061267.

18. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В., Худов Р.Г., Сердюк О.В. Метод тематичного сегментування оптико-електронних зображень. *Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів*: Тези допов. XXII Всеукр.наук.-практ.конф. (Житомир, 1–2 лист. 2018). ЖВІ, 2018. С. 164–168.

19. Худов Г.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М. Метод обробки багатомасштабної послідовності зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 15 листопада 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 159.

20. Худов Г.В., Хижняк І.А., Маковейчук О.М. Худов Р.Г. Застосування алгоритмів ройового інтелекту для вирішення задачі сегментування аерокосмічних зображень. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 14-15 листопада 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 209–210.

21. Худов Г.В., Хижняк І.А., Подліпаєв В.О., Худов Р.Г. Удосконалений метод обробки багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: Thesis of International scientific and practical conference (Wloclawek, Republic of Poland, December, 21-22, 2018). Wloclawek: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2018. P. 29–32.

22. Khudov H., Pavlii V, Khizhnyak I., Makoveichuk O., Khudov R.

Image segmentation method for onboard environmental monitoring systems. *Science, Research, Development # 14. Technics and Technology*: Thesis of International scientific and practical conference (London, February, 27-28, 2019). London, 2019. P. 23–25.

23. Рубан І.В., Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод визначення контурів елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях бортових систем. *Комп'ютерні та інформаційні системи і технології*: Тези допов. третьої Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 23-24 квітня 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 20–21.

24. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод виявлення об'єктів міської інфраструктури на багатомасштабній послідовності зображень з бортових систем дистанційного зондування Землі. *Наукоємні технології в інфокомунікаціях (НІСТ`2019)*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, Кам'янець-Подільський, 23-25 травня 2019). Харків: ХНУПС, ХНУРЕ; Кам'янець-Подільський: Кам.-Поділ. нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2019. С. 93–94.

25. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Рубан І.В. Метод визначення інверсних псевдовипадкових блочних перестановок на основі генетичних алгоритмів. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*: Тези допов. VII наук.-техн. конф. (Київ, 09-10 жовтня 2019). Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2019. С. 413–414.

26. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод виявлення об'єктів інтересу на зображеннях з безпілотних літальних апаратів в інтересах охорони державного кордону. *Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Хмельницький, 22 листопада 2019). Хмельницький: Нац. академія держ. прикор. служби ім. Б. Хмельницького, 2019. С. 828–829.

27. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил*: Тези допов. XII наук.-практ. конф. (Київ, 14-15 листопада 2019). Київ: ВІТІ, Київ, 2019. С. 189–190.

28. Маковейчук О.М. Знаходження інверсних блочних перестановок в задачах комп'ютерного зору. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики АРАМС-2019*: Тези допов. XXV Всеукр. наук. конф. (Львів, 24–27 вересня 2019). Львів: Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2019. С. 102–105.

29. Ruban I., Khudov H., Makoveychuk O., Khizhnyak I., Khudov V., and Lishchenko V. The model and the method for forming a mosaic sustainable marker of augmented reality. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET)*: Thesis of 2020 IEEE 15th International Conference (Slavske, February 25–29, 2020). Slavske: IEEE, 2020. P. 402–406. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235463>.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ANNOTATION	19
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	44
ВСТУП	46
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМАХ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	65
1.1 Аналіз застосування існуючих систем доповненої реальності.....	65
1.1.1 Основні поняття та визначення.....	65
1.1.2 Тенденції розвитку і основні галузі застосування систем доповненої реальності.....	67
1.1.3 Аналіз застосування систем доповненої реальності в ігровій індустрії	69
1.1.4 Аналіз застосування систем доповненої реальності в медицині	71
1.1.5 Аналіз застосування систем доповненої реальності у військовій техніці	73
1.1.6 Основні недоліки технологій доповненої реальності.....	75
1.2 Огляд програмного забезпечення для проектування систем доповненої реальності	78
1.3 Основні ризики впровадження і використання існуючих технологій доповненої реальності	83
1.4 Аналіз відомих моделей, методів та інформаційних технологій обробки зображень в системах доповненої реальності	89
1.4.1 Типи маркерів доповненої реальності.....	89
1.4.2 Типова методика для роботи з шаблонними маркерами...	92

1.4.3 Типова методика для роботи з штрих-кодовими маркерами.....	92
1.4.4 Типова методика для роботи з маркерами-зображеннями	100
1.4.5 Переваги і недоліки відомих типів візуальних маркерів доповненої реальності.....	103
1.5 Огляд голографічного принципу представлення даних	104
1.6 Огляд метаевристичних методів вирішення оптимізаційних задач	108
1.6.1 Загальні метаевристичні методи.....	108
1.6.2 Ройові алгоритми.....	110
1.6.3 Генетичні алгоритми.....	111
1.7 Формулювання наукової проблеми та завдань дисертаційної роботи.....	115
Висновки до розділу 1	117
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІЗУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СТРУКТУР ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	120
2.1 Формалізація технології використання візуальних інформаційних структур	120
2.1.1 Формальна модель візуальних інформаційних структур	120
2.1.2 Формалізація операцій, що проводяться над візуальними інформаційними структурами.....	122
2.1.3 Узагальнення візуальних інформаційних структур.....	127
2.1.4 Функціональна модель візуальних інформаційних структур	131

2.2 Структура системи доповненої реальності, що базується на візуальних інформаційних структурах	134
2.3 Загальні принципи та підходи щодо теоретичних основ побудови візуальних інформаційних структур доповненої реальності	136
2.4 Вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності	139
2.5 Визначення показників якості візуальних інформаційних структур доповненої реальності і критерії їх оцінки	143
2.6 Модель та методи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності.....	144
2.6.1 Модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності	144
2.6.2 Метод побудови візуальних інформаційних структур доповненої реальності.....	146
2.6.3 Методи використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності.....	148
Висновки до розділу 2	152
3 МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ МОЗАЇЧНИХ СТОХАСТИЧНИХ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	155
3.1 Модель стійкого мозаїчного стохастичного візуального маркера доповненої реальності	155
3.2 Метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	159
3.2.1 Попередня обробка вихідного зображення	160
3.2.2 Знаходження області маркера	160
3.2.3 Знаходження біт-контейнерів	163

3.3	Метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апіорної інформації	167
3.3.1	Прямий пошук системи ліній, що проходять через кожен клітинку	167
3.3.2	Визначення параметрів проєктивного перетворення	168
3.3.3	Пошук опорних точок	174
3.4	Метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	182
3.4.1	Визначення кількості рядків і стовпців.....	182
3.4.2	Заповнення матриці біт-контейнера.....	184
3.4.3	Визначення зсуву матриці біт-контейнера	184
3.4.4	Декодування повної матриці біт-контейнера	186
3.5	Метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності	188
3.5.1	Перспективна проєкція	188
3.5.2	Найпростіша модель перспективної проєкції	189
3.5.3	Внутрішнє калібрування камери.....	190
3.5.4	Зовнішнє калібрування камери	192
3.5.5	Повна модель перспективної проєкції	194
3.5.6	Задача калібрування камери.....	195
3.5.7	Модель радіальних спотворень зображення.....	198
3.5.8	Калібраційні маркери.....	199
3.5.9	Проеціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності.....	201
3.6	Метод рендерингу відеопотоку в області маркера доповненої реальності	203
3.6.1	Декомпозиція матриці гомографії	203

	40
3.6.2 Трансформація координат	206
Висновки до розділу 3	207
4 ПОБУДОВА ТА ВИЯВЛЕННЯ МОЗАЇЧНИХ СТОХАСТИЧНИХ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	209
4.1 Побудова мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	209
4.1.1 Дублювання даних	211
4.1.2 Перемішування даних	211
4.1.3 Створення біт-контейнеру	212
4.2 Виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	213
4.2.1 Ввід зображення	214
4.2.2 Застосування std-фільтра	216
4.2.3 Бінаризація	216
4.2.4 Морфологічне очищення	218
4.2.5 Вибір максимального по площі об'єкта	219
4.2.6 Знаходження біт-контейнерів	220
4.3 Знаходження параметрів проєціювання без врахування апріорної інформації.....	225
4.3.1 Ітеративне визначення опорних точок	226
4.3.2 Зауваження до реалізації методу	231
4.4 Декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	232
4.4.1 Визначення кількості рядків і стовпців.....	233
4.4.2 Заповнення матриці біт-контейнера	235
4.4.3 Визначення зсуву у повній матриці бітів.....	236
4.4.4 Декодування повної матриці біт-контейнера	238

4.5 Загальні методи використання мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	240
4.5.1 Проеціювання віртуального об'єкта на площину AR-маркера.....	241
4.5.2 Рендеринг відеопотоку в області AR-маркера	246
4.6 Теоретичні оцінки якості мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	248
4.6.1 Теоретичні оцінки помітності маркерів.....	248
4.6.2 Теоретичні оцінки простоти маркерів.....	249
4.6.3 Теоретичні оцінки інформативності маркерів	252
4.6.4 Теоретичні оцінки орієнтованості маркерів	253
4.6.5 Теоретичні оцінки робастності маркерів	254
4.6.6 Теоретичні оцінки криптостійкості маркерів.....	259
4.6.7 Теоретичні оцінки універсальності маркерів	268
4.7 Оцінки реалізації методів по часу виконання і складності	268
4.7.1 Оцінки для методів побудови мозаїчних стохастичних маркерів	268
4.7.2 Оцінки для методів виявлення мозаїчних стохастичних маркерів	269
4.7.3 Оцінки для методу знаходження параметрів проєціювання без використання додаткової апріорної інформації.....	269
4.7.4 Оцінки для методів декодування мозаїчних стохастичних маркерів	269
4.7.5 Оцінки для методів проєціювання віртуальних об'єктів на площину мозаїчних стохастичних маркерів.....	270
4.7.6 Оцінки для методів рендерингу відео-потoku в області мозаїчних стохастичних маркерів	270

4.7.7 Оцінки для методу пошуку інверсних псевдовипадкових блочних перестановок.....	271
Висновки до розділу 4	271
5 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ І ВИКОРИСТАННЯ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	276
5.1 Структура інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності	276
5.1.1 Основний процес побудови мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	277
5.1.2 Основний процес застосування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	279
5.1.3 Декомпозиція підпроцесів застосування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності	282
5.2 Опис експериментів, що проводилися в роботі	292
5.2.1 Основні припущення та обмеження	292
5.2.2 Створення мозаїчних стохастичних маркерів	293
5.2.3 Опис умов експериментів	296
5.2.4 Вхідні зображення, що використовувалися в проведенні експериментів.....	297
5.3 Результати експериментів	299
5.3.1 Результати декодування повідомлення	299
5.3.2 Результати проєціювання віртуального 3d-об'єкта на площину маркера.....	301
5.3.3 Результати рендерингу відео-потoku в області маркера.....	305
5.4 Експериментальні оцінки	307
5.4.1 Вплив шуму різного типу на точність декодування візуальних маркерів.....	307

5.4.2 Порівняння теоретично розрахованих та експериментальних розподілів імовірності правильного декодування в залежності від імовірності помилки і пропуску даних.....	313
5.4.3 Експериментальне доведення можливості знаходження інверсних блочних перестановок	320
5.4.4 Порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних маркерів доповненої реальності	328
Висновки до розділу 5	330
ВИСНОВКИ.....	335
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	340
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	371
А.1 Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	371
А.2 Відомості про апробацію результатів дисертації.....	381
ДОДАТОК Б Акти про реалізацію і впровадження результатів дисертаційної роботи	386

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- 2D – 2-вимірний;
- 3D – 3-вимірний;
- АКФ – автокореляційна функція;
- BIC – візуальна інформаційна структура;
- ГА – генетичний алгоритм;
- НДР – науково-дослідна робота;
- СУБД – системи управління базами даних;
- API – прикладний програмний інтерфейс (англ. Application Program Interface);
- AR – доповнена реальність (англ. augmented reality);
- CV – комп’ютерний зір (англ. Computer Vision);
- GA – генетичний алгоритм (англ. Genetic Algorithm);
- GPS – глобальна система позиціонування (англ. Global Positioning System);
- IDEF0 – методологія функціонального моделювання і графічного описання процесів (англ. Integrated DEFinition – інтегровані визначення);
- MATLAB – система програмування (англ. MATrix LABoratory – матрична лабораторія);
- OpenCV – бібліотека комп’ютерного зору з відкритим кодом (англ. Open Source Computer Vision Library);
- ORB – орієнтовані швидкі ознаки (англ. Oriented FAST and rotated BRIEF);
- QR-код – код швидкого відгуку (англ. Quick Response Code);
- RANSAC – узгодження випадкових вибірок (англ. RANdom SAMple

Consensus);

SADT – методологія структурного аналізу і проектування (англ. Structured Analysis and Design Technique);

SDK – набір засобів розробки (англ. Software Development Kit);

SIFT – масштабно-незалежне перетворення ознак (англ. Scale-Invariant Feature Transform);

SURF – пришвидшені стійкі ознаки (англ. Speeded Up Robust Features);

std – середньо-квадратичне відхилення (англ. standard deviation);

SVD – сингулярний розклад матриці (сингулярне представлення матриці, англ. singular-value decomposition);

SWOT – Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats;

url – уніфікований локатор ресурсів або адреса ресурсу (англ. Uniform Resource Locator – єдиний вказівник на ресурс);

VR – віртуальна реальність (англ. virtual reality).

ВСТУП

Актуальність теми. Доповнена реальність (augmented reality або AR) – це доповнення фізичного світу за допомогою цифрових даних, яке забезпечується мобільними пристроями чи спеціальними пристроями (наприклад, окулярами AR) в режимі реального часу [1]. У наш час інформаційні технології доповненої реальності використовуються у багатьох областях: медицина, освіта, військова сфера, виробництво і транспорт, кіно і телебачення, онлайн-трансляції, підготовка та навчання співробітників, маркетинг і реклама, роздріб/онлайн-комерція і торгівля нерухомістю, ігрова індустрія тощо [2]–[17].

Згідно прогнозів банку Goldman Sachs [18] та інших [7], [17], [19]–[20] щодо розвитку ринку систем віртуальної та доповненої реальності до 2025 року, більшість систем доповненої реальності будуть використовуватися на мобільних платформах, що супроводжується [17], [21]:

- постійним збільшенням загального обсягу і доступності інформації з мобільних пристроїв;
- збільшенням інформації з високою розрізненістю;
- комплексного використання даних від різних джерел і пристроїв;
- збільшенням кількості суб'єктів у сфері отримання, розповсюдження, обробки та застосування інформації.

З аналізу [2]–[21] встановлено, що сучасні системи обробки і передачі візуальної інформації, частинним випадком яких є маркерні системи доповненої реальності, базуються на візуальних інформаційних структурах (ВІС). Для маркерних систем доповненої реальності, у якості ВІС в даний час виступають лише візуальні маркери. У безмаркерних системах маркером є місцезнаходження камери, що визначається за допомогою системи

глобального позиціювання (GPS – Global Positioning System) [22]–[24].

Маркерні і безмаркерні системи доповненої реальності представлені приблизно однаково [25], при цьому безмаркерні системи найчастіше використовуються в ігрових та туристичних застосуваннях [21], [25]–[26].

Для отримання додаткової інформації про довільні об'єкти у переважній більшості випадків будуть використовуватися системи доповненої реальності на основі BIC [27]. Основні типи візуальних маркерів доповненої реальності (AR-маркерів, розглядаються як частинний випадок BIC), які зараз використовуються [28]:

- шаблонні маркери (template markers) – чорно-білі маркери, які мають просте зображення всередині чорної рамки;
- 2D штрих-кодові маркери (barcode markers) – маркери, що складаються з чорно-білих клітинок, які по-бітово кодують дані, найчастіше в якості штрих-кодових AR-маркерів використовують QR-коди [10], [29];
- колові маркери (circular markers) – аналогічно до штрих-кодових маркерів, тільки біти кодуються не прямокутними клітинками, а чорно-білими круговими секторами;
- маркери-зображення (image markers) – в якості маркерів використовуються звичайні зображення, як кольорові, так і зображення в градаціях сірого. Вони можуть містити рамку або інші орієнтири для виявлення та знаходження положення. Такі маркери-зображення зазвичай ідентифікуються за допомогою пошуку по шаблону або по особливостях зображення.

Відомо [27]–[30], що основні типи BIC на прикладі візуальних маркерів мають такі особливості застосування у системах доповненої реальності:

1) всі вони дозволяють визначати положення камери, але для цього використовуються різні методи:

- знаходження кутів зображення (шаблонні маркери);

- знаходження спеціальних областей прив'язки (штрих-кодові і колові маркери);

- знаходження особливих точок зображення і їх дескрипторів (маркери-зображення);

2) частина з них (штрих-кодові і колові маркери) містить додаткову інформацію (повідомлення), наприклад, посилання на інформаційні ресурси, що є однозначною перевагою, оскільки дозволяє розширити область застосування.

В сучасних умовах при використанні маркерних систем доповненої реальності до ВІС, взагалі, та до візуальних маркерів, зокрема, висуваються жорсткі вимоги по помітності (легке та швидке знаходження у відео-потоці), простоті (використання мінімальної кількості кольорів), інформативності (наявність додаткової інформації – повідомлення), орієнтованості (можливість визначення положення камери), робастності (збереження працездатності при втраті до 50% інформації), криптостійкості (повідомлення, що закодоване у ВІС, повинно бути стійким до криптоатак) і універсальності (використання технологіями обробки ВІС мінімуму апріорної інформації). Головною з цих вимог є вимога робастності – система повинна працювати при фізичній відсутності будь-якої частини ВІС чи закритті його завадою.

Очевидно, що жоден стандартний тип AR-маркера не буде відповідати вказаним вимогам у повній мірі, тобто існуючим ВІС (AR-маркерам) притаманні функціональні обмеження щодо їх стійкого використання та наявності повідомлення. В свою чергу, вимозі інформативності задовольняє інший тип ВІС – матричні коди (прикладом яких є QR-коди).

Таким чином, при проектуванні сучасних систем доповненої реальності загострилося **протиріччя** між зростаючими вимогами до візуальних інформаційних структур доповненої реальності і функціональними

обмеженнями відомих типів візуальних маркерів доповненої реальності щодо їх стійкого використання та наявності повідомлення. Сформульоване протиріччя обумовлене відсутністю моделей та методів побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності.

Для розв'язання указанного протиріччя актуальним є вирішення **наукової проблеми** розробки теоретичних основ створення моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів наукової і науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки, Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Базовими для підготовки і подання дисертаційної роботи є науково-дослідні роботи (НДР): держбюджетні НДР – "Методи, системи і засоби криптографічного захисту інформації з гарантованим рівнем стійкості та підвищеною швидкодією" (№ державної реєстрації (ДР) 0115U002431), "Створення програмного модуля обробки різномірних і різночасових даних, отриманих від оптико-електронних засобів безпілотних літальних апаратів та супутникових систем" шифр "Мозаїка-ПС" (№ ДР 0101U002020); господарсько-договірна НДР № 17-13 "Розробка моделей, механізмів, методів та засобів симетричного шифрування та гешування, методи оцінювання їх стійкості" шифр "Стійкість" (№ ДР 0118U003807), які виконувались в Харківському національному університеті радіоелектроніки та в Харківському національному університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, в яких основні наукові результати дисертаційної роботи використані у повному обсязі.

В НДР "Методи, системи і засоби криптографічного захисту інформації з гарантованим рівнем стійкості та підвищеною швидкістю" здобувачем розроблені теоретичні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності в системі криптографічного захисту інформації, розроблені моделі та методи стійкого формування, виявлення та декодування даних. Результати реалізовані в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки.

В НДР "Створення програмного модуля обробки різномірних і різночасових даних, отриманих від оптико-електронних засобів безпілотних літальних апаратів та супутникових систем" здобувачем запропоновано метод визначення параметрів проєктивного перетворення при обробці зображень з безпілотних літальних апаратів та супутникових систем, сумісно с Владиславом Худовим розроблено експериментальний програмний модуль обробки різномірних і різночасових даних оптико-електронних систем спостереження безпілотних літальних апаратів та супутникових систем. Результати реалізовані в роботі органів управління при фундаментальних теоретичних дослідженнях та практичних розробках програмних продуктів обробки даних космічної та висотної аерофотозйомки.

В НДР "Розробка моделей, механізмів, методів та засобів симетричного шифрування та ґешування, методи оцінювання їх стійкості" здобувачем при розробці моделі симетричного шифрування та ґешування запропоновано метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, методи проєктування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, розроблена інформаційна технологія використання мозаїчних стохастичних маркерів у системах доповненої реальності. Результати реалізовані в приватному акціонерному товаристві "Інститут інформаційних технологій".

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності шляхом розробки моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур.

Показниками якості відновлення повідомлення, що задовано у ВІС, у дисертаційній роботі обрано кількість помилок декодування повідомлення в залежності від імовірностей помилки і пропуску даних.

Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- провести критичний аналіз існуючих моделей, методів, та інформаційних технологій в системах доповненої реальності;
- розвинути теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності для забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності в умовах несприятливих зовнішніх впливів;
- створити системне уявлення візуальної інформаційної структури доповненої реальності та розробити її модель;
- розробити метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити модель та метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації;
- розробити метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності;

- розробити інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, яка дозволяє забезпечити вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності;

- провести порівняльну оцінку якості використання існуючих та мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності в умовах часткової втрати інформації;

- провести оцінку криптостійкості методу кодування інформації у мозаїчних стохастичних маркерах доповненої реальності.

Об’єкт дослідження – процес побудови і використання візуальних інформаційних структур у системах доповненої реальності.

Предмет дослідження – моделі, методи та інформаційна технологія побудови і використання візуальних інформаційних структур у системах доповненої реальності.

Методи дослідження. Дослідження базується на критичному аналізі відомих методів та інформаційних технологій доповненої реальності. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися наступні методи:

- при аналізі існуючих методів, моделей та інформаційних технологій в системах доповненої реальності використовувалися математичні методи порівняння зображень, методи цифрової обробки зображень, методи комп’ютерного зору;

- при розвитку теоретичних основ побудови і використання ВІС доповненої реальності для забезпечення стійкого функціонування системи в умовах несприятливих зовнішніх впливів використовувалися методи теорії категорій, цифрової обробки зображень, комп’ютерного зору;

- при розробці моделі ВІС, методу формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, моделі та методу виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності використовувалися методи теорії ймовірності, методи комбінаторики, методи математичного

модельовання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій, методи теорії оптимізації;

– при розробці методу визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації, методу декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, методу проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, розробці інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності використовувалися методи теорії матриць, методи аналітичної геометрії, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій, методи теорії оптимізації;

– для оцінки якості методів використання існуючих та мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, оцінки криптостійкості методу кодування інформації у мозаїчних стохастичних маркерах доповненої реальності використовувалися методи теорії ймовірності, методи теорії груп, методи математичної статистики, методи кластеризації даних, математичний апарат теорії матриць, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій.

При проведенні дослідження автор опирався на фундаментальні роботи в області обробки зображень У. Претта [31], Д. Канні [32], Р. Бейтса та Мак-Доннела [33], В. А. Сойфера [34], Р. Гонсалеса та Р. Вудса [35], Л. П. Ярославського [36], А. А. Потапова [37] та інших, в області комп'ютерного зору Л. Шапіро та Дж. Стокмана [38], Д. Форсайта та Ж. Понса [39], А. А. Лукьяніци та А. Г. Шишкина [40], С. Ю. Желтова [41] та інших, в області геометрії у комп'ютерному зорі Р. Хартлі та А. Цісермана

[42] та інших, в області псевдоголографічного кодування А. М. Брукштейна [43]–[44], А. В. Марковського [45]–[46], О. П. Кузнєцова [46], Р. Довгарда [47], Д. Уривської [48], в області доповненої реальності П. Мілгрема та А. Кушино [49], Р. Азуми [50] та інших, в області теорії категорій Б. Якобса [51], С. П. Ковалёва [52] та інших.

Досягненню мети дисертаційної роботи сприяла опора на прикладні роботи С. О. Суботіна [53]–[54], Т. А. Махно [55], В. М. Курейчика [56]–[58], А. В. Пантелєєва [59]–[60], І. В. Рубана [61]–[63], К. С. Смелякова [64], В. П. Машталіра [65]–[66], С. В. Машталіра [65]–[67], Є. П. Путятіна [68], В. О. Гороховатського [69], С. І. Богучарського [70], В. О. Філатова [71], М. В. Ткачука [72], В. Г. Худова [73] та інших.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному.

1. Вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності та метод їх формування, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності.

2. Вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення.

3. Вперше розроблено метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх

значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера.

4. Вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію перматованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації.

5. Отримали подальший розвиток теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, які, на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного формування, перетворення та декодування візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем доповненої реальності.

6. Удосконалено модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

7. Отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потоків в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних

властивостей засобів реєстрації зображення.

8. Удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у розробці інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності, автоматизації процесу побудови візуальних об'єктів в існуючих та перспективних інформаційних системах доповненої реальності.

Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані:

- у спеціалізованому програмно-апаратному комплексі (ПАК) обробки інформації у вигляді алгоритмів і програм робочого місця інтерпретатора-дешифрувальника (акт про реалізацію військової частини А2667, м. Київ від 28.02.2020).

- в приватному акціонерному товаристві "Авікос" при створенні модулів управління рухомими об'єктами в комплексах "Скіф", "Стугна", БМ "Оплот" (акт про впровадження приватного акціонерного товариства "Авікос", м. Львів від 28.05.2020);

- в Державному підприємстві "Центр державного земельного кадастру" Державного агентства земельних ресурсів України (акт про впровадження Державного підприємства "Центр державного земельного кадастру" Державного агентства земельних ресурсів України, м. Київ від 29.05.2020);

- в Національному центрі управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України (акт про впровадження

Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, м. Київ від 26.05.2020);

– в освітньому процесі Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (акт про впровадження Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків від 05.05.2020).

Акти про впровадження та реалізацію результатів дисертаційної роботи наведені в додатку Б.

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати можуть бути використані:

– в організаціях, що є замовниками науково-технічної продукції та в науково-дослідних організаціях при обґрунтуванні технічних вимог до перспективних систем обробки зображень та комп'ютерного зору;

– в науково-виробничих організаціях промисловості при розробці нових систем і комплексів обробки зображень та комп'ютерного зору;

– у вищих навчальних закладах, що займаються підготовкою фахівців з обробки зображень та комп'ютерного зору.

Впровадження розроблених у дисертаційній роботі моделей і методів в модернізацію існуючих і розробку перспективних систем доповненої реальності дозволить забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій та систем доповненої реальності шляхом побудови та використання мозаїчних стохастичних маркерів, а саме:

– час виявлення $\tau_d < 1/30$ сек, що в 3 рази менше, ніж час виявлення QR-кодів і приблизно у 5 разів менше ніж для маркерів-зображень;

– кількість кольорів, що необхідні для побудови маркера, $n_c = 3$ – бінарне зображення і додатковий проміжний колір;

– середня ентропія повідомлення що закодована в ньому, за побудовою складає $e_m = 1/9$ біт/піксел, що приблизно у 4,5 разів менше за

інформативність QR-кодів і приблизно у 50 разів більше ніж у колових маркерів, у решта маркерів інформативність – 0;

– кількість помилково декодованих бітів повідомлення $p_e < 1$ при $q \leq 1/2$, для QR-кодів $p_e > 1$, для решта маркерів робастність – 0;

– існує можливість визначення положення камери по зображенню маркера;

– середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації, $p_p = 63^2!$ при розмірі блоку рівним розміру зображення, для решта маркерів криптостійкість 0;

кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера ~ 1 , в той час, як для QR-кодів ~ 10 , для маркерів-зображень ~ 100 .

Особистий внесок здобувача. Наукові результати дисертаційної роботи сформульовані і отримані автором самотійно. Наукові праці [74]–[79] опубліковані без співавторів. Окремі етапи дослідження були виконані у співпраці. Результати цих етапів дослідження відображені у наукових працях, що опубліковані в співавторстві, – [80]–[105]. Ступінь особистого внеску автора в отриманні результати можна оцінити таким чином:

– в [80] автором розроблено модель формування зображення і метод декодування даних при визначенні джерел лісових пожеж за супутниковими знімками;

– в [81] автором проведена оцінка імовірностей помилки і пропуску даних на зображеннях при впливі протяжних маскуючих перешкод;

– в [82] автором розроблено метод використання псевдоінверсії Мура-Пенроуза для відтворення зображень з градієнтів при виявленні динамічних часткових спотворень;

– в [83] автором визначені показники якості відновлення повідомлення, що закодовано у мозаїчному стохастичному маркері, в умовах розфокусування та змазування зображення-повідомлення;

– в [84] автором запропоновано використання генетичних алгоритмів в методі декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності для фільтрації перматованого зображення;

– в [85] автором запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера знаходити маски біт-контейнерів шляхом сегментування маскованої області зображення, проаналізовані відомі методи сегментування зображення;

– в [86] автором запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера для сегментування маскованої області зображення використовувати метод Отсу;

– в [87] автором запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера для сегментування маскованої області зображення використовувати еволюційні методи;

– в [88] автором запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера для оцінки якості сегментування маскованої області використовувати відстань Кульбака-Лейблера;

– в [89] автором досліджено еволюційний метод сегментування зображення та ефективність його застосування для виявлення мозаїчного стохастичного маркера;

– в [90] автором запропоновано трансформація зображення для побудови матриці бітів маркера та подальшого декодування зображення мозаїчного стохастичного маркера;

– в [91] автором досліджено вплив шумів на точність декодування зображення мозаїчного стохастичного маркера;

– в [92] автором досліджено метод штучної бджолоїної колонії сегментування зображення та ефективність його застосування для виявлення мозаїчного стохастичного маркера;

– в [93] автором розроблено метод декодування даних дистанційного зондування для контролю за станом земель запасу та резервного фонду;

– в [93] автором розроблено метод формування зображення маркера доповненої реальності, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення;

– в [94] автором запропоновано метод поканального відновлення зображення в умовах несприятливих зовнішніх впливів;

– в [95] автором запропоновано використання суми дисперсій у якості цільової функції, яка в подальшому використовується у методі визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера;

– в [96] автором досліджено застосування перетворення Хафа при розробці метода визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера;

– в [97] автором запропоновано в методі виявлення об'єктів в системах екологічного моніторингу для сегментування маскованої області зображення використовувати ройові методи;

– в [98] автором запропоновано метод штучної бджолоїної колонії сегментування зображення для виявлення об'єктів;

– в [99] автором запропоновано метод формування зображення, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення у задане число разів;

– в [100] автором досліджено застосування метода Канні та перетворення Хафа при розробці метода визначення параметрів проективного перетворення зображення;

- в [101] автором запропоновано використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок;
- в [102] автором досліджено мурашиний метод сегментування зображення та ефективність його застосування для виявлення зображення маркера;
- в [103] автором досліджено сегментування кольорового зображення мурашиними алгоритмами;
- в [104] автором досліджена функція розмиття зображення-повідомлення при змазуванні та розфокусуванні.

2 липня 2019 року на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 Харківського національного університету радіоелектроніки була успішно захищена дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня "кандидата технічних наук" Худовим Владиславом на тему "Методи тематичного сегментування зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження на основі мурашиних алгоритмів" [73]. У сумісних с Худовим Владиславом роботах [84]–[85], [87]–[91], [94], [98], [102], [103] різний особистий внесок здобувача, а наукові результати, що отримані особисто Худовим В., не виносяться на захист даної дисертаційної роботи.

Апробація матеріалів дисертації. Результати дисертаційної роботи апробовані на 29 наукових, науково-технічних, науково-практичних конференціях: 9-й, 11-й, 14-й та 15-й наукових конференціях "Новітні технології – для захисту повітряного простору" (м. Харків, 2013, 2015, 2018, 2019 pp.) [105]–[109]; 13-й Міжнародній науково-практичній конференції «Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)» (м. Львів, 2015 p.) [110]; IX науково-практичній конференції «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО» (м. Київ, 2016 p.) [111], 17-й науково-

технічній конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» (м. Чернігів, 2017 р.) [112], 4-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи» (м. Одеса, 2017 р.) [113], Міжнародній конференції "Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law" (м. Чернігів, 2018 р.) [114], XXII всеукраїнській науково-практичній конференції «Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції» (м. Житомир, 2018 р.) [115], Міжнародних науково-технічних конференціях «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ» (м. Львів, 2018, 2019 рр.) [116]–[117], 8-й, 9-й Міжнародних науково-технічних конференціях "Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління" (м. Полтава–Баку–Харків–Жиліна, 2018–2019 рр.) [118]–[119], 5-й та 6-й Міжнародних науково-практичних конференціях "Problems of info-communications science and technology (PICT S&T 2017, PICT S&T 2018)" (м. Харків, 2017 р., м. Київ, 2018 р.) [120]–[121]; І всеукраїнській науково-практичній конференції «Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів» (м. Житомир, 2018 р.) [122], науково-практичній конференції "Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності" (м. Львів, 2018, 2019 рр.) [123]–[124]; Міжнародній науково-практичній конференції «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine» (м. Влоцлавек, 2018 р.) [125], Міжнародній науково-практичній конференції «Science, Research, Development # 14. Technics and Technology» (м. Лондон, 2019 р.) [126], 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології» (м. Харків, 2019 р.) [127], 3-й Міжнародній

науково-практичній конференції «Наукоємні технології в інфокомунікаціях» (м. Кам'янець-Подільський, 2019 р.) [128], VII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (м. Київ, 2019 р.) [129], Міжнародній науково-практичній конференції «Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України» (м. Хмельницький, 2019 р.) [130], XII науково-практичній конференції «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил» (м. Київ, 2019 р.) [131], XXV Всеукраїнській науковій конференції "Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики APAMCS-2019" (м. Львів, 2019 р.) [132], 15 Міжнародній конференції "Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET)" (м. Славське, 2020 р.) [133].

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 60 наукових роботах, серед яких 31 наукова стаття [74]–[104] (30 наукових статей опубліковані у виданнях з технічних наук, включених в "Перелік наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата наук" [74]–[89], [91]–[104], 1 стаття опублікована у зарубіжному науковому періодичному виданні [90], 30 статей – в наукових виданнях, що індексуються міжнародними бібліометричними і наукометричними базами даних: Scopus, Cross Ref, EBSCO, Scientific Indexed Service, Index Copernicus, Academic Resource Index, Google Scholar, Open Academic Journals Index, General Impact Factor, Scholar Steer, Ulrich's Periodicals Directory, Directory Indexing of International Research Journals, Bielefeld Academic Search Engine, WorldCat, DOAJ, ResearchBib, Polska Bibliografia Naukowa, з них 28 – в

спеціалізованих наукових журналах [74]–[103], 1 – в збірнику наукових праць [104], серед яких 6 статей написані без співавторів [74]–[79]), 29 тез доповідей у матеріалах наукових, науково-технічних, науково-практичних конференціях [105]–[133], в тому числі 14 тез – на міжнародних конференціях [110], [114], [116]–[121], [125]–[128], [130], [133] (матеріали чотирьох науково-практичних конференцій індексуються міжнародними наукометричними базами IEEE Xplore, Scopus та Web of Science [110], [120]–[121], [133]). Матеріали дисертаційної роботи були використані при розробці 4 звітів про НДР [134]–[137].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг дисертації складає 394 сторінки, у тому числі 276 сторінок основного тексту, 11 сторінок займають титульний аркуш, зміст, перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів, 2 анотації на 34 сторінках, 129 рисунків та 16 таблиць, з них 16 рисунків та 5 таблиць повністю займають площу на 18 сторінках, список використаних джерел з 247 найменувань на 31 сторінці, 2 додатки на 24 сторінках.

Список використаних джерел у вступі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [1]–[137].

1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМАХ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

У даному розділі проведено аналіз відомих моделей, методів та інформаційних технологій обробки зображень в сучасних системах доповненої реальності, проаналізовані типи існуючих маркерів доповненої реальності та типові методики роботи з ними, сформульовано вимоги до візуальних маркерів доповненої реальності. Стисло висвітлені роботи попередників, що присвячені розробці моделей, методів та інформаційних технологій обробки зображень в системах доповненої реальності, окреслені основні етапи розвитку наукової думки щодо застосування маркерів в системах доповненої реальності та виділені питання, що залишилися невирішеними. Сформульовані завдання дослідження.

Матеріали розділу викладені в роботах [74]–[75], [77]–[80], [84], [87], [89], [92], [97]–[99], [101]–[102], [104].

1.1 Аналіз застосування існуючих систем доповненої реальності

1.1.1 Основні поняття та визначення

Термін «доповнена реальність» (в перекладі з англійської *augmented reality* або AR, надалі будемо вживати його без лапок) був запропонований, як вважається, Томом Коделом (Tom Caudell) у 1990 році [138]–[140].

У концепції Пола Мілграма (Paul Milgram) та Фуміо Кісіно (Fumio Kishino), що описана у 1994 році, доповнена реальність є частиною *змішаної реальності*, яку також називають *гібридною реальністю* (*hybrid reality*) [49]. Автори описали т. зв. Континуум Віртуальність-Реальність (Milgram's Reality-Virtuality Continuum) – простір між реальністю і

віртуальністю, між якими розташована доповнена реальність (ближче до реальності) і доповнена віртуальність (ближче до віртуальності). Зауважимо, що саме поняття континууму передбачає, що границі між цими просторами є розмитими і можливий неперервний перехід від одного до іншого.

Рональд Азума (Ronald Azuma) у 1997 році визначав доповнену реальність як систему, що має такі ознаки [50]:

- комбінування реального та віртуального світу;
- інтерактивність;
- тривимірне представлення об'єктів.

Іноді використовують як синоніми назви «розширена реальність», «поліпшена реальність», «збагачена реальність». Доповнену реальність (augmented reality, AR) треба відрізняти від віртуальної (virtual reality, VR) і змішаної (mixed reality, MR) [49]:

- доповнена реальність – віртуальні об'єкти проєктуються на реальне оточення;
- віртуальна реальність – створений технічними засобами світ, який передається людині через органи чуття (на даному етапі розвитку технологій);
- змішана або гібридна реальність об'єднує обидва підходи.

Тобто, віртуальна реальність створює свій світ, куди може зануритися людина, а доповнена додає віртуальні елементи в світ реальний. Отже, віртуальна реальність взаємодіє лише з користувачами, а доповнена реальність – з усім зовнішнім світом.

Надалі в роботі під доповненою реальністю (augmented reality або AR) будемо розуміти доповнення фізичного світу за допомогою цифрових даних, яке забезпечується мобільними пристроями чи спеціальними пристроями (наприклад, окулярами AR) в режимі реального часу [1], [18].

Технологічно, за принципом позиціонування, системи доповненої реальності поділяються на дві основні групи:

Доповнена реальність, що базується на візуальних маркерах [18].

Технологія використовує камеру та спеціальні пасивні візуальні маркери, наприклад QR-код (quick response code – код швидкого відгуку, [19]). В якості маркерів можуть також використовуватися зображення об'єктів реального світу. Детектуючи маркери у відео-потоці, вдається вирізнити віртуальні об'єкти з реального світу. При цьому суттєвим є визначення положення та орієнтації камери, яке визначається засобами комп'ютерного бачення [1], [18].

Безмаркерна доповнена реальність [18]. У даному випадку маркером є саме місцезнаходження камери, що визначається за допомогою системи глобального позиціювання (GPS – Global Positioning System); при цьому положення та орієнтація камери задається з використанням гіроскопу, акселерометру, цифрового компасу та інших сенсорів, якими обладнано мобільний пристрій [1], [18], [20].

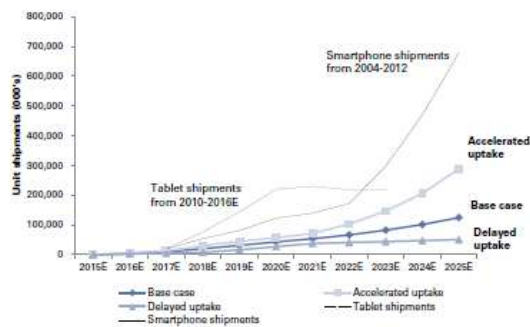
1.1.2 Тенденції розвитку і основні галузі застосування систем доповненої реальності

Згідно прогнозів банку Goldman Sachs [21] (рис. 1.1) та інших (див., наприклад, [22]–[23]) щодо розвитку ринку систем віртуальної та доповненої реальності до 2025-го року, за обсягом оборотів і прибутку ринок буде поділений на такі сегменти (в порядку спадання):

- ігри;
- медицина;
- освіта;
- військова сфера;
- виробництво і транспорт;
- кіно і телебачення;

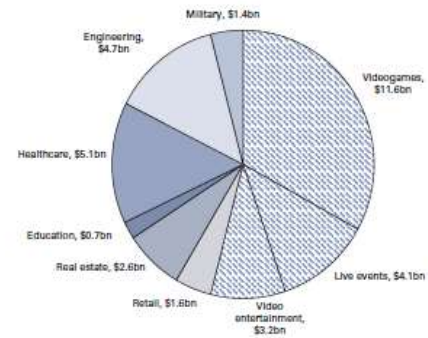
- онлайн-трансляції;
- підготовка та навчання співробітників;
- маркетинг і реклама;
- роздріб/онлайн-комерція;
- торгівля нерухомістю.

Exhibit 1: Our VR/AR unit forecasts assume far slower adoption than smartphones or tablets



а)

Exhibit 4: Our 2025 base case VR/AR software assumptions by use case



б)

Рисунок 1.1 – Прогноз використання систем доповненої реальності:

- а) основні сценарії розвитку засобів віртуальної та доповненої реальності;
- б) галузеве сегментування ринку

Застосування технологій доповненої реальності наведено в табл. 1.1 [2]–[3].

Таблиця 1.1 – Застосування технологій доповненої реальності [2]–[3]

Технологія AR	Галузь застосування	Потенційні результати
Управління та взаємодія		
Візуальні підказки, що допомагають вирішувати задач по експлуатації, ремонту, монтажу	Аерокосмічна промисловість, військово-промисловий комплекс, будівництво, охорона здоров'я, нафтогазова галузь, енергетика та комунальні послуги, технічні та прикладні науки	Підвищення продуктивності, налагоджений робочий процес, зниження ризиків, віддалена взаємодія

Закінчення табл. 1.1

Імерсивне навчання		
Створення реалістичного середовища для тренування, яке в реальних умовах пов'язане з високим ризиком або високими затратами для персоналу; створення визначених умов та явищ для цілей психологічної реабілітації	Споживчий сегмент, охорона здоров'я, вища освіта, програми підвищення кваліфікації, промислові продукти	Скорочення ризиків, зниження витрат, посилення терапевтичного ефекту, скорочення витратних матеріалів
Покращення клієнтського досвіду		
Покращення клієнтського досвіду шляхом впровадження настроюваних та унікальних методів взаємодії з компанією, брендом або продуктом	Автомобільна промисловість, банківська справа та цінні папери, споживацькі продукти, медіа та розваги, туризм, сфера послуг	Залучення клієнта, підвищення маркетингових можливостей, зростання продажів, підвищення конкурентноспроможності бренда
Дизайн та аналіз		
Візуалізація даних, проектування, нові форми аналізу	Аерокосмічна промисловість, військово-промисловий комплекс, автомобільна промисловість, будівництво, вища освіта, нерухомість, технічні та прикладні науки	Економія витрат, підвищення ефективності, виявлення недоліків проектування та ранніх етапах, нові методи аналізу даних, складання звітності та прогнозування

Далі наведемо короткий огляд застосування систем доповненої реальності по основних галузях – ігровій індустрії, медицині та військовій техніці.

1.1.3 Аналіз застосування систем доповненої реальності в ігровій індустрії

Коли мова йде про ігрову індустрію, то в першу чергу мається на увазі ринок ігрових мобільних аплікацій. У [25] наведено список найбільш популярних (станом на 2019 рік) ігрових додатків на платформі Android:

1. Pokémon GO (Niantic, Inc.) – це локальна гра з доповненою реальністю, де користувачі досліджують локації, щоб фотографувати та тренувати цифрові істоти, використовуючи камеру телефону та GPS в реальному світі. Додаток також дозволяє надавати інформацію про визначні пам'ятки поблизу, переглядати різні оголошення та трейлери фільмів, просто вказуючи камеру смартфона на постер [142].

2. Titans of Space – програма пропонує візуалізацію Сонячної системи разом з описом небесних тіл [143].

3. Crayola Color Alive – книжка-розмальовка, що виглядає як старовинна іграшка. Додаток Crayola Color Alive збагачений усіма програмами для малювання та розмальовок для планшетів. Додаток працює з книжками-розмальовками Crayola's Color Alive, є можливість завантажити безкоштовні шаблони та роздрукувати їх, щоб діти малювали на сторінці [144].

4. Ingress – командна гра, що заснована на GPS-локаціях, в якій потрібно знаходити і створювати портали, при чому замість ігрової дошки Ingress використовує карту реального світу [145].

5. SpecTrek – гра на полювання на привидів, додаток використовує GPS-місцерозташування для відстеження та полювання на паранормальних істот [146].

Аналогічний огляд для платформи iOS наведено в [147]. З основних AR-додатків слід відмітити:

1. Google Maps – нова функція Live View привносить доповнену реальність арсеналу функцій, доступних на картах Google. Функція Live View допомагає орієнтуватися, накладаючи віртуальні знаки та стрілки на екран камери iPhone, щоб вказати шлях до місця призначення [148].

2. Civilizations AR – додаток використовує розширену реальність, щоб перетворити iPhone на мобільний музей – переглядати кожен артефакт у реалізованих 3D-рендерінгах, використовуючи свій телефон як видошукач AR [149].

3. Big Bang AR – розширена медіа-презентація, яка демонструє еволюцію Всесвіту від Великого Вибуху до завершальних моментів Наднової зірки, народження Сонячної системи та Землі [150].

4. Mondly – додаток для вивчення мов, додає підтримку AR для вивчення іноземних мов: анімований чат, а також візуалізацію об'єктів і слів, щоб зробити навчання більш динамічним [151].

5. Dance Reality – додаток на базі ARKit, який навчає основним танцювальним рухам, відображаючи роботу ніг на екрані смартфона [152].

Зауважимо, що більшість додатків доступні на обох платформах – Android та iOS. Інші мобільні плаформи, такі як BlackBerry, Open webOS, Symbian OS, Bada від Samsung, та Windows Mobile у даному огляді не розглядалися у зв'язку із їх низьким охопленням ринку [21]–[23], [153]–[154].

1.1.4 Аналіз застосування систем доповненої реальності в медицині

Одне з перших застосувань розширеної реальності було в галузі охорони здоров'я, зокрема для підтримки планування, практики та підготовки хірургічних процедур [8], [155]. У 2005 року, для визначення локалізації вен використовувався прилад, який обробляв зображення в інфрачервоному діапазоні та проектував їх на шкіру [156].

Засоби доповненої реальності надають хірургам можливість відображати дані моніторингу пацієнтів, отримувати та накладати записи зображень пацієнтів, включаючи функціональні відеозаписи. Наприклад, віртуальний рентгенівський огляд на основі попередньої томографії або на зображеннях у реальному часі з ультразвукових та конфокальних мікроскопічних зондів [157], що візуалізує положення пухлини на відео ендоскопа [158] або ризику опромінення від рентгеноскопії [159].

Доповнена реальність візуалізує положення плоду в утробі матері [160].

Компанії Siemens, Karl Storz та IRCAD розробили систему лапароскопічної операції на печінці, яка використовує засоби AR для огляду пухлин та судин на підповерхні [161].

Пацієнтам, які носять окуляри додаткової реальності, можна нагадати, коли вони повинні приймати ліки [162].

Застосування віртуальної реальності у хірургії є надзвичайно перспективним перш за все тому, що в жодній іншій сфері медицини візуалізація дій лікаря не відіграє настільки важливу роль. У даному випадку, хірург володіє тривимірною інформацією про пацієнта, що дозволяє йому створювати інтерактивні моделі, які, в свою чергу, можуть прогнозувати наслідки хірургічного втручання в організм людини [8]–[10], [157].

Розширена реальність та подібні комп'ютерні технології використовуються для підготовки медичних працівників [11]–[13], [21], [157].

Нижче наведемо перелік основних медичних сервісів та компаній, що використовують у своїх діяльності засоби віртуальної та доповненої реальності (за даними з [21]).

1. HealthiAR – інформаційний сайт, що охоплює основні питання, пов'язані з використанням VR/AR у медицині [14].

2. Invivo – медична компанія, що базується в Торонто, Invivo допомагає фармацевтичним компаніям, лікарням та лікарям проводити навчання, використовуючи засоби віртуальної та доповненої реальності [15].

3. Augmedix – компанія, що використовує AR та Google Glass для надання лікарям режиму вільного доступу до запису, зберігання та відкликання інформації про пацієнтів; Augmedix вирішує ряд проблем, орієнтованих на пацієнта в галузі медицини [16].

4. Karan – швейцарська компанія, використовує AR, щоб показати

пацієнтам, як виглядатимуть зуби після косметичної операції. Використовуючи передові методики сканування, вони здатні відтворити нові зуби замість старих у режимі реального часу [15], [163].

1.1.5 Аналіз застосування систем доповненої реальності у військовій техніці

Даний огляд базується на роботах В. Слюсарчука [17], [164]–[167], див. також [168].

Поширення у збройних силах провідних країнах світу різноманітних тактичних засобів доповненої реальності (для екіпажів літаків, вертольотів, суден, бойових машин, танків, в екіпіровці солдат [164] тощо) робить актуальним завдання стандартизації відповідної технології візуалізації та протоколів передачі даних.

Основними напрямками стандартизації при цьому вважаються [165]: таксономія і категоризація відповідної термінології; операційні сценарії використання засобів AR різними категоріями користувачів; мінімальні військові вимоги до спроможностей AR засобів, типовий інтерфейс користувача, топологія фреймів візуалізації AR даних на дисплеях (фрейм вибору режимів роботи та індикації поточного з них (налагодження, бойовий, тренувальний тощо); фрейм відображення основної візуальної інформації та фрейм візуалізації даних GPS і параметрів руху транспортного засобу, зокрема, за допомогою одного чи кількох навігаційних кілець, що використовуються, наприклад, в системі ARC4 (США); типові AR символи для різних функцій та категорій користувачів; основні технічні специфікації (наприклад, максимальна кількість анотацій, що одночасно виводяться на дисплей та їхня щільність на одиницю відстані); протокол передачі AR даних (структура та розміри типового

блоку даних).

Найбільш простим варіантом реалізації тактичних систем доповненої реальності є використання анотативної символіки (Annotative Augmentation), в подальшому відбудеться перехід й до анімованих символів (Simulative Augmentation) [165] та символів, що синтезуються на основі алгоритмів штучного інтелекту [17].

Стосовно візуальних анотативних символів стандартизації підлягають розміри ікон (тактичних символів), їхні колір та його варіації у просторі і часі, 2D та 3D форми візуалізації, текстовий контент, час існування (поновлення), гіперпосилання, зміст і обсяги регіональної інформації.

Типовими категоріями анотативних тактичних символів є [165]: положення дружніх підрозділів, передній край та позиції противника (історичні, поточні та прогнозовані), місця знаходження саморобних вибухових пристроїв (історія, виявлені, але не знищені, ймовірні або підозрілі), дороги, мости, підземна інфраструктура, розчищені майданчики для вертольотів, локальні культурні пам'ятки тощо.

В якості важливого показника мінімальних вимог до спроможностей тактичних систем AR слід вказати діапазон дальностей 15–30 км, в межах якого має бути забезпечена оперативна генерація інформації для підтримки послуг AR [165]. Середовищем поширення даних доповненої реальності може бути Федеративна мережа місій (FMN) [166]. При цьому необхідно досягти взаємосумісності між форматом (моделлю) даних, які централізовано формуються у штабах, і програмним забезпеченням пристроїв відтворення AR символів, яке має ідентифікувати тип даних і відправити їх на дисплей (візуальні дані), динаміки (акустичні символи) чи тактильні елементи (рукавички, пояси тощо) [165].

В перспективі, з впровадженням Інтернету речей, цю проблему можливо вирішити через надання кожному з відтворювальних пристроїв унікальної IP-адреси в мережі й застосування звичайної IP-адресації для

передачі AR даних. Доки цього не відбулося, система доповненої реальності за допомогою стандартизованого протоколу має розрізняти типи даних та фізичний принцип їх відтворення [166].

Технологія доповненої реальності є потужним інструментом відпрацювання 3D-топології сховищ боєприпасів на місцевості з вибором сукупності боєприпасів у стеках та відстаней між ними на основі динамічної візуалізації зон ризиків. Поширення інформації про такі зони дозволить обирати безпечні місця дислокації та найменш ризикові маршрути пересування підрозділів [166]. Крім того, на окулярах AR або ж відповідних дисплеях можуть відображатися відомості про стан та історію боєприпасів [166]–[168].

1.1.6 Основні недоліки технологій доповненої реальності

У розвитку технологій доповненої реальності є певні проблеми [2], [5]:

- громіздкі або незручні гарнітури для використання продуктів у сфері доповненої реальності. Користувачі не задоволені дизайном пристроїв. Що стосується товарів з доповненою реальністю, то багато користувачів також заявляють про незручність окулярів;

- недолік якісного контенту. Користувачі заявляють про одноманітність існуючого контенту, його низьку якість, недосконалу реалізацію;

- висока вартість пристроїв. Більшість компаній зацікавлена в придбанні повноцінних пристроїв, які надягаються – шоломів та окулярів, для використання їх продукції не підходять мобільні пристрою і малопотужні варіанти шоломів й окулярів;

- юридичні проблеми. Компанії висловлюють свої сумніви з приводу

проблем з конфіденційністю даних та кібербезпекою;

– високий рівень конкуренції з боку інших розробників в процесі співпраці з компаніями, які шукають проекти в сфері доповненої реальності або які готові інвестувати в такі проекти.

Широкому розповсюдженню технологій доповненої реальності заважає ряд недоліків, які виявлені в ході їх активного тестування та використання (табл. 1.2 [2]).

Таблиця 1.2 – Недоліки існуючих технологій доповненої реальності [2]

Категорія	Недоліки
Апаратне забезпечення	– малий кут огляду; – неможливість швидкого ремонту на місці; – висока вартість мобільних пристроїв, пряма залежність продуктивності від вартості
Контент	– відсутність якісного контенту; – помилки з точки зору фізичної точності при переносі реальних об'єктів і явищ в віртуальний світ
Безпека	– відсутність механізму захисту персональних даних та конфіденційної інформації; – наявність шкідливого програмного забезпечення
Вплив на користувача	– розсіяна увага, втрата фокусування, втомленість

Серед загальних проблем можна виділити високу вартість пристроїв, які надягаються (шоломів й окулярів). Якщо шолом віртуальної реальності може дозволити собі далеко не кожен пересічний користувач, то розумні окуляри доповненої реальності є занадто дорогими навіть для корпоративного сегменту.

У доповненої реальності головна проблема пристроїв пов'язана не з розрізненням картинки, а з кутом огляду. Для мобільних пристроїв видима область доповненої реальності обмежена екраном смартфона або планшета, а найбільший кут огляду становить 90° [2].

Не вирішені повністю і питання інформаційної безпеки. Самі по собі пристрої доповненої реальності не володіють механізмом захисту

персональних і конфіденційних даних, тому інструменти забезпечення кібербезпеки доведеться шукати й купувати додатково.

Недостатня адаптованість контенту під конкретну платформу або пристрій також актуальна систем доповненої реальності. Те, що розроблено для використання під iOS, не буде працювати на пристроях під Android. Більшість програм не є кросплатформеними, що істотно звужує можливості їх використання.

Тим не менш, експерти вважають, що технології доповненої реальності мають величезні довгострокові перспективи, і багато недоліків вдасться усунути в найближчі п'ять років. На думку Дж. Річітелло, генерального директора компанії Unity, яка створила міжплатформову середу для розробки комп'ютерних ігор, належить знизити вартість і збільшити функціональність пристроїв віртуальної реальності [2], [6]. Така заява підтверджує той факт, що технології доповненої реальності будуть готові для широкого застосування в найближчі 2-5 років.

Підводячи підсумки, можна сказати, що ринок технології доповненої реальності стрімко зростає і розвивається. У 2020 році очікується збільшення обсягу ринку доповненої реальності майже на 95% в порівнянні з показниками 2019 року, до 2022 року ринок зросте за різними оцінками від 3 до 18 разів [1]–[2], [7], [17].

Більшість аналітиків прогнозують зростання сфери використання доповненої реальності, тому що вона має ширші можливості для застосування, простіша в розробці, пристосована до мобільних пристроїв. Так, на думку експертів, найбільший приріст ринку буде забезпечений саме за рахунок доповненої реальності для мобільних пристроїв [1]–[2], [7], [17].

Технології віртуальної та доповненої реальності захоплять нішу ігор і розваг, знайдуть широке застосування у B2B- та B2C-сегментах.

Дані технології відкривають нові можливості в області моделювання і візуалізації даних, навігації, проектування, навчання, формування

клієнтського досвіду і комунікацій. Вони можуть бути корисні для компаній в різних галузях, в першу чергу, експерти виділяють охорону здоров'я, освіту, ритейл, нерухомість і будівництво.

1.2 Огляд програмного забезпечення для проектування систем доповненої реальності

Найбільш популярними (станом на кінець 2019 року) засобами розробки систем доповненої реальності згідно [169] є такі:

1. ARKit [170] – відносно новий (2017 рік) засіб від Apple. SDK Apple використовує апаратну програму iPhone/iPad, датчики руху, камеру для активації засобів доповненої реальності.

Підтримувані платформи: iOS 11/12.

ARKit підтримує розпізнавання двовимірних зображень (тригери доповненої реальності з плакатами, знаками, зображеннями) та двовимірне відстеження зображень, тобто можливість побудувати об'єкти доповненої реальності. SDK також дозволяє розробляти програми, які розпізнають просторові та 3D-об'єкти, а також розміщувати віртуальні об'єкти у реальному просторі. Поточна версія ARKit 2 надає можливість розробляти це багатокористувацькі ігри з доповненою реальністю. ARKit вільно поширюється для некомерційного використання.

2. ARCore [171] – новий (березень 2018 року) засіб від Google, своєрідна відповідь на ARKit.

Підтримувані платформи: Android 7.0 та вище, iOS 11 та вище. ARCore поставляється з трьома основними можливості об'єднання віртуальних і реальних світів:

– відстеження руху – для відстеження положення телефону щодо оточення;

- «розуміння навколишнього середовища» надає можливість визначати розмір та розташування горизонтальних поверхонь;
- оцінка освітленості надає можливість оцінити реальні умови освітлення.

ARCore вільно поширюється.

3. Vuforia [172] – одна з найпопулярніших платформ для розробки доповненої реальності. SDK реалізує наступні функціональні можливості: розпізнавання різних типів візуальних об'єктів (коробка, циліндр, площина), розпізнавання тексту і оточення, VuMark (комбінація зображення і QR-коду).

За допомогою Vuforia Object Scanner можна сканувати і створювати об'єкти-маркери. Процес розпізнавання може бути реалізований з використанням бази даних (локальне або хмарне сховище).

Можливість реєстрації зображень дозволяє розробникам розташовувати і орієнтувати віртуальні об'єкти, такі, як 3D-моделі і медіаконтент, у зв'язці з 36 реальними образами при перегляді через камери мобільних пристроїв. Віртуальний об'єкт орієнтується на реальному образі так, щоб точка зору спостерігача співвідносились до них однаковою чином для досягнення головного ефекту – відчуття, що віртуальний об'єкт є частиною реального світу.

Vuforia підтримує різні 2D- і 3D-типи маркерів, включаючи безмаркерні Image Target, тривимірні мішені Multi-Target, а також реперні маркери, які виділяють в сцені об'єкти для їх розпізнавання. Додаткові функції включають виявлення перешкод з використанням так званих «Віртуальних кнопок» («Virtual Buttons»), детектування цілей і можливість програмно створювати і реконфігурувати цілі в рамках саомодифікованого коду.

Підтримувані платформи: Android, iOS, UWP і Unity Editor.

Vuforia надає інтерфейси програмування мовами C++, Java, Objective-C і .NET через інтеграцію з ігровим рушієм Unity. Програми,

створені на платформі Vuforia, сумісні з широким спектром пристроїв, включаючи iPhone, iPad, смартфони та планшети на Android з версії 2.2 і процесором, починаючи з архітектур ARM v6.

Всі плагіни і функціональні можливості платформи безкоштовні, але включають водяні знаки Vuforia. Обмеження стосуються тільки кількості об'єктів VuMark і хмарного розпізнавання. Платні версії без водяних знаків коштують від 99 доларів на місяць.

4. Wikitude SDK [173] є основним продуктом однойменної компанії з 2008 року. SDK включає розпізнавання та відстеження зображень, рендеринг 3Dмоделей, відео-накладання, геоінформаційні послуги. У 2017 році Wikitude запустив технологію SLAM (Simultaneous Localization And Mapping – одночасна локалізація та картографування), яка дозволяє розпізнавати і відстежувати об'єкти, у тому числі без маркеру. Для доповненої реальності на основі місцезнаходження, положення об'єктів на екрані мобільного пристрою розраховується за допомогою геопозиції користувача (за допомогою GPS або Wi-Fi), напрямку, у якому користувач рухається (за допомогою компаса) та швидкості (за допомогою акселерометра).

Крос-платформенна SDK доступна для операційних систем Android, iOS та Windows, оптимізована також для кількох окулярів доповненої реальності (Epson Moverio, Vuzix M100, ODG R-7).

Підтримувані засоби розробки: Native API, JavaScript API, Unity3D, Xamarin, Titanium, Cordova.

Версія SDK для використання у некомерційних цілях накладає на зображення водяний знак – в усьому іншому вона еквівалентна комерційній версії вартістю 1990 євро.

5. Maxst [174] пропонує два різних інструменти для розпізнавання зображень та середовищ. Створення бази даних здійснюється онлайн через диспетчер відстеження (Tracking Manager). Для сканування 3D-об'єктів використовуються програми для Android і iOS. У редакторі Unity Maxst

працює лише з 32- розрядною версією.

Maxst вільно поширюється для некомерційного використання. Вільна версія відрізняється від платної тільки водяним знаком.

Підтримувані платформи: Android, iOS, Windows, Mac OS.

6. DeepAR [175] складається з DeepAR SDK та DeepAR Studio для 37 редагування контенту з 4 типами ефектів: жорсткі об'єкти, деформовані маски, маски морфинга і ефекти постобробки. Розробники можуть використовувати цей SDK для створення високоякісних лицьових лінз, аналогічних тим, які надають Snapchat та Facebook, а також для різних масок і ефектів для мобільних пристроїв. Цей SDK здатен швидко розпізнавати обличчя в режимі реального часу на основі моделей даних і методів машинного навчання (близько 70 лицьових точок на швидкості 60 кадрів в секунду).

Підтримувані платформи: ПК, Android, iOS, Windows, WebGL.

7. EasyAR [176], напевно, посідає друге місце після Vuforia SDK за функціональними можливостями. EasyAR підтримує розпізнавання зображень, розпізнавання 3D-об'єктів, сприйняття середовища, хмарне розпізнавання, «розумні окуляри», записи на екрані та ін. Оскільки бібліотека поширюється абсолютно вільно, для початку роботи з EasyAR, потрібно лише зареєструвати обліковий запис і створити ключ плагіна вашого пакету.

Підтримувані платформи: Android, iOS, UWP, Windows, Mac і Unity Editor.

Засоби розробки: C API, C++11 API, традиційний C++ API, Java API для Android, Swift API для iOS, Objective-C API для iOS.

8. ARToolKit [177] – найстаріший (з 1999 року) SDK для розробки засобів доповненої реальності, що реалізує відстеження позиції та орієнтації однієї або декількох камер, відстеження простих чорних квадратних маркерів, відстеження планарних зображень (маркерів у вигляді зображень), калібрування камери, оптичне стерео калібрування,

генерацію маркерів, плагіни для Unity і OpenSceneGraph.

Підтримувані платформи: Android, iOS, Linux, Windows, Mac OS, «розумні окуляри».

ARtoolKit поширюється вільно.

9. Xzing [178] надає SDK, зокрема, для відстеження обличч у реальному часі через плагін Unity. Xzing включає в себе три основних SDK: – Augmented Vision – для комп'ютерного зору, розпізнавання і 3D відстеження маркерів; – Augmented Face – для розпізнавання людського обличчя у відео; – Magic Face – для нежорсткого відстеження особи, рефакторінга від Augmented Face і поліпшення за допомогою інших функцій, таких як заміна особи, виявлення/відстеження особи та ін.

Підтримувані платформи: Android, iOS, Windows.

Усі SDK Xzing безкоштовні для некомерційного використання.

Серед інших вільно поширюваних засобів розробки доповненої реальності слід відзначити A-Frame, ApertusVR, ArUco, JavaCV, ATOMIC Authoring Tool, Goblin XNA, GRATF, mixare, PTAM, DroidAR, GeoAR, BeyondAR, Mangan, ARma, серед комерційних – 8th Wall, Laya SDK, Catchoom CraftAR AR SDK, Scangine [179].

Великий вибір засобів для проектування засобів доповненої реальності надає можливість вільно комбінувати їх, підключаючи у якості модулів до Unity – багатоплатформенного інструменту для розробки двох та тривимірних програм, що працює на операційних системах Windows, macOS X та Linux [180]. Створені за допомогою Unity програми працюють під управлінням Microsoft Windows, macOS, Linux, Xbox One, Wii, Wii U, PlayStation 3, PlayStation 4, PlayStation Vita, iOS, Android, WebGL, Tizen, Facebook, TvOS та Nintendo Switch.

Основні недоліки програмного забезпечення існуючих систем доповненої реальності наведені в табл. 1.3 [2].

Таблиця 1.3 – Недоліки програмного забезпечення існуючих систем доповненої реальності [2]

Категорія	Недоліки
Програмне забезпечення	– помилки розпізнавання об'єктів; – некоректне відображення даних, що накладаються; – некоректне розташування об'єктів у просторі; – несумісність з різними платформами, відсутність інтеграції з іншими програмами; – низька продуктивність; – помилки, недостатньо оперативне усунення помилок

1.3 Основні ризики впровадження і використання існуючих технологій доповненої реальності

При масовому впровадженні і використанні існуючих технологій доповненої реальності присутні такі основні ризики (табл. 1.4) [2].

Таблиця 1.4 – Ризики впровадження і використання технологій доповненої реальності [2]

Ризик	Причина виникнення	Наслідок
Недостатня інформованість	Відсутність достовірної інформації про результати впровадження і застосування технологій доповненої реальності в інших компаніях	Збільшення витрат на експлуатацію та навчання персоналу, збільшення терміну окупності, втрата інвестицій
Технологічні ризики	Пошкодження (несправність) пристроїв і комплектуючих, недосконалість пристроїв (незручність носіння, малий кут огляду), невідповідні умови зовнішнього середовища (наприклад, контрастність накладених зображень в «розумних» окулярах доповненої реальності залежить від освітленості приміщення), низька роздільна здатність картинки, проблеми розпізнавання об'єктів, некоректне відображення (проектування) об'єктів	Призупинення робочого процесу (затримки), втрата можливої вигоди, витрати на ремонт / закупівлю пристроїв, неможливість використовувати всі можливості технологій

Закінчення табл. 1.4

Неприйняття співробітниками	Відсутність розуміння принципів роботи пристроїв, низька інформованість, боязнь втратити роботу	Зростання грошових і часових витрат на навчання та інформування співробітників, перегляд політики управління і систем мотивації та залучення працівників, можливі скорочення штату (крайній випадок)
Недосконалість (відсутність) контенту	Відсутність необхідних програм або їх своєчасного оновлення, помилки	Призупинення робочого процесу (затримки), неможливість використання пристроїв доповненої реальності
Інформаційна безпека	Витік інформації, злом системи	Втрата даних, упущені вигоди, витрати на доопрацювання / покупку рішень в сфері безпеки
Травми і негативний вплив на здоров'я	Зіткнення з об'єктами реального світу, нудота і запаморочення, напруга очей, психоемоційний напруга	Зростання кількості вимог про компенсаційні виплати, неможливість тривалого використання пристроїв
Залежність від суміжних технологічних областей	Недостатня потужність сумісного використання обладнання (комп'ютери, консолі, смартфони, дисплеї)	Зростання витрат на матеріально-технічне забезпечення

Отже, основні недоліки існуючих технологій доповненої реальності, програмного забезпечення, наявність ризиків приводить до [2]:

– високої вартості впровадження і експлуатації рішень в сфері доповненої реальності. Як вже говорилося раніше, інтерактивні стенди, віртуальні кімнати пристрої, що одягаються, коштують досить дорого, як і програмне забезпечення та контент «під замовника», які задовольняють усім вимогам компанії. Більш бюджетні варіанти – шоломи для смартфонів, мобільні пристрої, програмні рішення – не можуть забезпечити потрібний ефект (не задовольняють потребам компанії), у зв'язку з чим їх впровадження не має сенсу. Виняток становлять маркетинг, продажі, освіта й журналістика, тобто галузі, що орієнтовані на

споживача (інформування, wow-ефект, візуалізація інформації). У таких галузях можливе застосування рішень з використанням технології доповненої реальності для мобільних пристроїв;

– недоліків спеціалізованого контенту й недосконалості пристроїв. Для ряду галузей (медицина, інженерія, фізика, ракето-, автомобіле- і авіабудування) або виконання вузькоспеціалізованих завдань (ремонт обладнання, навігація) необхідний контент, який відповідає цілому набору вимог, в тому числі науковій достовірності й високому ступеню точності. Його можуть запропонувати далеко не всі розробники. Крім того, є технологічні обмеження (продуктивна потужність пристроїв і платформ, роздільна здатність дисплея, кут обзору, механізми трекінгу і розпізнавання об'єктів, проблеми мобільності й зіткнення з об'єктами реального світу і т.і.), які не дозволяють реалізувати всі можливості доповненої реальності;

– неочевидної користі. У багатьох керівників і співробітників досвід взаємодії з доповненою реальністю зводиться до використання фільтрів в Інстаграмі, перегляду кліпів в форматі 360° на YouTube через смартфон, згадки про окуляри від Google, за допомогою яких можна перевіряти час і прогноз погоди, не дістаючи телефон. Технології розглядаються як інструмент просування, який здатний створити wow-ефект. Ігноруються багатогранні можливості їх впровадження в робочі, освітні та комунікаційні процеси. У засобах масової інформації, як і раніше, робиться акцент на застосуванні в ігровій та розважальній індустрії, в той час як конкретні приклади і результати використання в інших сферах не потрапляють у фокус уваги. У сукупності з відкладеним у часі ефектом це робить неочевидну користь впровадження;

– опору впровадженню технологій з боку керівництва або співробітників. Неприйняття змін керівництвом – камінь спотикання, не зрушивши який думати про впровадження будь-яких технологій годі й говорити. Зі співробітниками справа йде простіше, хоча потрібні витрати

на навчання, мотивування, залучення і певний час. Даний фактор багато в чому обумовлений суб'єктивною думкою, що складається завдяки сукупності всіх інших факторів, і в міру усунення недоліків технологій доповненої реальності проблема неприйняття вирішиться сама собою;

– конфіденційності даних і кібербезпеці. Питання актуальні в силу доступу до даних користувача. У глобальному сенсі проблема зведена до складності та високої вартості відповідного рішення.

Отже, наведений вище аналіз переваг та недоліків існуючих технологій доповненої реальності дозволяє побудувати наступну Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats (SWOT)-матрицю (табл. 1.5) [2]

Таблиця 1.5 – SWOT-аналіз застосування технологій доповненої реальності [2]

Сильні сторони: – різноманітність сфер застосування; – нативне управління; – іноваційність; – потужний 3D-інструмент; – взаємодія в режимі реального часу	Слабкі сторони: – технологічні обмеження і недосконалість програмного забезпечення; – недолік якісного контенту; – висока вартість; – відсутність кваліфікованих кадрів; – негативний вплив на здоров'я
Можливості: – високий потенціал ринку, наявність вільних ніш; – готовність середовища (компаній) до впровадження технології; – зростання інтересу інвесторів; - розвиненість суміжних ринків	Загрози: – конкурентні технології (інтернет речей, штучний інтелект, робототехніка); – недолік відомостей про досвідчені результати використання; – непередбачуваність зовнішнього середовища; – молодий ринок

Таким чином, встановлено, що сучасні системи обробки і передачі візуальної інформації, частинним випадком яких є маркерні системи доповненої реальності, базуються на візуальних інформаційних структурах (BIC).

Для маркерних систем доповненої реальності, у якості BIC в даний час виступають лише візуальні маркери. На рис. 1.2 зображена загальна схема застосування BIC.

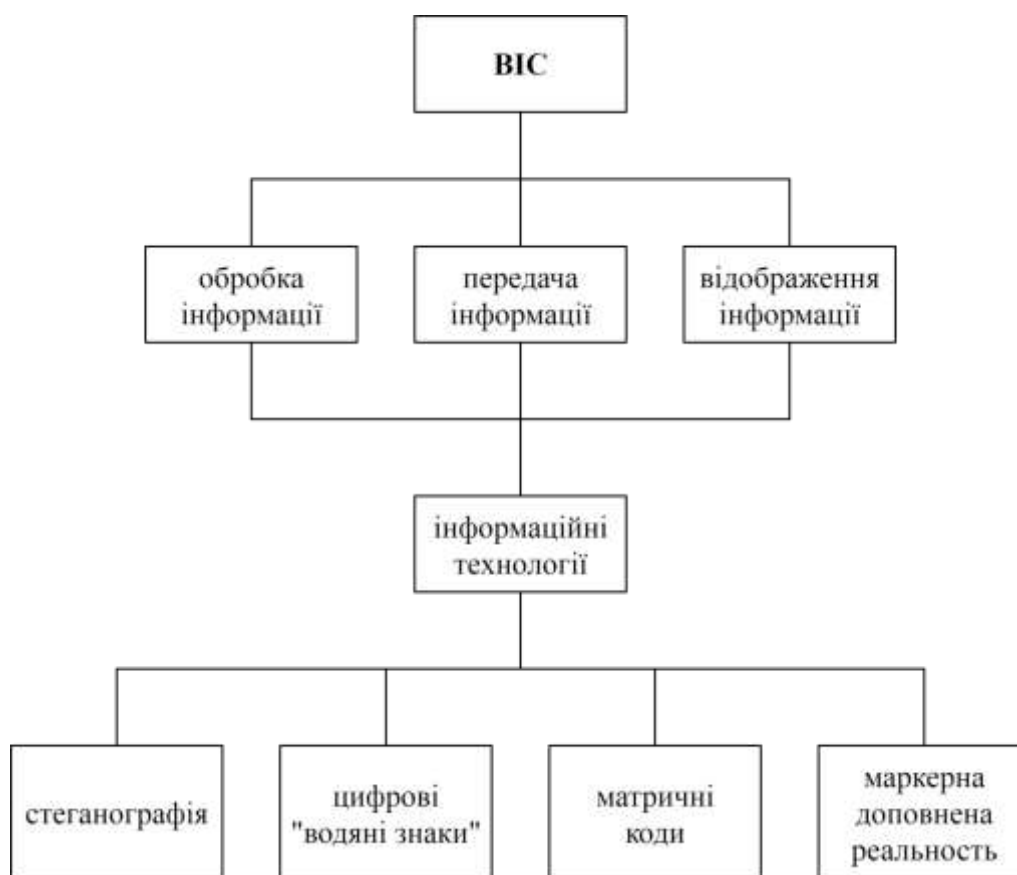


Рисунок 1.2 – Загальна схема застосування візуальних інформаційних структур

Як вже було вказано вище, найбільш перспективним є використання систем доповненої реальності, що базуються на мобільних платформах з використанням клієнт-серверної архітектури.

Клієнтська частина реалізовується на платформах Android/iOS з використанням бібліотек комп'ютерного зору (наприклад, OpenCV) і/або спеціалізованого програмного забезпечення підтримки систем доповненої реальності (див. п.1.2). Серверна частина системи розробляється на мові програмування PHP із використанням контейнеру web-застосувань Apache, в якості системи управління базами даних (СУБД) пропонується використовувати нереляційну (No-SQL) СУБД MongoDB [140].

Мінімальні вимоги до використовуваних мобільних пристроїв наведено нижче (табл. 1.6) [141].

Таблиця 1.6 – Вимоги до мобільних пристроїв, що рекомендуються для використання технологій доповненої реальності

PLATFORM	OS	Android 9 or higher	iOS 13 or higher
	Chipset	Exynos 9820 (8 nm) - EMEA/LATAM Qualcomm SM8150 Snapdragon 855 (7 nm) - USA/China	Apple A13 Bionic (7 nm+)
	CPU	Octa-core (2x2.73 GHz Mongoose M4 & 2x2.31 GHz Cortex-A75 & 4x1.95 GHz Cortex-A55) - EMEA/LATAM Octa-core (1x2.84 GHz Kryo 485 & 3x2.42 GHz Kryo 485 & 4x1.78 GHz Kryo 485) - USA/China	Hexa-core (2x2.65 GHz Lightning + 4x1.8 GHz Thunder)
	GPU	Mali-G76 MP12 - EMEA/LATAM Adreno 640 - USA/China	Apple GPU (4-core graphics)
DISPLAY	Type	Dynamic AMOLED capacitive touchscreen, 16M colors	Liquid Retina IPS LCD capacitive touchscreen, 16M colors
	Size	6.4 inches, 103.8 cm ² (~88.9% screen-to-body ratio)	6.1 inches, 90.3 cm ² (~79.0% screen-to-body ratio)
	Resolution	1440 x 3040 pixels, 19:9 ratio (~522 ppi density)	828 x 1792 pixels, 19.5:9 ratio (~326 ppi density)
	Protection	Corning Gorilla Glass 6	Scratch-resistant glass, oleophobic coating
		HDR10+ Always-on display	625 nits max brightness (advertised) True-tone Wide color gamut 120Hz touch-sensing

MEMORY	Card slot	microSDXC (uses shared SIM slot) - dual SIM model only	No
	Internal	128GB 8GB RAM, 512GB 8GB RAM, 1TB 12GB RAM	64GB 4GB RAM, 128GB 4GB RAM, 256GB 4GB RAM
		UFS 2.1	NVMe
MAIN CAMERA	Modules	12 MP, f/1.5-2.4, 26mm (wide), 1/2.55", 1.4µm, Dual Pixel PDAF, OIS 12 MP, f/2.4, 52mm (telephoto), 1/3.6", 1.0µm, AF, OIS, 2x optical zoom 16 MP, f/2.2, 12mm (ultrawide), 1/3.1", 1.0µm, Super Steady video	12 MP, f/1.8, 26mm (wide), 1/2.55", 1.4µm, dual pixel PDAF, OIS 12 MP, f/2.4, 13mm (ultrawide), 1/3.6"
	Features	LED flash, auto-HDR, panorama	Quad-LED dual-tone flash, HDR (photo/panorama)
	Video	4K@60fps (no EIS), 4K@30fps, 1080p@30/60/240fps, 720p@960fps, HDR10+, stereo sound rec., gyro-EIS & OIS	4K@24/30/60fps, 1080p@30/60/120/240fps, HDR, stereo sound rec.

1.4 Аналіз відомих моделей, методів та інформаційних технологій обробки зображень в системах доповненої реальності

1.4.1 Типи маркерів доповненої реальності

З проведеного вище аналізу систем доповненої реальності витікає, що маркерні і безмаркерні системи доповненої реальності представлені приблизно однаково, при цьому безмаркерні системи найчастіше використовуються в ігрових та туристичних застосуваннях. В безмаркерних системах в якості маркера використовується

місцезнаходження користувача (його географічні координати), що отримується за допомогою GPS. Додаткова інформація найчастіше завантажується із віддаленого сервера, куди передаються координати і орієнтація камери смартфона. Це природнім чином прив'язує систему до одного місця і робить її недоступною для використання до рухомих об'єктів, що звужує галузі її застосування [27]. Для отримання додаткової інформації про довільні об'єкти у переважній більшості випадків будуть використовуватися маркерні системи доповненої реальності, які і будуть розглядатися у даній роботі.

Основні типи візуальних маркерів доповненої реальності (AR-маркерів) [27]:

- шаблонні маркери (template markers) – чорно-білі маркери, які мають просте зображення всередині чорної рамки (рис.1.3а);

- 2D штрих-кодові маркери (barcode markers) – маркери, що складаються з чорно-білих клітинок, які по-бітово кодують дані, і, іноді, рамки або області синхронізації. Найчастіше в якості штрих-кодових AR-маркерів використовують QR-коди (рис.1.3б);

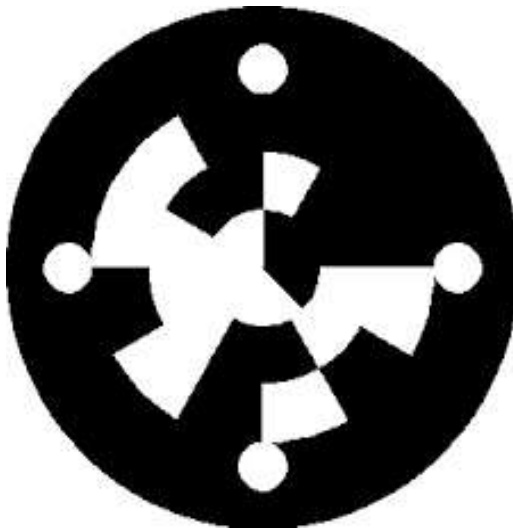
- колові маркери (circular markers) – аналогічно до штрих-кодових маркерів, тільки біти кодуються не прямокутними клітинками, а чорно-білими круговими секторами (рис.1.3в);

- маркери-зображення (image markers) – в якості маркерів використовуються звичайні зображення, як кольорові, так і зображення в градаціях сірого (рис.1.3г). Вони можуть містити рамку або інші орієнтири для виявлення та знаходження положення. Такі маркери-зображення зазвичай ідентифікуються за допомогою пошуку по шаблону або по особливостях зображення.



а)

б)



в)



г)

Рисунок 1.3 – Основні типи AR-маркерів [27]: а) шаблонні маркери; б) штрих-кодові маркери; в) колові маркери; г) маркери-зображення

Шаблонні, штрих-кодові і колові маркери найчастіше є бінарними зображеннями (скорочено будемо називати їх *бінарними маркерами*), маркери-зображення – зображеннями у градаціях сірого або кольоровими (скорочено – *кольорові маркери*).

1.4.2 Типова методика для роботи з шаблонними маркерами

Теоретично AR-маркером може бути будь-яка фігура (об'єкт), але на практиці ми обмежені роздільною здатністю камери, особливостями передачі кольору, освітлення і обчислювальною потужністю обладнання. Тому для роботи у реальному часі вибирається зазвичай чорно-білий маркер простої форми. Як правило це прямокутник або квадрат з вписаним всередину образом-ідентифікатором. У статті [28] описані основні типи шаблонних маркерів і проведено порівняння продуктивності розпізнавання різних реалізацій маркерів (рис.1.4).

Типова методика обробки шаблонного маркера складається з таких кроків (рис.1.5–1.6) [28], [181]:

- перехід в градації сірого;
- визначення порогу і бінаризація зображення;
- знаходження замкнутих областей;
- виділення контурів;
- знаходження кутів маркера;
- знаходження параметрів проективного перетворення і перетворення координат.

1.4.3 Типова методика для роботи з штрих-кодovими маркерами

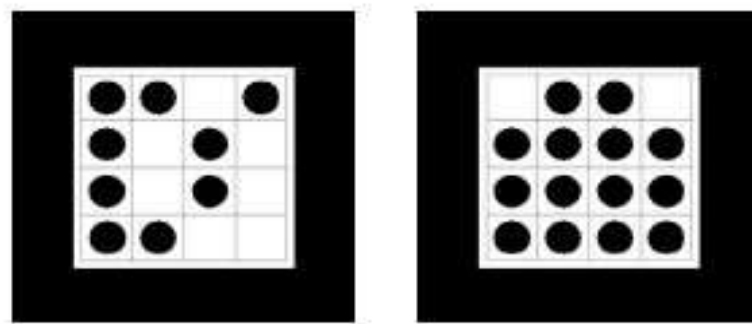
Нижче, на прикладі декодування QR-коду покажемо типову методику роботи з штрих-кодovими маркерами. QR-код, використаний у цьому прикладі, кодується у форматі version2, що має 25x25 клітинок, а рівень корекції помилок – "L" (рис. 1.7). Виклад матеріалу базується на результатах роботи [29].



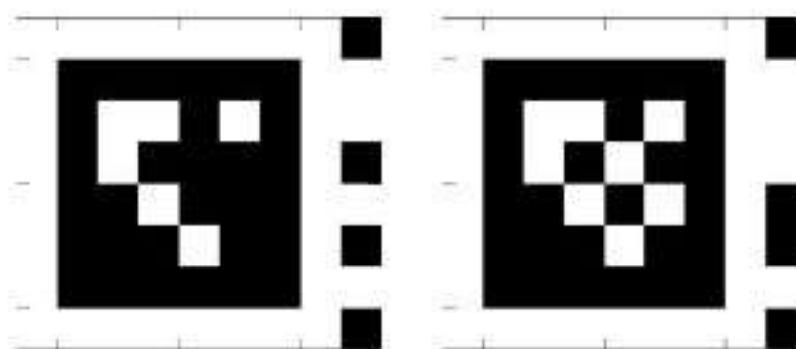
а)



б)

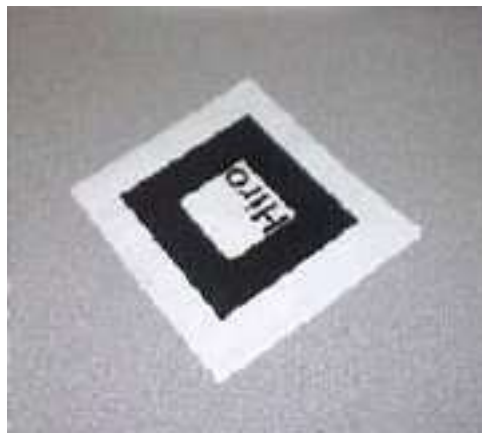


в)

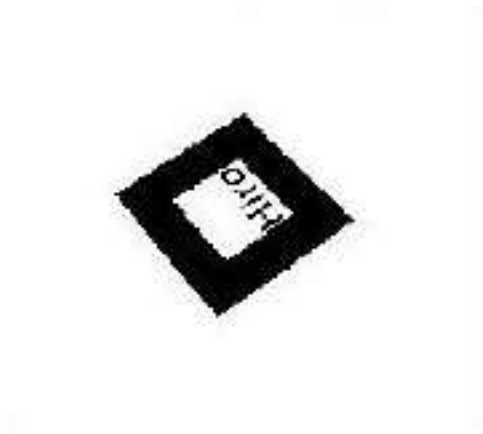


г)

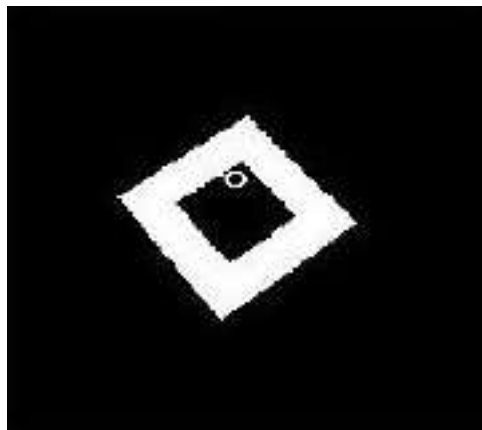
Рисунок 1.4 – Основні типи шаблонних маркерів [28]: а) ArToolKit (ATK); б) Institut Graphische Datenverarbeitung (IGD); в) Siemens Corporate Research (SCR); г) Hoffman marker system (HOM)



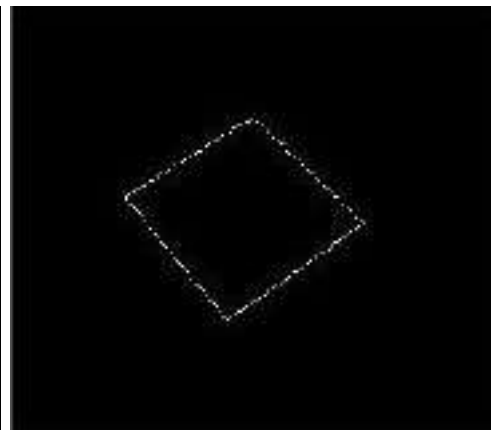
а)



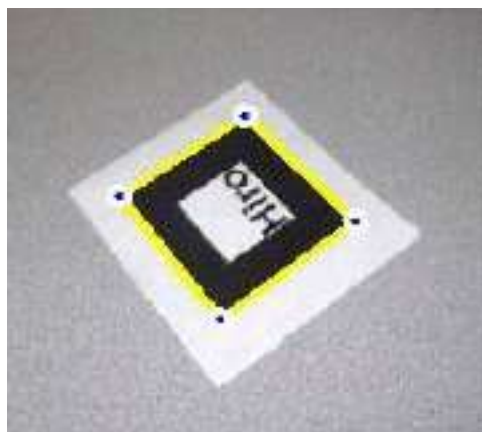
б)



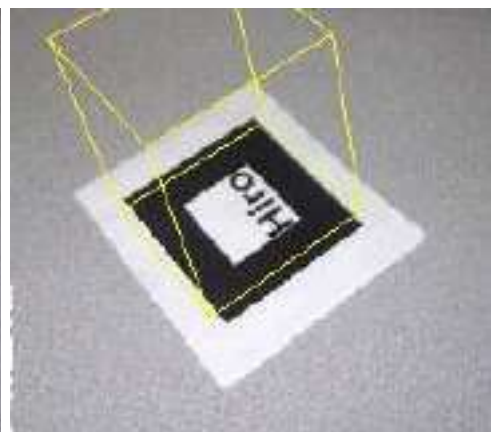
в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.5 – Основні етапи обробки шаблонного маркера [181]: а) вихідне зображення; б) бінаризоване зображення; в) зв'язні області; г) контури; д) контури і знайдені кути; е) 3-вимірна фігура (куб), що побудована на маркері із врахуванням проєктивних перетворень

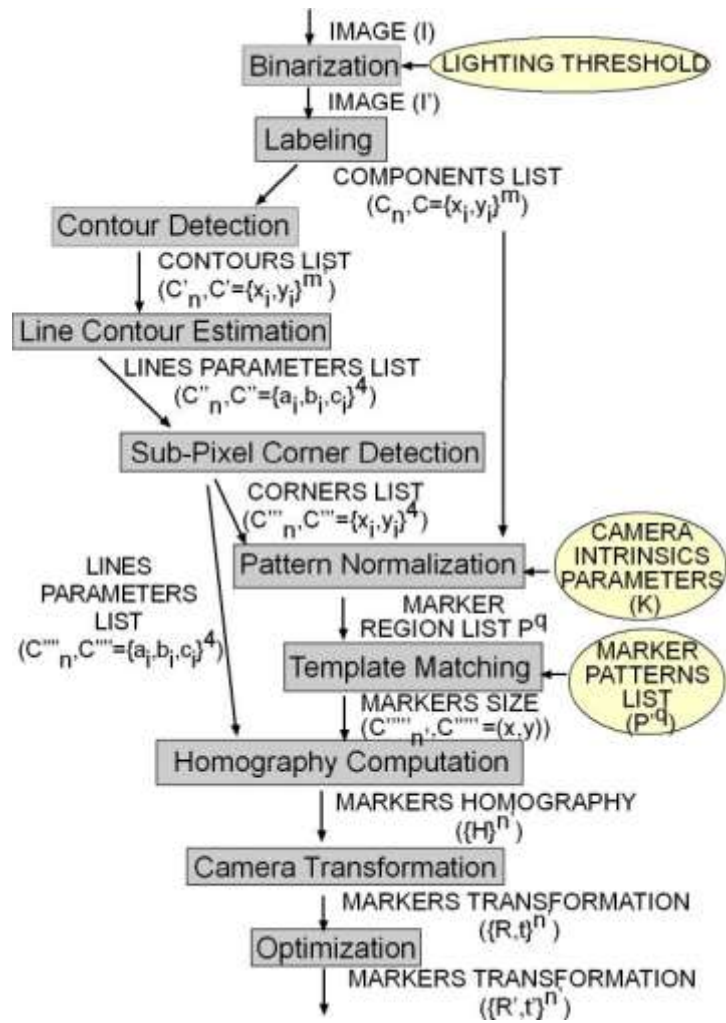


Рисунок 1.6 – Схема типової методики обробки шаблонних маркерів [181]



Рисунок 1.7 – Типовий QR-код, світло-сірим кольором позначені синхронізаційні маркери

На рис. 1.8 зображено вихідне кольорове зображення QR-коду, частина якого (близько 5-10%) закрита завадою, що суттєво – завада не повинна закривати синхронізаційні маркери (пор. рис. 1.7).



Рисунок 1.8 – Вихідне кольорове зображення QR-коду [29]

На рис. 1.9 зображено результат бінаризації, для чого вихідне кольорове зображення перетворюється в зображення у градаціях сірого (у даному прикладі використовується стандартний алгоритм [182]) і бінаризується методом Отсу [183]–[184].

Результат виглядає прийнятним, оскільки фон є дуже простим, тим не менш в нижній частині зображення бачимо артефакт бінаризації – лінію.



Рисунок 1.9 – Бінаризоване зображення QR-коду [29]

Наступний рисунок (рис. 1.10) показує результат знаходження синхронізаційних маркерів, для чого використовується апріорна інформація про їх очікуваний розмір і розташування, а також топологічна ознака – число Ейлера повинно бути рівно 0. Число Ейлера у даному випадку (для бінарних зображень) рахується як кількість об'єктів у регіоні мінус кількість отворів у цих об'єктах [184].

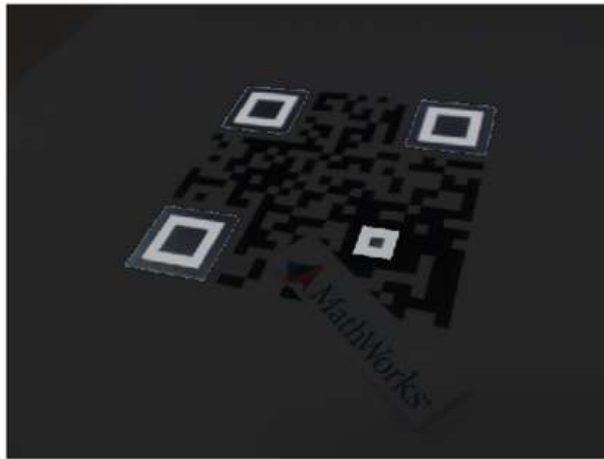


Рисунок 1.10 – Знаходження синхронізаційних маркерів QR-коду [29]

Далі (рис. 1.11) проводиться розмітка знайдених маркерів – за початок обходу береться найменший маркер (використовується апріорна інформація про його розмір), знаходяться координати їх центрів.

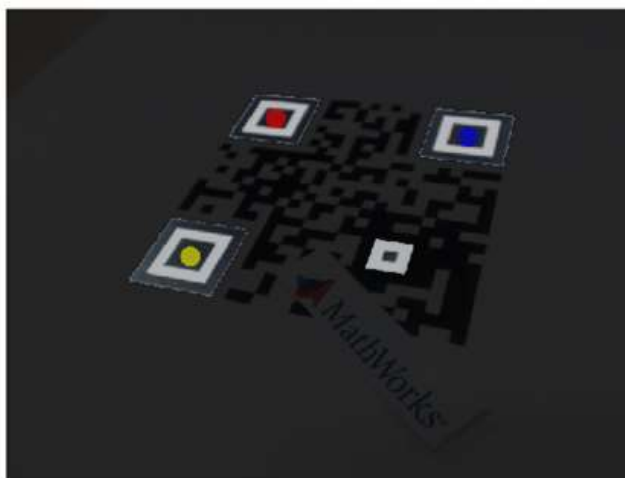


Рисунок 1.11 – Розмітка синхронізаційних маркерів QR-коду [29]

Дані координати використовуються для знаходження параметрів проєктивного перетворення [42] і проводиться трансформація зображення (рис. 1.12).

Якщо необхідна тільки інформація про розташування камери, то, в принципі, на цьому етапі ми можемо зупинитися і не декодувати QR-код.

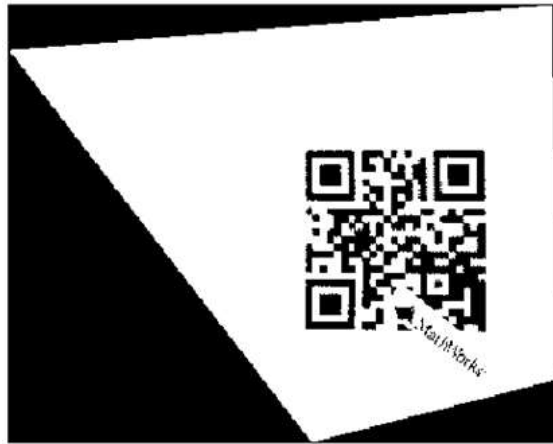


Рисунок 1.12 – Результат геометричного перетворення [29]

Для декодування QR-коду необхідно зробити наступне:

1. Отримане зображення очищається від шумів методами математичної морфології [185]–[186] і вирізається вирівняне зображення QR-коду (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Вирівняне і очищене зображення QR-коду [29]

2. В отриманому зображенні визначається його структура (рис. 1.14),

знаходиться область даних і проводиться їх декодування (рис. 1.15).

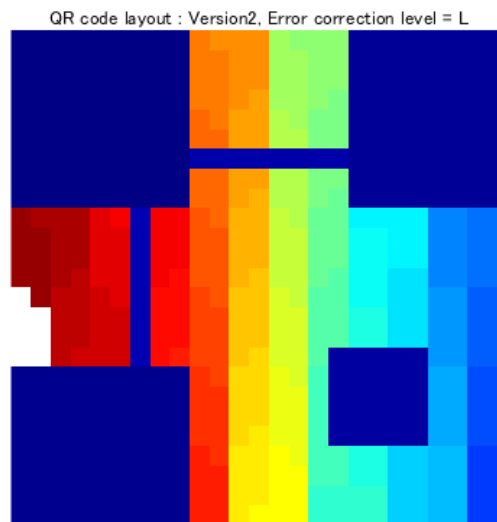


Рисунок 1.14 – Розмічена структура QR-коду [29]



a)



б)

Рисунок 1.15 – Результат декодування QR-коду [29]: а) без використання кодів Ріда-Соломона; б) з використанням кодів Ріда-Соломона

Як видно (рис. 1.15а), наявність завади не дає можливості правильно декодувати QR-код, якщо тільки ми не застосуємо код корекції помилок (у даному випадку – це коди Ріда-Соломона [187], рис. 1.15б).

1.4.4 Типова методика для роботи з маркерами-зображеннями

Як було вказано вище (див. пп. 1.3.2–1.3.3), спеціально сконструйовані маркери вимагають спеціально сконструйованих алгоритмів, в яких інкорпорується апріорна інформація, що необхідна для їх роботи, що в свою чергу суттєво обмежує універсальність алгоритмів.

Маркери-зображення у цьому відношенні займають виділену позицію – оскільки будь-яке зображення ми можемо обрати маркером (насправді, як ми побачимо далі, певні обмеження, звичайно існують), то в загальному алгоритм буде уніфікованим.

Очевидним недоліком цього типу маркерів є неможливість закодувати в ньому додаткове повідомлення, що обмежує галузь їх застосування. Також, як побачимо далі, методи їх обробки мають вищу обчислювальну складність.

Дана методика базується на знаходженні особливих точок зображення, побудови їх дескрипторів (наприклад, SIFT [187], SURF [188], ORB [189]) і знаходженні відповідності між дескрипторами зображення-маркера та його дескрипторами зображення сцени, де він шукається [30].

На першому етапі знаходяться особливі точки, для кожної з них розраховується дескриптор, що представляє собою вектор чисел (рис.1.16–1.17). Більшість алгоритмів знаходження особливих точок (SIFT, SURF, тощо) будують дескриптори, що складаються з дійсних чисел, частина (наприклад, ORB) – бінарні дескриптори.

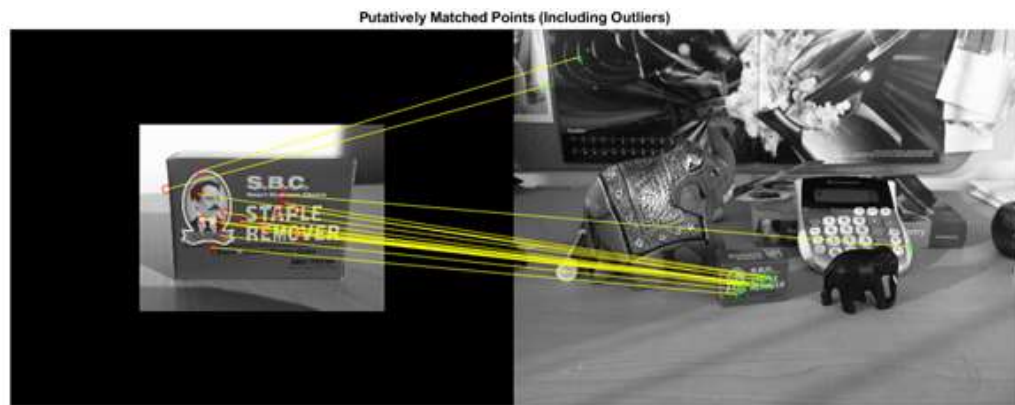


Рисунок 1.16 – Зображення коробки, що взято в якості маркера, візуалізовано 100 найкращих точок з їх SIFT-дескрипторами [30]

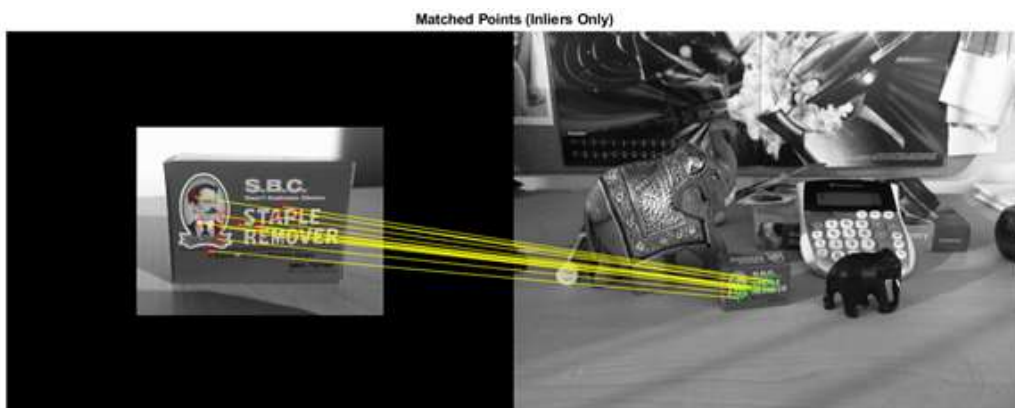
Між знайденими дескрипторами шукається найкраща відповідність шляхом мінімізації відстані між ними (рис.1.18а). Для дійсних дескрипторів відстані шукаються в L_1 або L_2 -метриці [190], для бінарних дескрипторів – в метриці Хемінга [191].



Рисунок 1.17 – Зображення сцени, де шукається маркер, візуалізовано 300 найкращих точок з їх SIFT-дескрипторами [30]



а)



б)

Рисунок 1.18 – Знаходження і візуалізація найкращої відповідності між дескрипторами [30]: а) мінімізація евклідової відстані між дескрипторами; б) врахування, що відповідні точки повинні бути зв'язані перетворенням гомографії

Для знаходження точнішої відповідності між точками маркера і сцени застосовується алгоритм RANSAC, який враховує, що знайдені точки повинні задовольняти моделі проекційного перетворення (рис.1.18б) [38]–[40], [42].

Результат знаходження маркера показано на рис. 1.19, де зображена геометрична трансформація прямокутника, з сторонами, що рівні довжині і ширині зображення-маркера.



Рисунок 1.19 – Зображення сцени, де візуалізовано трансформовану область знайденого маркера [30]

Зрозуміло, що даний підхід буде добре працювати, якщо буде знайдено достатню кількість особливих точок і ці точки можна буде однозначно ідентифікувати у просторі обраних дескрипторів. Це можливо тоді, коли зображення має достатню кількість перепадів, з достатньо різними околами особливих точок. Тобто, такий метод найкраще працюватиме для кольорових зображень і зображень у градаціях сірого [80], [104].

Слід також зауважити, що рівень шумів повинен не бути занадто високим, оскільки це також впливає на точність.

Обчислювальна складність цих методів є вищою ніж для попередніх.

1.4.5 Переваги і недоліки відомих типів візуальних маркерів доповненої реальності

Аналізуючи відомі типи AR-маркерів, можна зробити висновок, що кожен з них має свої переваги і недоліки:

1) всі вони дозволяють визначати положення камери, але для цього використовуються різні методи:

- знаходження кутів зображення (шаблонні маркери);
- знаходження спеціальних областей прив'язки (штрих-кодові і колові маркери);
- знаходження особливих точок зображення і їх дескрипторів (маркери-зображення);

2) частина з них (штрих-кодові і колові маркери) містить додаткову інформацію (повідомлення), наприклад, посилання на інформаційні ресурси, що є однозначною перевагою, оскільки дозволяє розширити область застосування.

Знаходження кутів чи спеціальних областей прив'язки – швидкий метод, але вимагає однозначного детектування всіх 4 точок, знаходження особливих точок зображення і побудова їх дескрипторів вимагає більше обчислювальних ресурсів, але є набагато стійкішим, частина зображення може бути закрита завадою, тим не менш цей метод дозволяє правильно визначати положення камери.

1.5 Огляд голографічного принципу представлення даних

Як було вказано вище, важливою вимогою до маркерів доповненої реальності є вимога робастності – при втраті великої частини (до 50%) інформації про маркер ми, тим не менш, повинні мати змогу а) точно декодувати повідомлення, що міститься у маркері; б) визначити параметри проєктивного перетворення, що дасть нам можливість знайти орієнтацію камери. Як було вказано там же, жоден існуючий тип AR-маркера цій вимозі не задовільняє.

Зауважимо, що ми не накладаємо ніяких обмежень на розташування

закритих ділянок маркера окрім того, що видима частина маркера повинна бути однозв'язною областю, між будь-якими двома точками зображення маркера повинен існувати шлях, що повністю лежить в зображення видимої області маркера (з мінімальним переміщенням на один піксель у L_1 -метриці).

Напрямок вирішення цієї проблеми дає т. зв. голографічна метафора – розподілена форма представлення цифрових зображень, яка є стійкою по відношенню до завад [43]–[48].

Як вказував А. В. Марковський (А. В. Марковский), у наслідування голографічного принципу пропонується метод розподіленого кодування цифрового зображення, який навіть при втраті значної частини його поверхні дозволяє ідентифікувати його після декодування і відновлення. Оскільки таке кодування лише наслідує властивостям голографії, пропонується називати його квазіголографічним (псевдолографічним) або, для стислості викладу, просто голографічним [45].

Д. А. Уривська (Д. А. Урывская) у своїй дисертаційній роботі [48], що присвячена розробці і застосуванню псевдоголографічних розгорток цифрових зображень, наводить огляд і класифікацію існуючих методів.

Ідея регулярного методу полягає в тому, що двовимірний масив відліків зображення розгортається в одновимірну послідовність за певним правилом.

Зокрема, А. М. Брукштейном (Bruckstein, A. M) [43]–[44] запропоновано т. зв. «голографічне» перетворення, в основі якого лежить специфічний метод одновимірної нумерації відліків зображення. Ідея запропонованого перетворення досить прозора: цифрове зображення розгортається в одновимірну послідовність так, щоб «далекі» точки зображення мали «близькі» номери в одновимірній послідовності.

При цьому кожній точці з координатами (m,n) на зображенні ставиться у відповідність деяке число k , яке і визначає номер даної точки у псевдоголографічній послідовності. При порядковому скануванні і запису

отриманої послідовності формується "псевдоголограмма".

Таке перетворення дозволяє за довільним зв'язного фрагменту отриманої послідовності реконструювати зменшену копію вихідного зображення (або, застосовуючи інтерполяційні методи, реконструювати повномасштабну апроксимацію вихідного зображення). Тобто фрагмент одновимірної послідовності подібно аналогової голограмі, містить достатньо інформації про все зображенні в цілому.

Подібне "голографічне" представлення зображень є стійким по відношенню до пошкоджень даних, оскільки навіть при втраті частини інформації, зображення можна відновити з певною точністю, яка залежить від розміру втрат [48].

У 1998 р. А. Брукштейн запропонував псевдовипадковий метод, який є модифікацію "регулярного" методу, що передбачає самостійну нумерацію відліків для кожного рівня [44].

О. П. Кузнецов, А. В. Марковський, у 2002 році запропонували для перевпорядкування відліків т. зв. «розсіюючий» метод, який полягає в інвертуванні порядку розрядів номера точки зображення, яке розгорнуто в одновимірну послідовність по рядках/стовпцях, за певним правилом. Автори методу обмежилися розглядом розкладання координат відліків у двійковій системі числення [46].

Р. Довгард (R. Dovgard) у 2004 році описав метод побітової інверсії, що передбачає перетворення цифрового зображення за рахунок інвертування представлених у двійковій системі координат [47].

В. В. Колесов, М. М. Залогін та Г. М. Воронцов запропонували у 2002 році т. зв. "стохастичний" метод, який полягає в тому, що відліки растрової матриці зображення перевпорядковують випадковим чином, в результаті чого виходить шумоподібне зображення. При цьому двовимірний генератор випадкових чисел реалізується у такий спосіб: спочатку формується деяка кодуєча матриця P_1 , за допомогою якої псевдовипадково переставляються елементи всередині кожного рядка

зображення, потім зображення повертається на 90° і повторно проводиться псевдовипадкова перестановка відліків усередині кожного рядка за допомогою іншої кодувальної матриці P_2 [192].

А. В. Марковський у роботі [45] наводить основні властивості голографічного кодування:

1. При кодуванні зображення інформація про його відліки деяким чином розсіюється по всій площі голограми так, що в околі кожної точки голограми виявляється достатньо інформації про все зображення в цілому.

2. Таке кодування володіє також властивістю "глобальності", при якому зміна інформації в будь-якій точці зображення викликає перебудову всієї голограми або більшої її частини. Ці дві властивості виправдовують застосування в даному контексті терміна "голографія", що розуміється як "запис в цілому".

3. Голограма може бути здатна до "пошкодження", що полягає в вирізанні з неї деякої суцільної області.

4. При декодуванні зображення відновлюється з голограми. При цьому інформація, розсіяна по точкам, що збереглися після урізання голограми, відновлюється у своїх початкових місцях. Після цього зображення залишається більш-менш упізнаваним в залежності від площі неушкодженої частини. При відсутності пошкодження голограми зображення відновлюється повністю [45].

Також він вказував, що важливе питання полягає в співвідношенні площ зображення і його голограми. Це співвідношення характеризує надлишковість кодування зображення [45].

Основною для подальшого розгляду є властивість 1, з якої випливають властивості 3–4, а властивість 2 у даному контексті є неважливою.

Таким чином, для забезпечення робастності пропонується використовувати псевдовипадкову перестановку пікселів зображення, а для забезпечення надлишковості дублювати піксели вихідного зображення.

У наступному розділі ці питання будуть розглянуті докладніше.

Зауважимо, що характер генератора псевдовипадкових чисел, який використовується для побудови перестановок для нас неважливий і надалі просто будемо вважати, що така перестановка існує і, що суттєво, робить сусідні пікселі перматованого зображення некорельованими. Як свідчать результати комп'ютерних експериментів (див. наступні розділи), це твердження повністю стверджується для генераторів випадкових чисел, що реалізовані у сучасних мовах програмування, таких як, наприклад, MATLAB.

1.6 Огляд метаевристичних методів вирішення оптимізаційних задач

1.6.1 Загальні метаевристичні методи

Як було вказано у роботі [73], основна частина оптимізаційних задач, що виникають при обробці зображень, відноситься до класу NP-складних. При вирішенні таких задач ефективним є використання метаевристичних методів, перевагами яких є можливість вирішення складних задач без уточнення пошукової області [193]–[194].

Метаевристичні методи за побудовою реалізують прямий стохастичний пошук допустимих субоптимальних рішень задачі, при цьому алгоритм виконується, доки не буде виконана умова зупинки (наприклад, зміна цільової функції стає меншою за заданий поріг або досягнута задана кількість ітерацій). Як вказано у [194], процедура, що знаходить допустиме рішення, називається евристикою.

Основні властивості метаевристичних методів оптимізації [73]–[75], [87], [89], [194]:

- ефективне керування процесом пошуку рішення;
- ефективне дослідження пошукової області (для знаходження

оптимальних чи субоптимальних рішень);

- використання простих процедур локального пошуку;
- недетермінованість методів;
- уникнення локальних мінімумів в обмеженій пошуковій області;
- універсальність методів;
- можливість використання додаткової апріорної інформації для

знаходження оптимального рішення.

У загальному, процес роботи метаевристичних алгоритмів складається з таких кроків [194]–[196].

1. Початкова ініціалізація ($x = x_0$).
2. Визначення області рішення (кожному рішенню $x \in X$ відповідають множина околів та переходи $N(x) = \{N_1, N_2, \dots, N_q\}$).
3. У випадку багатозв'язності (тобто, при наявності більше, ніж одного околу) визначається критерій вибору.
4. Визначення і відбір кандидатів на оптимальне рішення. При цьому список кандидатів $C(x) \subseteq N(x)$ може будуватися на кожній ітерації або поновлюватися від ітерації до ітерації. Критерій відбору визначає, як саме обрані рішення включаються у список кандидатів.
5. Критерій прийняття. Можливі переходи оцінюються за допомогою деякої функції $g(x, y)$, що залежить від цільової функції задачі, штрафної функції, що вводиться для врахування обмежень та інше.
6. Критерії зупинки: до яких належать кількість ітерацій, загальний час роботи, величина зміни цільової функції.

До метаевристичних методів оптимізації відносять чотири основні класи: еволюційні методи; ройові методи; симуляційні методи; мультистартові методи [197]. Основними з них є еволюційні та ройові методи.

Пр цьому до еволюційних методів оптимізації на даний час відносять: генетичні алгоритми; методи, що імітують імунний відгук організмів; методи розсіювання; метод динамічних сіток; методи

диференційної еволюції та інші [84], [87], [89], [197]. В свою чергу, до ройових методів оптимізації відносять: метод рою частинок; мурашині алгоритми; алгоритми штучної бджолоїної колонії; алгоритми імітації поведінки у зграї риб чи птахів та інші [197]. Найбільш розповсюдженими серед еволюційних методів оптимізації є генетичні алгоритми [53], [197]–[198].

1.6.2 Ройові алгоритми

Ройові методи оптимізації децентралізовано використовують колективні переміщення агентів однієї популяції, без процедур відбору, знищення старих та породження нових агентів [199]. У роботі [198] запропоновано спосіб визначення належності оптимізаційного методу до ройових методів, де вказано, що у виразах, які задають поведінку агентів рою, повинно бути враховано непрямий обмін інформацією між агентами. Таким чином, може бути знайдено підходяще рішення для методу рою частинок чи оптимальний шлях на зваженому графі для мурашиного методу [199]–[201].

Метод рою частинок було запропоновано як імітаційну модель поведінки біологічних систем (наприклад, зграї птахів чи риб) [53], [56]–[58]. Ідея методу полягає в тому, що кожна частинка рою в кожен момент часу задається координатами в просторі рішень, вектором швидкостей по кожній координатній осі, окремо зберігаються координати точки частинки, в якій значення цільової функції є найкращими, додатково зберігається також найкраще рішення серед всіх частинок рою. Кожна частинка рухається в напрямку найкращого рішення. При цьому частинка має масу і рух відбувається інерційно, а вектор швидкостей задається з певним рівнем випадковості. Рух частинок до точки глобального оптимуму синхронізує

рій, інерція та інформація про знайдені локальні оптимуми дозволяє уникати локальних екстремумів.

Основний алгоритм рою частинок складається з таких етапів [53], [56]–[58], [92], [97]–[99], [102], [104], [202]–[203]:

1. Початкова ініціалізація положень та швидкостей частинок, за рівномірним випадковим розподілом.

2. Розрахунок значення цільової функції та знаходження найкращого положення частинки.

3. Стохастичне переміщення частинок.

4. Перевірка умови зупинки (досягнення максимальної кількості ітерацій, знаходження оптимального рішення, відсутність зміни значення цільової функції).

1.6.3 Генетичні алгоритми

Генетичні алгоритми складають окремий клас еволюційних обчислень, які засновані на математичному моделюванні процесів біологічної еволюції [53], [59]–[60]. Генетичні алгоритми використовуються для вирішення оптимізаційних задач комбінаторики, теорії ігор, обробки і розпізнавання зображень [53], [60], [84], [101].

Пошук рішення при використанні генетичних алгоритмів проходить на підмножині точок простору пошуку, шляхом створенням вектора потенційних рішень, який іншими словами називається популяцією. Популяція покращується за допомогою так званих генетичних операторів, що моделюють мутації, наслідування та природний відбір. Наслідування відбувається за рахунок того, що нові точки рішення (хромосоми) будуються з хромосом попереднього покоління і, відповідно, мають спільні з ними частини (гени, див. рис. 1.20). Для кожного нового

покоління середнє значення цільової функції популяції та найкраще значення цільової функції зміщуються до глобального оптимуму [59]–[60], [204].

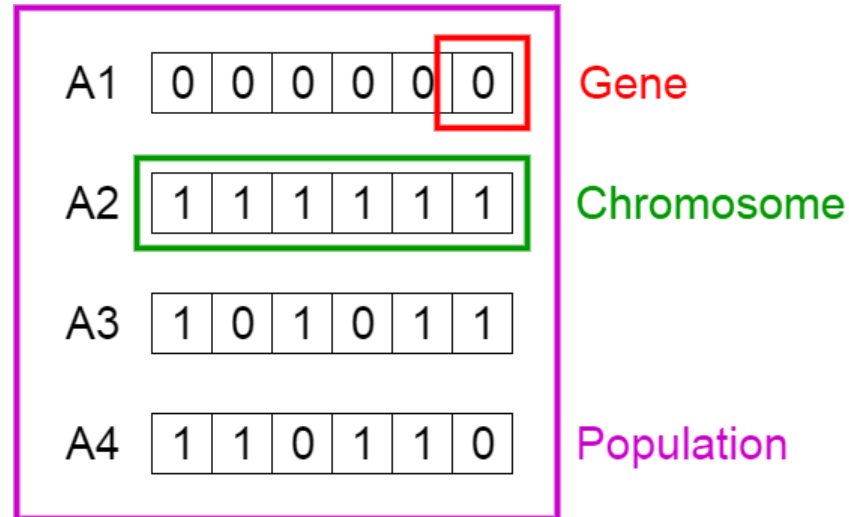


Рисунок 1.20 – Ілюстрація основних понять генетичного алгоритму: ген, хромосома, популяція [204]

Основні кроки генетичного алгоритму можна представити таким чином [77]–[80], [93], [193], [204]–[205]:

1. Початкова ініціалізація (початкова популяція), ініціалізується лічильник поколінь.
2. Збільшується лічильник поколінь, формується проміжне батьківське покоління.
3. Формується наступне покоління. Випадковим чином з батьківської популяції обирається пара, для якої із заданою ймовірністю проводиться операція перехресного схрещування (рис. 1.21) та обирається один з потомків, до якого застосовується оператор мутації (рис. 1.22). Отриманий генотип зберігається в новій популяції.
4. До вичерпання батьківського покоління проводиться перехід до пункту 3, інакше – пункт 5.
5. Якщо лічильник поколінь досяг максимального значення, то перехід до пункту 6; інакше – до пункту 2.

6. Вибір оптимального рішення. Кінець роботи алгоритму.

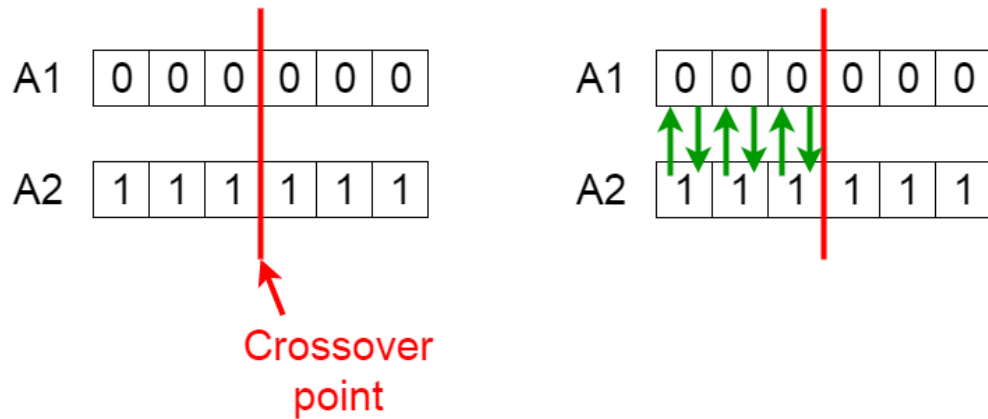


Рисунок 1.21 – Оператор кросинговеру [204]

Before Mutation

A5: 1 1 1 0 0 0

After Mutation

A5: 1 1 0 1 1 0

Рисунок 1.22 – Оператор мутації [204]

Таким чином, основними генетичними операторами є репродукція, мутація та перехресне схрещування (кросинговер) [204]. Репродукція формує проміжнепокоління. Сенс кросинговеру полягає в передачі генів від батьків до нащадків [204]–[205].

Проілюструємо ефективність використання генетичного алгоритму при пошуку мінімуму модельної функції, в якості якої візьмемо відому мультимодальну функцію Растрігіна (1.1) [206]– [207]:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)),$$

$$-5,12 \leq x_i \leq 5,12,$$

$$\text{minimum at } f(0, 0, \dots, 0) = 0. \quad (1.1)$$

Графік функції Растрігіна для 2-х змінних наведено на рис. 1.23, глобальний мінімум знаходиться у точці з координатами $(0,0)$.

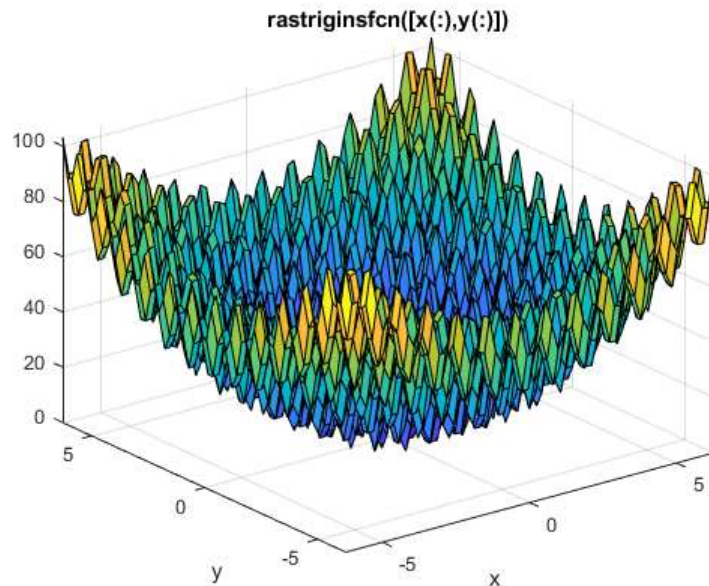


Рисунок 1.23 – Модельна функція (функція Растрігіна), мінімум якої шукається за допомогою генетичного алгоритму

Функція Растрігіна була вибрана, оскільки її поведінка подібна до поведінки цільової функції, що буде введено далі, для аналізу умови робастності.

На рис. 1.24 проілюстровано роботу алгоритму для різної кількості поколінь, глобальний мінімум знаходиться у 100 поколінні.

Таким чином, генетичний алгоритм є ефективним засобом оптимізації багатоекстремальних задач, до класу яких відноситься задача знаходження інверсної псевдовипадкової перестановки без використання додаткової апріорної інформації. Цей факт суттєвим чином буде використано при аналізі робастності побудованого візуального маркера.

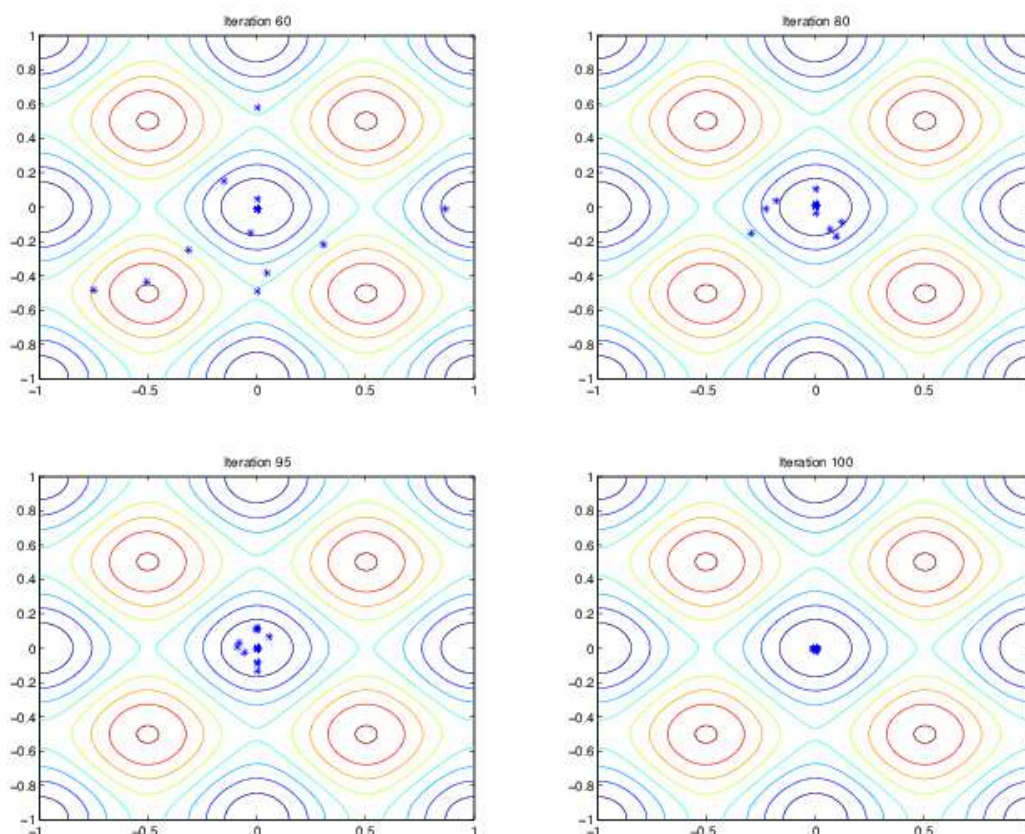


Рисунок 1.24 – Приклад роботи генетичного алгоритму [208]

1.7 Формулювання наукової проблеми та завдань дисертаційної роботи

Таким чином, при використанні візуальних маркерів у системах доповненої реальності загострилося протиріччя між вимогами до ВІС доповненої реальності і функціональними обмеженнями відомих типів візуальних маркерів доповненої реальності щодо їх стійкого використання та наявності повідомлення. Для розв'язання указанного протиріччя є актуальним вирішення наукової проблеми розробки теоретичних основ створення методів і моделей інформаційної технології побудови і використання ВІС в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації.

Метою роботи є забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності шляхом побудови інформаційної технології, яка заснована на науково обґрунтованих методах та моделях проектування та використання ВІС доповненої реальності.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- провести критичний аналіз існуючих моделей, методів, та інформаційних технологій в системах доповненої реальності;
- розвинути теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності для забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності в умовах несприятливих зовнішніх впливів;
- створити системне уявлення візуальної інформаційної структури доповненої реальності та розробити її модель;
- розробити метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити модель та метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації;
- розробити метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- розробити метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності;
- розробити інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, яка дозволяє забезпечити вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності;
- провести порівняльну оцінку якості використання існуючих та мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності в умовах

часткової втрати інформації;

– провести оцінку криптостійкості методу кодування інформації у мозаїчних стохастичних маркерах доповненої реальності.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз практичного застосування систем доповненої реальності в різних галузях. Встановлено, що стандартний підхід щодо застосування типових маркерів не забезпечує стійкого функціонування інформаційних технологій систем доповненої реальності.

2. Визначені основні проблеми існуючих систем і технологій доповненої реальності, які пов'язані з недосконалістю існуючих методів обробки, а саме:

- помилками при розпізнаванні маркерів;
- некоректним відображенням даних, що накладаються;
- відсутність кросплатформеності та інтеграції з іншими програмами;
- низькою продуктивністю.

3. Проведено аналіз відомих моделей, методів та інформаційних технологій обробки зображень в системах доповненої реальності. Встановлено, що основним типом ВІС є візуальні маркери доповненої реальності (AR-маркери), що побудовані по різним технологіям:

- шаблонні маркери (template markers) – чорно-білі маркери, які мають просте зображення всередині чорної рамки;
- 2D штрих-кодові маркери (barcode markers) – маркери, що складаються з чорно-білих клітинок, які по-бітово кодують дані, і, іноді, рамки або області синхронізації. Найчастіше в якості штрих-кодових AR-маркерів використовують QR-коди;

– колові маркери (circular markers) – аналогічно до штрих-кодових маркерів, тільки біти кодуються не прямокутними клітинками, а чорно-білими круговими секторами;

– маркери-зображення (image markers) – в якості маркерів використовуються звичайні зображення, як кольорові, так і зображення в градаціях сірого. Вони можуть містити рамку або інші орієнтири для виявлення та знаходження положення. Такі маркери-зображення зазвичай ідентифікуються за допомогою пошуку по шаблону або по особливостях зображення.

Наведені вищі структури маркерів доповненої реальності не дозволяють реалізувати стійке функціонування систем доповненої реальності.

4. В процесі аналізу визначено основні функції застосування візуальних маркерів в системах доповненої реальності, а саме:

1) всі вони дозволяють визначати положення камери, але для цього використовуються різні методи:

- знаходження кутів зображення (шаблонні маркери);
- знаходження спеціальних областей прив'язки (штрих-кодові і колові маркери);
- знаходження особливих точок зображення і їх дескрипторів (маркери-зображення);

2) частина з них (штрих-кодові і колові маркери) містить додаткову інформацію (повідомлення), наприклад, посилання на інформаційні ресурси, що є однозначною перевагою, оскільки дозволяє розширити область застосування.

6. В процесі аналізу встановлено, що при використанні візуальних маркерів у системах доповненої реальності загострилося протиріччя між вимогами до ВІС доповненої реальності і функціональними обмеженнями відомих типів візуальних маркерів доповненої реальності щодо їх стійкого використання та наявності повідомлення. Для розв'язання указанного

протиріччя є актуальним вирішення наукової проблеми розробки теоретичних основ створення методів і моделей інформаційної технології побудови і використання ВІС в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації.

Також сформульовано основні завдання дослідження. Розв'язання указанного протиріччя та вирішення сформульованих завдань дозволить забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій систем доповненої реальності.

Список використаних джерел у розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [1]–[3], [5]–[23], [25], [27]–[30], [38]–[40], [42]–[50], [53], [56]–[60], [73]–[75], [77]–[80], [84], [87], [89], [92], [97]–[99], [101]–[102], [104], [138]–[208].

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІЗУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СТРУКТУР ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

У даному розділі розвинена теорія категорій шляхом формалізації опису ВІС з використанням методів теорії множин і відображень, наведено опис ВІС, методів їх обробки і технологій на мові теорії категорій, удосконалено теоретичні основи опису операцій над ВІС, наведені теоретичні визначення та доведено ряд теорем. Удосконалено теоретичні основи побудови та використання ВІС доповненої реальності, які на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного проектування, перетворення та декодування візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем інформаційної технології доповненої реальності. Сформульовано вимоги до ВІС доповненої реальності, удосконалено їх модель та інформаційну технологію їх побудови та використання; визначені показники якості ВІС і критерії їх оцінки.

Матеріали розділу викладені в роботах [74]–[79], [81], [83], [90], [93]–[94], [99], [103].

2.1 Формалізація технології використання візуальних інформаційних структур

2.1.1 Формальна модель візуальних інформаційних структур

Для вирішення проблеми подання різномірних технологій програмної інженерії в єдиній формі, зручній для їх інтеграції та координації в рамках загального циклу проектування програмних систем

останнім часом використовується розвивається запропонований раніше математичний апарат на базі теорії категорій, побудовано універсальні теоретико-категорійні семантичні моделі цих технологій [209].

Відомо [210]–[215], що категорією називається пара, що складається з класу об'єктів $A, B, C, \dots$ і класу морфізмів (стрілок) $f : A \rightarrow B$, $g : B \rightarrow C, \dots$, що зв'язують деякі пари об'єктів, які мають наступні властивості.

Для будь-якої пари морфізмів виду $f : A \rightarrow B$, $g : B \rightarrow C$ визначено добуток (композицію морфізмів) $g \circ f$, що є морфізмом $g \circ f : A \rightarrow C$. При цьому:

- добуток є асоціативною операцією – для будь яких морфізмів $f : A \rightarrow B$, $g : B \rightarrow C$, $h : C \rightarrow D$ справедливо, що $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$;
- для кожного об'єкту A існує одиниця – тривіальний морфізм id_A , такий, що $f \circ \text{id}_A = \text{id}_B \circ f = f$ для $f : A \rightarrow B$.

Наприклад, клас множин, що розглядаються в якості об'єктів, і клас відображень як морфізмів утворюють категорію множин **Set**, якщо під добутком розуміти операцію суперпозицію функцій.

При переході від абстрактної ВІС (яка по суті є декларативною) до конкретної ВІС (наприклад, AR-маркера), необхідно імплементувати її структури даних та методи (алгоритми) роботи з ними.

Зміни, що необхідно застосувати до ВІС при їх конкретизації, будемо називати, по аналогії з термінологією, яка у дещо іншому сенсі була введена у [214], імплементаторами. З кожним зразком ВІС пов'язана множина допустимих імплементаторів. Нехай задано множину методів обробки візуальної інформації (далі – просто методів) S і певну ВІС, яка може використовуватись методами з множини S . Позначимо через X множину допустимих імплементаторів цього зразка ВІС.

Кожен імплементатор з множини X перетворює абстрактну ВІС в конкретну візуальну інформаційну структуру, що використовується для методів з множини S . Таким чином, формальну ВІС визначає

відображення $\varphi: X \rightarrow S$. Це відображення в роботі будемо називати S -структурою з областю імплементаторів X . Якщо $s \in S$ – деякий метод, то він буде сумісним по інтерфейсу з структурою φ якщо $s \in \text{Im}(\varphi)$, тобто якщо для деякого $x \in X$ маємо, що $\varphi(x) = s$. Нехай S і T – дві множини методів, тоді формальною технологією (у вузькому сенсі, далі – просто технологією) з S у T називається пара ВІС $\varphi: X \rightarrow S$ і $\psi: X \rightarrow T$ із спільною областю імплементаторів. Технологія може бути застосована до методу $s \in S$, якщо цей метод сумісний по інтерфейсу з його лівою частиною – ВІС $\varphi: X \rightarrow S$, тобто, якщо для $x \in X$ маємо, що $\varphi(x) = s$. У цьому випадку результатом застосування технології є метод $\psi(x) \in T$, таким чином, формальна технологія (визначена вище) переводить методи з множини S у методи з множини T . Відзначимо, що елемент $x \in X$ визначається рівністю $\varphi(x) = s$ неоднозначно, а отже, неоднозначно визначається і $\psi(x)$, тобто результат дії технології. Технологія показує лише можливі переходи від методу до методу, і з технологією може бути пов'язано кілька можливих методів [214].

2.1.2 Формалізація операцій, що проводяться над візуальними інформаційними структурами

Множина імплементаторів одної ВІС може виступати в якості множини методів для іншої. Будемо говорити, що задана система ВІС, якщо визначено, які множини можуть виступати в якості множини методів і множини імплементаторів, і які відображення допускаються в якості ВІС. Будемо вимагати, щоб клас всіх таких відображень був би замкнутий щодо композиції та включав в себе тотожні відображення. Це, в свою чергу, означає, що задати систему ВІС – означає задати конкретну категорію $\mathcal{C}$,

наприклад, підкатегорію категорії множин і відображень. При цьому в якості ВІС можна вважати будь-який морфізм $\varphi \in \mathbf{C}(X, Y)$ цієї категорії. У загальному випадку можна відмовитися від вимоги, щоб категорія $\mathbf{C}$ обов'язково була б підкатегорією категорії множин, для отримання нетривіальних результатів достатньо, щоб вона належала до декартово замкнутих категорій – типу категорій, у яких кожен морфізм, що задано на добутку двох об'єктів можна природно ідентифікувати із морфізмом на одному із множників [51], [210], [214]–[215].

З точки зору програмування декартово замкнуті категорії реалізують інкапсуляції аргументів функцій, тобто кожен аргумент представляється об'єктом категорії (нагадаємо, що у програмуванні об'єкти – це типи даних) і використовується як окрема сутність. Разом з тим виразності декартово замкнутих категорій цілком достатньо, щоб оперувати з функціями способом, прийнятим в λ -численні, що робить їх природними категорійними моделями типізованого λ -числення. Тому декартово замкнуті категорії особливо широко використовуються у математичній логіці і програмуванні [210], [215].

Визначення. Категорія $\mathbf{C}$ називається декартово замкнутою, якщо вона задовольняє трьом умовам:

- 1) у $\mathbf{C}$ є термінальний об'єкт;
- 2) будь-які два об'єкти X, Y у $\mathbf{C}$ мають добуток $X \times Y$;

Для будь-яких двох об'єктів Y і Z у $\mathbf{C}$ існує експоненціал (експоненційний об'єкт) Z^Y .

Категорія, така, що для будь-якого її об'єкта, категорія об'єктів над ним є декартово замкнутою, називається локально декартово замкнутою [210].

Приклади декартово замкнутих категорій:

– категорія множин **Set** природним чином є декартово замкнутою категорією, оскільки функції з однієї множини в іншу утворюють множину і, отже, є об'єктом. Також в ній існують декартові добутки і термінальний

об'єкт – синглетон;

– якщо G є групою, то категорія всіх G -множин є декартово замкнутою;

– категорія всіх скінченних G -множин також є декартово замкнутою;

– категорія **Cat** всіх малих категорій (і функторів, як морфізмів) є декартово замкнутою;

– елементарний топос є декартово замкнутою категорією за означенням [51], [210].

Визначення. Системою формальних ВІС називається декартово замкнута категорія $\mathbf{C}$, в якій для кожної пари об'єктів X і Y визначена деяка множина $\mathbf{C}_s(X, Y) \subset \mathbf{C}(X, Y)$ морфізмів, причому виконується така умова технологічної замкнутості: якщо задані морфізми $\varphi: X \rightarrow S$, $\psi: Y \rightarrow S$ і $\sigma: X \rightarrow Y$ такі, що $\varphi = \psi \circ \sigma$, то $\varphi \in \mathbf{C}_s(X, S)$ тоді і тільки тоді, коли $\psi \in \mathbf{C}_s(Y, S)$. S -структурою будемо називати морфізми $\varphi: X \rightarrow S$, де X – довільний об'єкт категорії, S -методом – морфізм $\alpha: X \rightarrow S$, $\alpha \in \mathbf{C}_s(X, S)$. Об'єкт X будемо називати областю імплементаторів S -структури φ . Метод $\alpha: A \rightarrow S$ вважається сумісним по інтерфейсу з ВІС $\varphi: X \rightarrow S$, якщо для деякого морфізма $\beta: A \rightarrow X$ маємо, що $\alpha = \varphi \circ \beta$.

Визначення. Формальною технологією з S в T називається пара ВІС – S -структура і T -структура – із загальною областю імплементаторів, тобто пара морфізмів $\varphi: X \rightarrow S$ і $\psi: X \rightarrow T$. Така технологія діє на S -методи, перетворюючи їх у T -методи.

Технологія (φ, ψ) вважається прийнятною для метода $\alpha: A \rightarrow S$, якщо цей метод сумісний по інтерфейсу зі структурою φ , тобто $\alpha = \varphi \circ \beta$ для деякого $\beta: A \rightarrow X$.

Результатом застосування технології до метода α в цьому випадку вважається метод $\psi \circ \beta: A \rightarrow T$ (цей морфізм є методом в силу умови технологічної замкнутості) [214].

Вище вже відзначалося, що категорійною мовою можуть бути описані операції над ВІС і технологіями, що є корисним в деяких задачах. Почнемо з того, що властивості як ВІС, так і технологій, можуть бути розділені на дві групи. До першої групи віднесемо властивості, засновані на тому, як влаштовані ці структури і технології. До другої – властивості, що описують, якими методами ці ВІС можна обробляти і як ці технології діють на методи. Властивості першого виду будемо називати інтенсіональними, властивості другого виду – екстенсіональними [214], [216].

Нагадаємо, що ВІС введено як спосіб опису для деякої множини методів. У той же час реальні ВІС можуть бути згенеровано набором процедур, що представляють собою певні синтаксичні конструкції. ВІС, як опис множини методів його обробки, і ВІС, як синтаксична конструкція – це об'єкти, що тісно пов'язані один з одним, але не тотожні. Наприклад, різні за будовою ВІС можуть задавати ту ж саму множину методів. Аналогічно, технологія, так само як і ВІС, являє собою деяку синтаксичну конструкцію – набір інструкцій (програму), що реалізує певний алгоритм перетворення методів. Зазвичай, інтенсіональні властивості ВІС і технологій перевіряються набагато простіше, ніж екстенсіональні властивості, оскільки перевірка перших вимагає розгляду самої ВІС, а перевірка других – розгляду множини (можливо, нескінченної) сумісних по інтерфейсу з нею методів. Однак, оскільки ВІС служить для опису множини методів, а технологія – для перетворення методів, то екстенсіональні властивості в деякому сенсі є більш значущими. Тому важливим є завдання встановити зв'язок між інтенсіональними та екстенсіональними властивостями. Багато операцій простим чином визначаються екстенсіонально, в той же час аналогічне інтенсіональне визначення буває менш очевидним. Це добре видно на розглянутому нижче прикладі композиції технологій. Теоретико-категорійна мова часто дозволяє довести, що ті чи інші екстенсіональні операції зводяться до

інтенціональних, останні ж можуть бути реалізовані за допомогою стандартних операцій теорії категорій. Це дозволяє описувати відповідні операції в термінах верхнього рівня і включати їх в програми, що працюють зі знаннями, для яких реалізована відповідна категорія. Наприклад, BIC були введені як спосіб опису деякої множини близьких методів, отже, можна порівнювати BIC, порівнюючи ті множини, які вони описують [210], [214].

Нехай $\varphi: X \rightarrow S$ – деяка BIC. Позначимо через S_φ множину S -методів, сумісних із структурою φ .

Визначення. BIC φ є окремим випадком структури ψ , якщо $S_\varphi \subset S_\psi$.

Це визначення є екстенціональним, дамо тепер його інтенціональний аналог.

Визначення. Нехай $\varphi: X \rightarrow S$ і $\psi: Y \rightarrow S$ – дві BIC. Будемо говорити, що першу з них можна порівняти з другою, якщо існує морфізм $\chi: X \rightarrow Y$ такий, що $\varphi = \psi \circ \chi$. У цьому випадку будемо також називати структуру φ підструктурою BIC ψ .

Останнє визначення повністю повторює дане раніше визначення сумісності по інтерфейсу метода зі структурою, яке тепер може розглядатися як окремий випадок сумісності двох BIC [214].

Теорема. Якщо BIC $\varphi: X \rightarrow S$ можна порівняти зі структурою $\psi: Y \rightarrow S$, то будь-який метод, що сумісний по інтерфейсу зі структурою $\varphi: X \rightarrow S$, є сумісним і з BIC $\psi: Y \rightarrow S$, тобто якщо одна BIC є підструктурою іншої, то вона є також її окремим випадком.

Доведення. Нехай структури $\varphi: X \rightarrow S$, $\psi: Y \rightarrow S$ і морфізм $\chi: X \rightarrow Y$ задовольняють умовами визначення. Якщо метод $\alpha: A \rightarrow S$ такий, що $\alpha \in S_\varphi$, тобто для деякого морфізма $\beta: A \rightarrow X$ маємо $\alpha = \varphi \circ \beta$, то морфізм $\chi \circ \beta: A \rightarrow Y$ задовольняє рівності $\alpha = \psi \circ \chi \circ \beta$, звідки $\alpha \in S_\psi$.

Обернене твердження, взагалі кажучи, не є вірним, однак воно вірно

в багатьох важливих частинних випадках.

Якщо перейти до розгляду технології, то доцільно розглянути операцію композиції технологій, в якості прикладу того, як екстенсiональні операції, визначені на технологіях, зводяться до інтенсiональних [214].

Визначення. Композиція двох технологій – це така технологія, яка перетворює метод α у метод β в тому і тільки в тому випадку, коли існує такий метод γ , що перша технологія перетворює α в γ , а друга – γ в β .

Дане визначення є екстенсiональним. Дамо його інтенсiональний аналог. Для того, щоб це було можливо, будемо вважати, що в заданій категорії існують декартові квадрати. В роботі [214] доведена теорема, що у заданій онтології звучить таким чином.

Теорема. Нехай $S \xleftarrow{\phi} X \xrightarrow{\sigma} S$ та $S \xleftarrow{\varphi} Y \xrightarrow{\tau} S$ – технології, а вираз (2.1):

$$\begin{array}{ccc} Z & \xrightarrow{\mu} & Y \\ \downarrow_{\lambda} & & \downarrow^{\varphi} \\ X & \xrightarrow{\sigma} & S \end{array} \quad (2.1)$$

– декартовий квадрат. Тоді технологія $S \xleftarrow{\phi \circ \lambda} Z \xrightarrow{\sigma \circ \mu} S$ є композицією технологій $S \xleftarrow{\phi} X \xrightarrow{\sigma} S$ та $S \xleftarrow{\varphi} Y \xrightarrow{\tau} S$.

2.1.3 Узагальнення візуальних інформаційних структур

Теоретико-категорійною мовою можуть бути описані не тільки методи отримання результатів на основі знань, але й методи автоматичного формування нових знань. Як уже зазначалося, основним інструментом для такого формування є операція узагальнення.

Узагальнення технологій – завдання досить складне, і далеко ще не вирішене, застосовуючи отримані визначення і теореми до найбільш загальних випадків, ми ризикуємо отримати тільки тривіальні результати.

Простішим (але значимим) є завдання узагальнення ВІС, яке полягає в тому, щоб по парі ВІС побудувати таку третю ВІС, щоб, кожна з двох вихідних була би її частинним випадком. Сформулюємо все це більш строго.

Визначення. Нехай задана мала категорія $\mathbf{C}$, і нехай S – об'єкт цієї категорії. Позначимо символом $\mathbf{C}/S$ множину морфізмів виду $X \rightarrow S$, де X – довільний об'єкт категорії $\mathbf{C}$. Якщо $\varphi: X \rightarrow S$, $\psi: Y \rightarrow S$ – дві ВІС, тобто $\varphi, \psi \in \mathbf{C}/S$, то покладемо $\varphi \leq \psi$, якщо існує морфізм $\chi: X \rightarrow Y$ такий, що $\varphi = \psi \circ \chi$.

Це визначення фактично повторює визначення сумісності ВІС, що було наведено вище.

Теорема. Відношення $\leq$ є відношенням передпорядку на множині $\mathbf{C}/S$.

Доведення. Нагадаємо, що відношення передпорядку – це бінарне відношення в теорії порядку, що є рефлексивним та транзитивним. Рефлексивність випливає з того, що для одиничного морфізма $\text{id}_X: X \rightarrow X$ маємо $\varphi = \text{id}_X \circ \varphi$. Нехай тепер для трьох ВІС $\varphi: X \rightarrow S$, $\psi: Y \rightarrow S$ і $\chi: Z \rightarrow S$ маємо, що $\varphi \leq \psi \leq \chi$. Це означає, що для деяких $\sigma: X \rightarrow Y$ і $\tau: Y \rightarrow Z$ виконуються рівності $\varphi = \psi \circ \sigma$ і $\psi = \chi \circ \tau$. Але тоді $\varphi = \psi \circ \tau \circ \sigma$, тобто $\varphi \leq \chi$, чим і доведена транзитивність.

Відомо [51], [211], [214]–[215], що якщо на деякій множині P задано відношення передпорядку $\leq$, то відношення $\sim$, яке визначається умовою $x \sim y \Leftrightarrow x \leq y \text{ \& } y \leq x$, є відношенням еквівалентності, і відношення $\leq$ індукує частковий порядок на фактор-множині множини P по цьому відношенню (яку далі будемо позначати символом $\overline{P}$). Перехід від множини $\mathbf{C}/S$ до множини $\overline{\mathbf{C}/S}$ є виправданим, оскільки якщо φ, ψ – це

S-структури, то еквівалентність $\varphi \sim \psi$, тобто $\varphi \leq \psi$, $\psi \leq \varphi$ означає, в світлі теореми, доведеної на початку цього розділу, що $S\varphi = S\psi$, тобто еквівалентні об'єкти, розрізняючись у інтенціональному сенсі, збігаються в екстенціональному, бо описують ту ж саму множину ВІС.

Тепер дамо основне визначення, пов'язане з теорією узагальнень ВІС.

Визначення. Зразок $\sigma: Z \rightarrow S$ називається мінімальним узагальненням ВІС $\varphi: X \rightarrow S$ і $\psi: Y \rightarrow S$, якщо:

1) існують морфізми λ і μ такі, що діаграма (2.2):

$$\begin{array}{ccccc} S & = & S & = & S \\ \uparrow_{\varphi} & & \uparrow_{\sigma} & & \uparrow_{\psi} \\ X & \xrightarrow{\lambda} & Z & \xleftarrow{\mu} & Y \end{array} \quad (2.2)$$

є коммутативною;

2) якщо Z' – об'єкт, а σ', λ', μ' – морфізми, для яких діаграма (2.3):

$$\begin{array}{ccccc} S & = & S & = & S \\ \uparrow_{\varphi} & & \uparrow_{\sigma'} & & \uparrow_{\psi} \\ X & \xrightarrow{\lambda'} & Z' & \xleftarrow{\mu'} & Y \end{array} \quad (2.3)$$

коммутативна, то існує морфізм, що робить комутативною діаграму (2.4):

$$\begin{array}{ccc} S & = & S \\ \uparrow_{\sigma} & & \uparrow_{\sigma'} \\ Z & \xrightarrow{\tau} & Z' \end{array} \quad (2.4)$$

Формалізм теорії категорій дозволяє дати визначення мінімального узагальнення ВІС у досить загальному вигляді, він також дозволяє звести процес побудови мінімального узагальнення до простіших операцій теорії

категорій. Одним із прикладів того, як це можна зробити, служить наступна теорема, аналог якої данов [214].

Теорема. Нехай задані BIC $\phi: X \rightarrow S$, $\psi: Y \rightarrow S$, і нехай об'єкт Z разом з морфізмами $\sigma: X \rightarrow Z$ і $\tau: Y \rightarrow Z$ – пряма сума об'єктів X і Y . Розглянемо морфізм $\chi: Z \rightarrow S$, що робить комутативною діаграму (2.5):

$$\begin{array}{ccccc} S & = & S & = & S \\ \uparrow_{\phi} & & \uparrow_{\chi} & & \uparrow_{\psi} \\ X & \xrightarrow{\lambda} & Z & \xleftarrow{\mu} & Y \end{array} \quad (2.5)$$

(існування і єдиність такого морфізма випливає з визначення прямої суми).

Тоді зразок $\chi: Z \rightarrow S$ є мінімальним узагальненням для BIC $\phi: X \rightarrow S$ і $\psi: Y \rightarrow S$.

Доведення. Перша діаграма визначення мінімального узагальнення є повторення діаграми з умови теореми. Нехай тепер є комутативною діаграма (2.6):

$$\begin{array}{ccccc} S & = & S & = & S \\ \uparrow_{\phi} & & \uparrow_{\chi'} & & \uparrow_{\psi} \\ X & \xrightarrow{\lambda'} & Z' & \xleftarrow{\mu'} & Y \end{array} \quad (2.6)$$

Морфізми $\lambda': X \rightarrow Z'$ і $\mu': Y \rightarrow Z'$ визначають морфізм $\xi': Z \rightarrow Z'$, для якого $\lambda' = \xi' \circ \lambda$ і $\mu' = \xi' \circ \mu$, тоді (2.7), (2.8):

$$\chi' \circ \xi' \circ \lambda = \chi' \circ \lambda' = \phi = \chi \circ \lambda, \quad (2.7)$$

$$\chi' \circ \xi' \circ \mu = \chi' \circ \mu' = \psi = \chi \circ \mu, \quad (2.8)$$

звідки отримуємо вираз (2.9):

$$\chi' \circ \xi = \chi, \quad (2.9)$$

що завершує доведення.

Зауважимо, що умова теореми не є необхідною. Мінімальне узагальнення ВІС $\varphi: X \rightarrow S$ і $\psi: Y \rightarrow S$ може існувати і в тому випадку, коли не існує прямої суми об'єктів X і Y . Оскільки у визначенні мінімального узагальнення немає ніяких вимог єдиності, то немає можливості стверджувати, що мінімальне узагальнення визначається однозначно з точністю до ізоморфізму. Окрім того, мінімальне узагальнення визначено не для пари об'єктів, а для пари структур, тобто в загальному випадку може залежати не тільки від об'єктів X і Y , але і від морфізмів φ і ψ , в той час, як пряма сума будується по парі об'єктів [211], [214].

2.1.4 Функціональна модель візуальних інформаційних структур

Перейдемо тепер від формальних ВІС до їх визначення через функціональні вимоги. Нехай задано список вимог R_k (далі вони будуть конкретизовані) і список відповідних логічних функцій $\Theta_k(f)$, кожна з яких приймає істинне значення тоді і тільки тоді, якщо для матричного коду f задовільняється відповідна вимога R_k .

Визначення. Візуальна інформаційна структура – це матричний код f , для якого істинна кон'юнкція $\bigcap_k \Theta_k(f)$.

Вводячи набір операторів F_k , кожен з яких трансформує матричний код таким чином, щоб результат задовільняв вимогу R_k і *не впливав стосовно інших вимог*, чисто формально, можемо записати, що

$$f_k = \begin{cases} \text{if } \Theta_k & F f_{k-1}, \\ \text{else} & \text{nothing} \end{cases}, \quad (2.10)$$

де f_0 – зображення-повідомлення; k – як і раніше, нумерує вимоги; *nothing* означає зупинку процесу, якщо вимога не виконується. За означенням, BIS – це структура, що задовільняє всім вимогам.

Подальший розгляд зручно проводити, використовуючи поняття *монади* – особливого типу даних у функціональних мовах програмування, для якого можна задати імперативну послідовність виконання деяких операцій над збереженими значеннями [217]. Монади дозволяють задавати послідовність виконання операцій, проводити операції з побічними ефектами і інші дії, які складно або зовсім неможливо реалізувати в функціональній парадигмі програмування іншими способами.

Концепція монади і термін спочатку походять з теорії категорій, де вона визначається як функтор з додатковою структурою. Монада визначається конструктором типу M разом з двома операціями:

`return :: a -> M a` (інакше називають *одиноцею*), що перетворює довільне значення типу a у монадичне значення типу $M a$,

`join :: M (M a) -> M a` (інакше називають *композицією*), що розгортає довільне обгорнуте монадичне значення типу $M (M a)$ у просте монадичне значення типу $M a$.

Крім того, припускається, що конструктор типу M є *функтором*, тобто забезпечує `fmap :: (a -> b) -> M a -> M b`. Обидві операції `return`, а також `join` повинні задовільняти відношенням сумісності, що вказані нижче.

На практиці монади зазвичай визначаються через свій оператор `bind`, що записується в інфікській нотації `>>=` :

`bind :: M a -> (a -> M b) -> M b`, який відображає

монадичний тип $M\ a$ у монадичний тип, $M\ b$, що задається монадичною функцією типу $a \rightarrow M\ b$.

Зауважимо, що представлення `bind` і `join` для визначення монади є еквівалентними:

функціонально $a \rightarrow M\ b$ відображаючи $M\ a \rightarrow M\ (M\ b)$ і приєднуючи $M\ (M\ b)$ к $M\ b$, зв'язування `ma >>= f` відновлюється через `join (fmap f ma)`.

взаємно, дозволяючи $a = M\ b$, тотожно відображає $a = M\ b$ у $M\ b$, таким чином `join mmb` відновлюється, як `mmb >>= id`, де ідентифікатор є тотожним.

Таким чином, функціональне визначення ВІС зручно представити, використовуючи монаду `Maybe`, що задається так:

```
instance Monad Maybe where
  return x = Just x
  Nothing >>= f = Nothing
  Just x >>= f = f x
```

Функція `bind` містить код зв'язування, в той час, як `unit` здійснює ініціалізацію і приведення до монадичного типу змінної `f0`, яка задає зображення-повідомлення. Це дозволяє спростити рішення до одного рядка:

```
bind(bind(...bind(bind(unit(f0), F[1]), F[2]) ...
F[k-1]), F[k])
```

Виклик `unit(f0)` генерує початкове значення `f1`. Потім `bind(f1, F1)` генерує нове проміжне значення `f2`, яке використовується в наступному виклику `bind(f2, F2)`. Цей процес триває, поки не буде отримано підсумковий результат.

2.2 Структура системи доповненої реальності, що базується на візуальних інформаційних структурах

Проведений в розділі 1 стислий аналіз відомих систем доповненої реальності різного призначення свідчить про те, що основними системами доповненої реальності є системи, що базуються на ВІС. Структура системи візуалізації засобами доповненої реальності передбачає наявність основних базових компонентів (рис. 2.1) [218]:

- система трекінгу, що забезпечує коректну інтеграцію віртуального об'єкта в реальне середовище;
- база даних тривимірних моделей та іншої інформації про об'єкти;
- система візуалізації, що забезпечує відображення об'єктів засобами комп'ютерної графіки;
- графічний інтерфейс для взаємодії з користувачем.

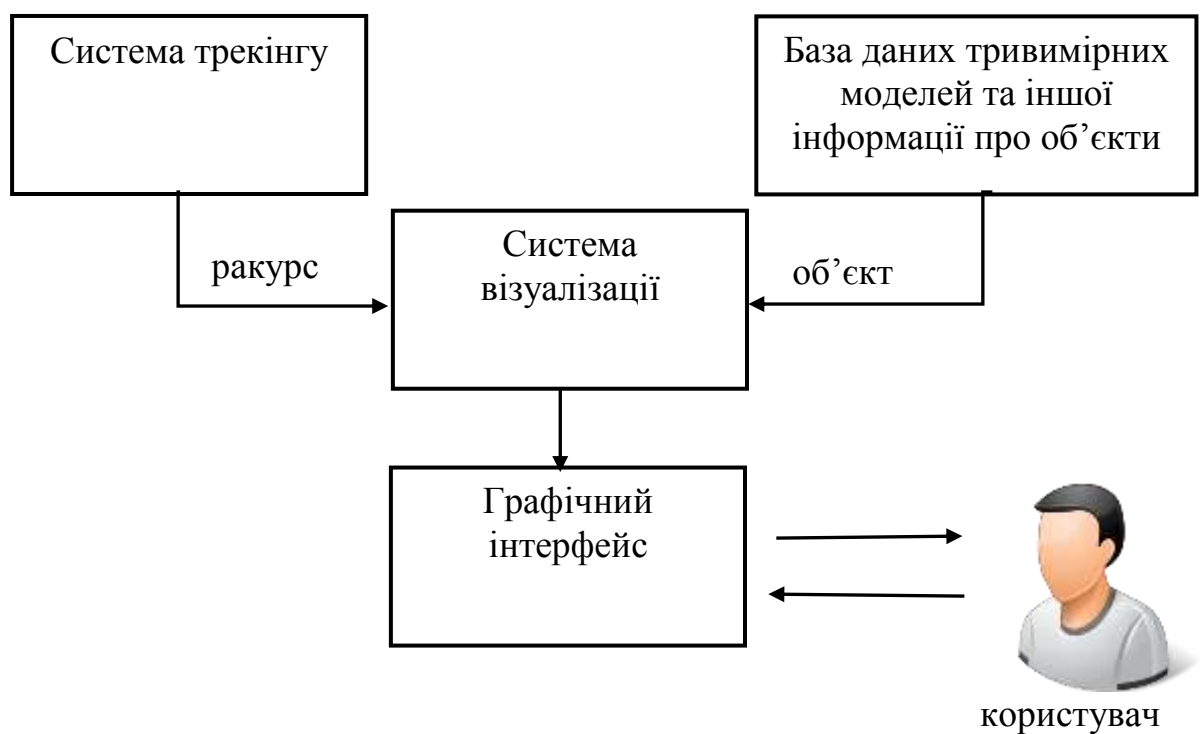


Рисунок 2.1 – Структура системи візуалізації засобами доповненої реальності

Узагальнена схема системи доповненої реальності, що базується на ВІС, представлена на рис. 2.2.

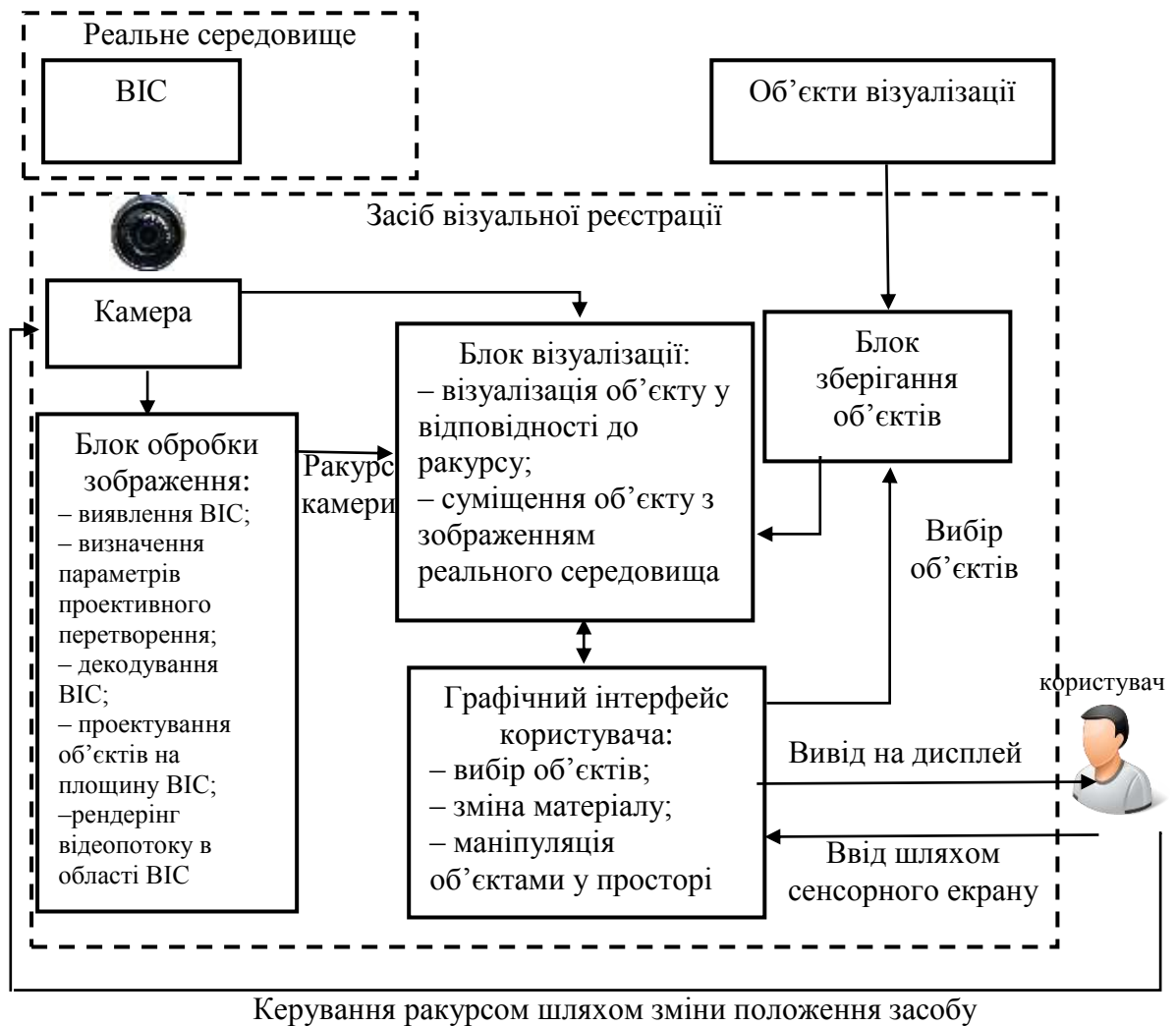


Рисунок 2.2 – Узагальнена схема системи доповненої реальності, що базується на ВІС

При оптичному трекінгу відеопоток з камери поступає до системи трекінгу, проводиться обробка та аналіз кожного кадру на наявність визначеної ВІС. При успішному розпізнаванні ВІС проводиться визначення положення об'єкту у просторі. При цьому положення віртуальної камери відносно об'єкта та реальної камери відносно ВІС синхронізуються. Тривимірний об'єкт витягується з бази даних тривимірних моделей, його положення та масштаб встановлюються на задані значення відносно ВІС. Після цього проводиться візуалізація, що

забезпечує відображення об'єктів засобами комп'ютерної графіки шляхом накладання віртуального об'єкту на зображення реального оточення з відеопотоку. Потім проводиться рендерінг графічного інтерфейсу для взаємодії з користувачем.

2.3 Загальні принципи та підходи щодо теоретичних основ побудови візуальних інформаційних структур доповненої реальності

Як показав аналіз, проведений у розділі 1, на даний час не розроблені та систематизовано не викладені теоретичні основи побудови BIC доповненої реальності. Теоретичні основи побудови BIC доповненої реальності (Augmented Reality Visual Information Structures, ARVIS) будемо розглядати у вигляді сукупності моделей, методів та інформаційних технологій побудови і використання BIC доповненої реальності з урахуванням вимог до BIC та критеріїв оцінки якості BIC, які певним чином пов'язані між собою і реалізують прийоми, способи і методи, що забезпечують побудову і використання BIC доповненої реальності (рис. 2.3). Метою розробки теоретичних основ побудови і використання BIC є розробка моделей та методів побудови і використання BIC.

Для візуалізації та подальшого формального представлення ARVIS будемо розглядати у вигляді сукупності множин:

– множини T^{ARVIS} – вираз (2.11):

$$T^{ARVIS} = \{In^{ARVIS}, \{D_1^{ARVIS}\}\}, \quad (2.11)$$

– множини $\{D_1^{ARVIS}\}$ – вираз (2.12):

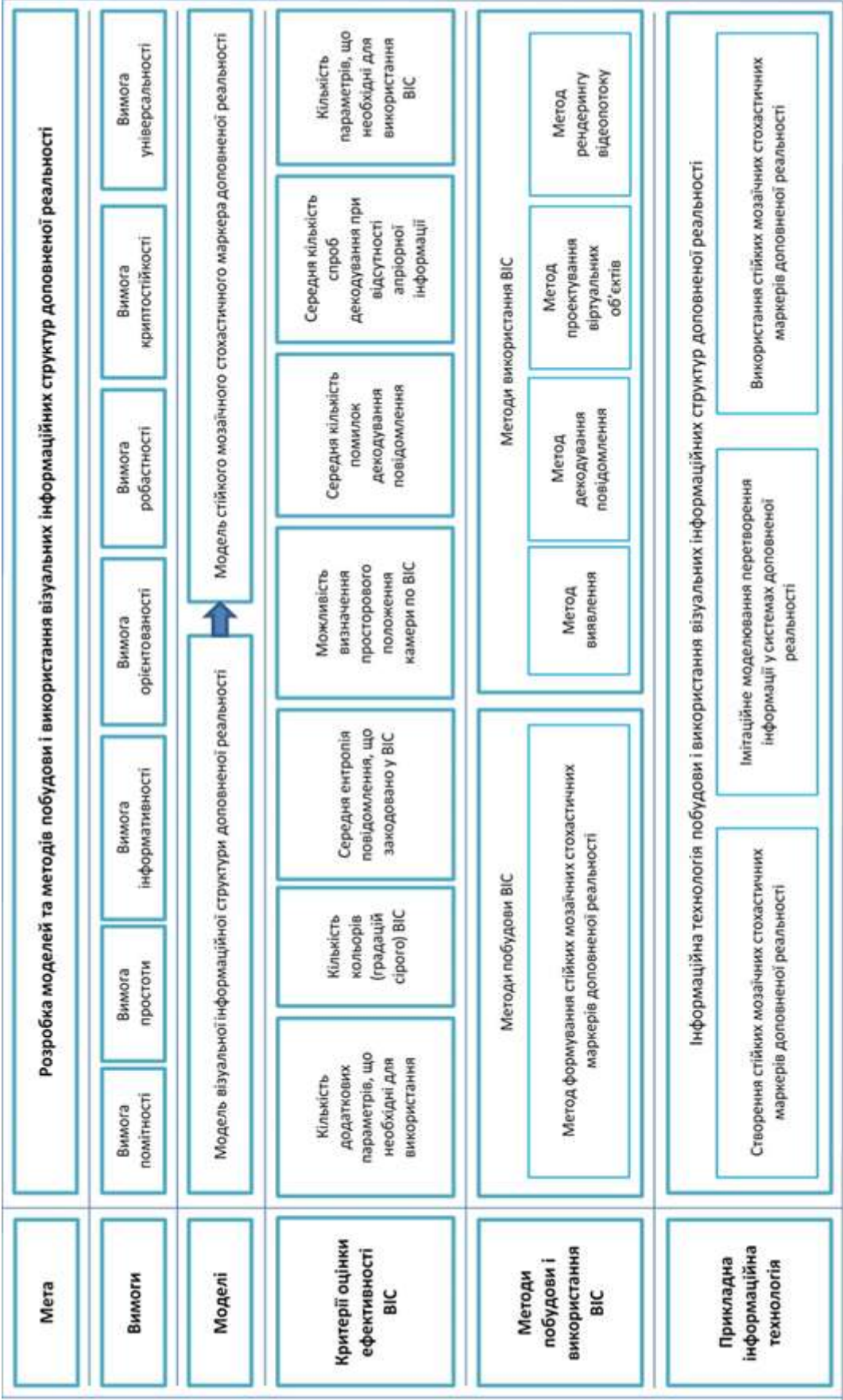


Рисунок 2.4 – Теоретичні основи побудови та використання BIC доповненої реальності

$$\{D_1^{ARVIS}\} = \{\{F_i^1\}, \{L_j^1\}\}, \quad (2.12)$$

– множини $\{L_j^1\}$ – вираз (2.13):

$$L_j^1 = \{\{V_j^1\}, \{C_s^1\}, \{I_m^1\}, \{O_n^1\}, \{M_r^1\}\}, \quad (2.13)$$

де In^{ARVIS} – сукупність моделей та методів, що забезпечують побудову і використання BIC доповненої реальності;

$\{D_1^{ARVIS}\}$ – множина рівнів деталізації представлення ARVIS;

$\{F_i^1\}$ – множина складових елементів на $\{D_1^{ARVIS}\}$ рівні деталізації представлення ARVIS;

$\{L_j^1\}$ – множина внутрішніх та граничних взаємодій елементів ARVIS;

$\{V_j^1\} \subseteq \{L_j^1\}$ – множина внутрішніх взаємодій між елементами ARVIS з множини $\{F_i^1\}$;

$\{C_j^1\} \subseteq \{L_j^1\}$ – множина керуючих взаємодій програмних та технічних засобів, що реалізують ARVIS;

$\{I_j^1\} \subseteq \{L_j^1\}$ – множина вхідних даних ARVIS;

$\{O_j^1\} \subseteq \{L_j^1\}$ – множина вихідних даних ARVIS;

$\{M_j^1\} \subseteq \{L_j^1\}$ – множина, що відображає математичний апарат, що використовується при розробці ARVIS.

На рис. 2.4 представлено зв'язок множин, що описує область та границі представлення ARVIS у відповідності з виразом (2.14):

$$D_0^{ARVIS} = \{\{F_1^0\}, \{C_1^0, I_1^0, I_2^0, O_1^0, O_2^0, M_1^0\}\}. \quad (2.14)$$

На рис. 2.5 наведено зв'язок множин, що описує елементи ARVIS у

відповідності до виразу (2.15):

$$D_1^{\text{ARVIS}} = \left\{ \left\{ F_1^1 \right\}, \left\{ C_1^0, I_1^0, I_2^0, O_1^0, O_2^0, M_1^0, \{ V_t^1 \} \right\} \right\}, \quad (2.15)$$

де $t=1,2,\dots,11$ – кількість внутрішніх взаємодій у верхній дочірній діаграмі.

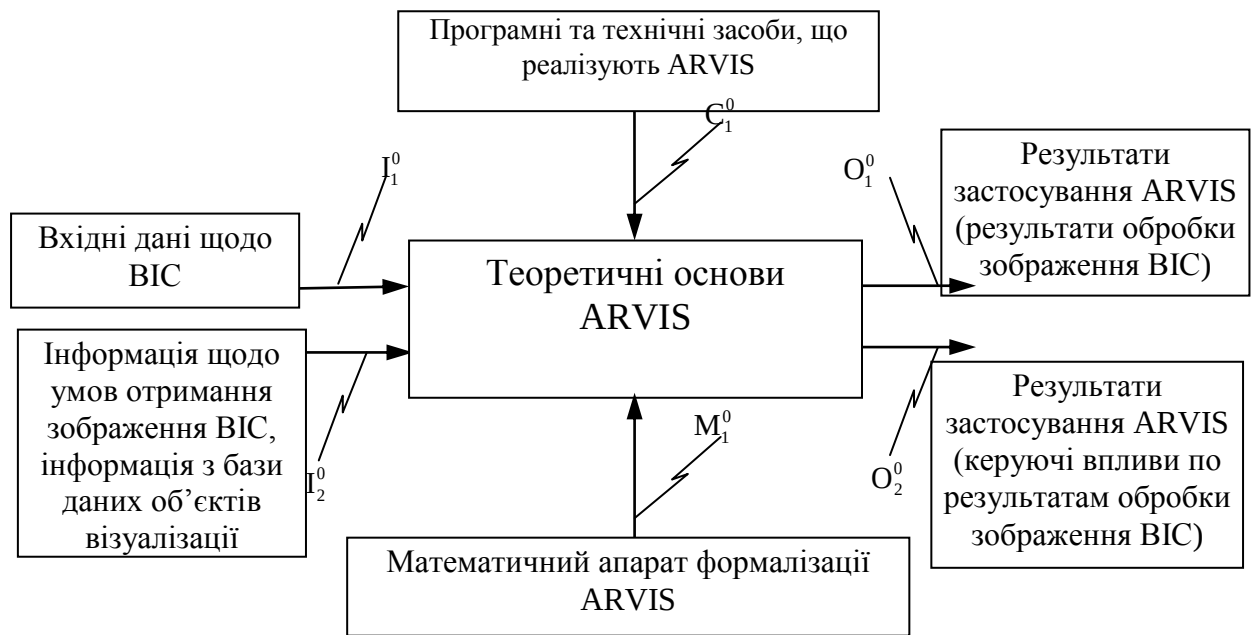


Рисунок 2.4 – Зв'язок множин верхнього рівня, що описує область та границі представлення ARVIS

Розглянемо більш детально основні складові елементи теоретичних основ побудови BIC доповненої реальності.

2.4 Вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності

На підставі визначених недоліків систем доповненої реальності наведених в розділі 1, визначимо основні вимоги до введеної моделі BIC

доповненої реальності, на основі якої будуть розроблятися стійкі візуальні AR-маркери:

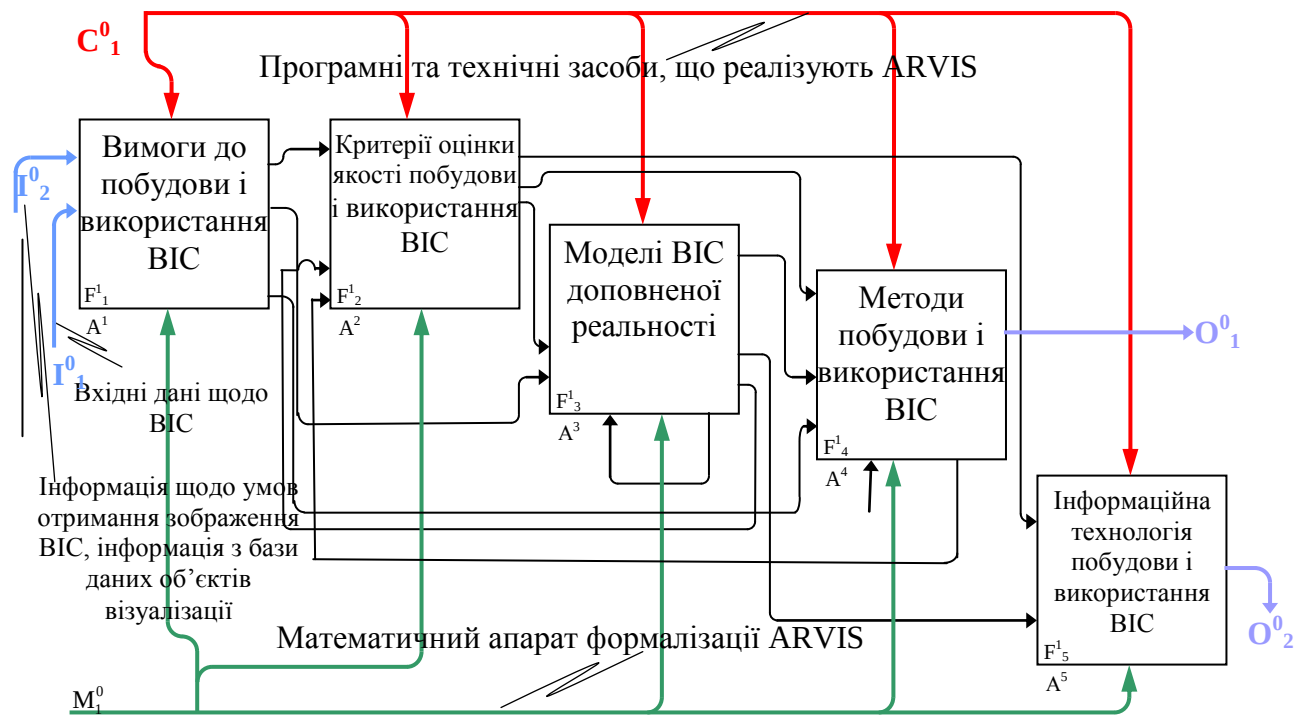


Рисунок 2.5 – Зв'язок множин, що описує елементи ARVIS

1) **помітність:** BIC повинні легко і швидко знаходитися у відеопотоці; дана вимога дозволяє врахувати асинхронну багатозадачність – властивість операційної системи пристрою, на якому інстальовано додаток доповненої реальності, забезпечувати можливість паралельної (або псевдопаралельною) обробки декількох процесів; при цьому процес виявлення кандидатів BIC виконується постійно, отже він повинен використовувати мінімальну кількість обчислювальних ресурсів і виконуватися з частотою, що співмірна частоті отримання кадрів відеопотоку (а в ідеалі дорівнює їй); вимога помітності мінімізує кількість помилок II роду – у даному випадку пропуск кадра, на якому присутні BIC;

2) **простота:** BIC повинні бути побудовані з використанням мінімальної кількості кольорів (або градацій сірого); дана вимога тісно пов'язана з вимогами помітності та універсальності (див. нижче), оскільки мінімальна кількість кольорів дозволяє спростити і уніфікувати алгоритми

виявлення, при виконанні вимоги простоти ВІС буде суттєво відрізнятися від фону; окрім того, при створенні ВІС суттєво зменшуються вимоги по точності відтворення кольорів, що здешевлює процес;

3) інформативність: ВІС повинні містити додаткову інформацію (повідомлення); дана вимога – основна, яка відрізняє ВІС від існуючих типів візуальних маркерів доповненої реальності; наявність додаткової інформації дозволяє суттєвим чином розширити сферу застосування ВІС, в першу чергу завдяки розширенню інтерактивності і універсальності застосувань; ВІС, будучи узагальненням і візуальних маркерів, і матричних кодів, можуть застосовуватися, як в системах доповненої реальності, так і в системах, де традиційно використовуються матричні коди (двовимірні штрих-коди або QR-коди), що призводить до повної інтеграції цих технологій;

4) орієнтованість: ВІС повинні дозволяти визначати положення камери в момент отримання кожного кадру, де виявлено ВІС; дана вимога є основою для тривимірного представлення об'єктів в процесі комбінування реального та віртуального світу, що є ключовими ознаками доповненої реальності; з урахуванням вимоги універсальності (див. нижче) поняття орієнтованості слід розуміти розширено – ВІС повинні дозволяти проводити внутрішнє калібрування камери по самому зображенню ВІС; таким чином, орієнтованість означає можливість визначення, як зовнішніх, так і внутрішніх параметрів калібрування; дана вимога дозволяє розширити можливу область застосування ВІС для їх використання як калібраційних маркерів; зауважимо, що традиційні візуальні маркери дозволяють визначати тільки матрицю зовнішнього калібрування (розташування камери у просторі), що призводить до використання спрощених алгоритмів тривимірного представлення об'єктів і це представлення не є фізично точним;

5) робастність: ВІС повинні задовільняти вимоги інформативності та робастності при втраті до 50% інформації про ВІС (наприклад, при

закритті зображення ВІС завадою чи фізичній відсутності будь-якої частини ВІС); дана вимога дозволяє масово використовувати інформаційні технології на основі ВІС на практично всіх мобільних пристроях, що вийшли на ринок за останні 2-3 роки; дана вимога дозволяє з меншими затратами задовільнити вимогу помітності і проводити обробку ВІС, оскільки дозволяє спростити алгоритми обробки за рахунок втрати частини інформації;

6) криптостійкість: повідомлення, що закодоване у ВІС повинно бути стійким до криптоатак; дана вимога дозволяє ширше використовувати ВІС у військовій, медичній та інших галузях, де необхідно забезпечити конфіденційність даних; зауважимо, що для матричних кодів (двовимірних штрих-кодів або QR-кодів) дана вимога не висувається;

7) універсальність: технології обробки ВІС повинні використовувати мінімум апріорної інформації; дана вимога розуміється перш за все, як незалежність алгоритмів від даних – при переході до кожної конкретної реалізації ВІС (наприклад, у вигляді стійкого мозаїчного візуального маркера), реалізація основних методів виявлення ВІС, декодування повідомлення, тривимірного представлення об'єктів та інших повинна залишатися без змін (з точністю до заміни набору констант).

Очевидно, що жоден стандартний тип AR-маркера не буде відповідати вимогам 1)–7) в повній мірі. Найближчим відповідником є 2D штрих-кодові маркери (barcode markers), але вони не задовільняють вимозі робастності і тільки частково вимогам орієнтовності та універсальності – для фізично коректного тривимірного представлення об'єктів необхідно провести попереднє калібрування камери для кожного пристрою, на якому стоїть додаток, що використовує дані технології доповненої реальності.

Вимогам робастності та універсальності найбільшою мірою відповідають маркери-зображення, але вони не задовільняють вимогам

інформативності та помітності.

Таким чином, по суті, необхідно розробити ВІС, як структуру, що є узагальненням візуальних маркерів доповненої реальності і матричних кодів, і розробити методи побудови та використання таких структур у системах доповненої реальності [74]–[77], [77], [81], [83], [99], [103].

2.5 Визначення показників якості візуальних інформаційних структур доповненої реальності і критерії їх оцінки

Для порівняння якості ВІС доповненої реальності із іншими типами візуальних маркерів доповненої реальності необхідно кількісно оцінити наскільки кожен тип маркерів задовольняє введеним функціональним вимогам.

У табл. 2.1 наведено запропоновані кількісні критерії для кожного функціонального показника.

Таблиця 2.1 – Критерії оцінки показників якості ВІС

Показник	Критерій оцінки
Помітність	Середній час детектування тестових ВІС в однакових умовах спостереження, τ_d , сек
Простота	Кількість кольорів (градацій сірого), n_c , число
Інформативність	Середня ентропія повідомлення, що закодовано у ВІС, e_m , біт/піксель
Орієнтованість	Можливість n_e визначення просторового положення камери, так/ні
Робастність	Середня кількість помилок декодування повідомлення (в залежності від типу і рівня помилок), , число
Крипторезистентність	Середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації, n_p , число
Універсальність	Кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання ВІС, n_u , число

Теоретичні оцінки, а також конкретні умови проведення комп'ютерних експериментів і оцінювання будуть описані у відповідних розділах нижче.

2.6 Модель та методи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності

2.6.1 Модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності

Таким чином, маючи конкретизовані вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності і кількісні критерії показники їх оцінки, можемо конкретизувати вид операторів побудови ВІС у функціональному представленні [75], [77]–[79].

1) Враховуючи, що основною вимогою є вимога *інформативності*, пропонується в якості вихідного матричного коду обирати матричні коди, що використовуються для передачі інформації.

2) Вимога *простоти* буде враховуватися, якщо кодування інформації в обраному матричному коді буде здійснюватися за допомогою кольору і таких кольорів буде найменша можлива кількість – два. При цьому біт 0 буде кодуватися кольором з найменшою інтенсивністю, 1 – відповідно, з найбільшою.

3) Вимога *універсальності* буде врахована, якщо в кінцевому результаті не буде виділених структурних елементів, наприклад, таких, що використовуються для синхронізації.

4) Вимога *орієнтованості* в такому випадку буде врахована, якщо створити окремий алгоритм визначення параметрів проективного перетворення по будь-якій зв'язній області ВІС.

5) Щоб задовільнити вимогу *робастності* необхідно ввести

достатню надлишковість і створити окремий алгоритм декодування повідомлення по будь-якій зв'язній області ВІС.

6) Вимога *криптостійкості* буде врахована, якщо інформація зображення-повідомлення буде обгорнута алгоритмом криптичного кодування, враховуючи, що ми розглядаємо інформацію у бітовому представленні, і, накладаючи додаткову умову, що вихідне і закодоване повідомлення статистично еквівалентні, даний вид кодування буде еквівалентний зміні розташування бітів.

7) Вимога *помітності* буде врахована, якщо помістити структурні елементи в окремі контейнери і розробити алгоритм, що детектує їх.

Використовуючи підходящий матричний код, що забезпечує п. 1, достатньо всього трьох операторів, які враховують всі решта (зауважимо, що результат їх дії суттєво залежить від порядку використання):

- 1) оператор введення надлишковості – забезпечує п. 5;
- 2) оператор стохастичного перевпорядкування – забезпечує пп. 4-6;
- 3) оператор контейнеризації – забезпечує пп. 2, 7.

Враховуючи все вищесказане, запропоновано модель ВІС доповненої реальності, що задовільняє всім введеним вимогам і побудована на основі вихідного зображення матричного коду, який кодує повідомлення (далі – зображення-повідомлення) шляхом [77]:

- 1) введення надлишковості (вираз (2.16)):

$$f = \hat{S}f_0, \quad (2.16)$$

де f_0 – зображення-повідомлення;

f – зображення із надлишковістю;

$\hat{S}$ – оператор введення надлишковості;

- 2) стохастичного перевпорядкування даних (вираз (2.17)):

$$g = Pf, \quad (2.17)$$

де g – перевпорядковане зображення;

P – оператор стохастичного перевпорядкування;

3) контейнеризації (додавання біт-контейнера) (вираз (2.18)):

$$\gamma = Bg, \quad (2.18)$$

де γ – зображення ВІС;

B – оператор контейнеризації даних.

Отже, в операторній формі у загальному вигляді дана модель може бути представлена виразом (2.19):

$$\gamma = BPSf_0, \quad (2.19)$$

де використано позначення, що введені вище.

Таким чином, удосконалено модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

2.6.2 Метод побудови візуальних інформаційних структур доповненої реальності

Метод побудови ВІС доповненої реальності базується на моделі ВІС, яка була введена вище, і складається з трьох основних процедур моделі:

введення надлишковості, стохастичного перевпорядкування даних і їх контейнеризації – додавання біт-контейнера (рис. 2.6) [77]–[79].

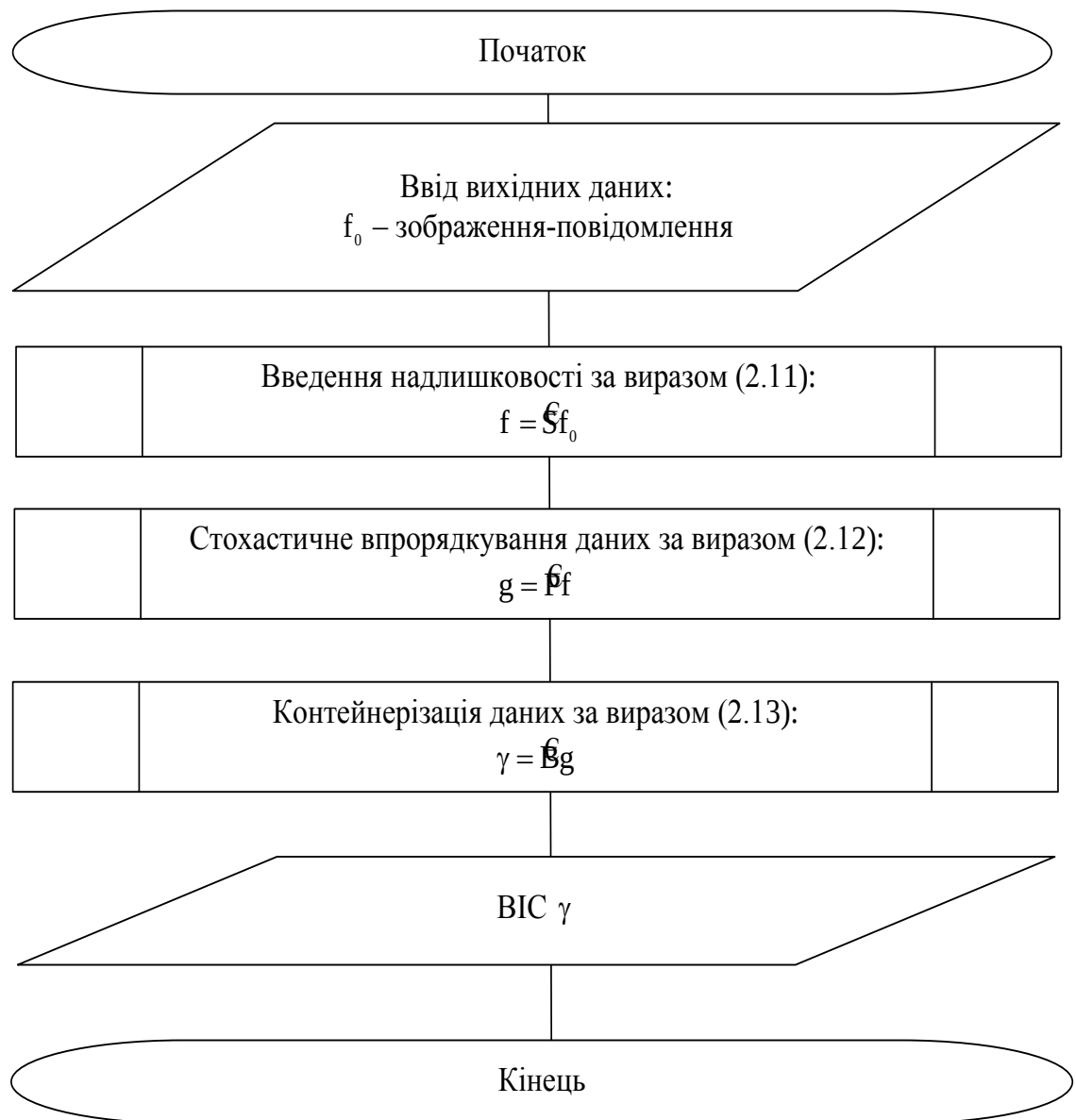


Рисунок 2.6 – Метод побудови ВІС доповненої реальності

Зауважимо, що на даному етапі, залишаючись у рамках абстрактної моделі, ми не конкретизуємо імплементацію кожної процедури – для прикладу введення надлишковості може бути реалізовано, як простим дублюванням даних, так і введенням спеціальних кодів, що виправляють помилки (наприклад, кодів Ріда-Соломона). Аналогічно, різними способами можуть бути реалізовані процедури стохастичного

перевпорядкування та контейнеризації даних.

Тим не менш, для використання ВІС в якості візуального маркера необхідно, щоб метод побудови забезпечував можливість визначення положення камери (зовнішнього калібрування). Як буде показано нижче, вибір підходящої процедури контейнеризації дозволяє проводити не тільки зовнішнє, але й внутрішнє калібрування камери – визначення фокусної відстані, коефіцієнтів корекції радіальних дисторсій та інше.

2.6.3 Методи використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності

Методи використання ВІС доповненої реальності в першу чергу залежать від цільового призначення ВІС – в якості стійкого матричного коду для передачі інформації по типу QR-кодів чи в якості візуального маркера доповненої реальності [90], [93]–[94].

Метод використання ВІС в якості стійкого матричного коду для передачі інформації представлений на рис. 2.7. З аналізу, проведеного в розділі 1, витікає, що метод (рис. 2.7) складається з тих самих основних блоків, що і метод використання інших типів матричних кодів. Так, на рис. 2.8 показано для порівняння основні етапи розпізнавання QR-коду [219].

Метод використання ВІС в якості візуального маркера доповненої реальності представлений на рис. 2.9.

Метод використання ВІС в якості візуального маркера доповненої реальності в основному складається з основних блоків, що й методи використання інших візуальних маркерів доповненої реальності (рис. 2.10 [220]–[221]).

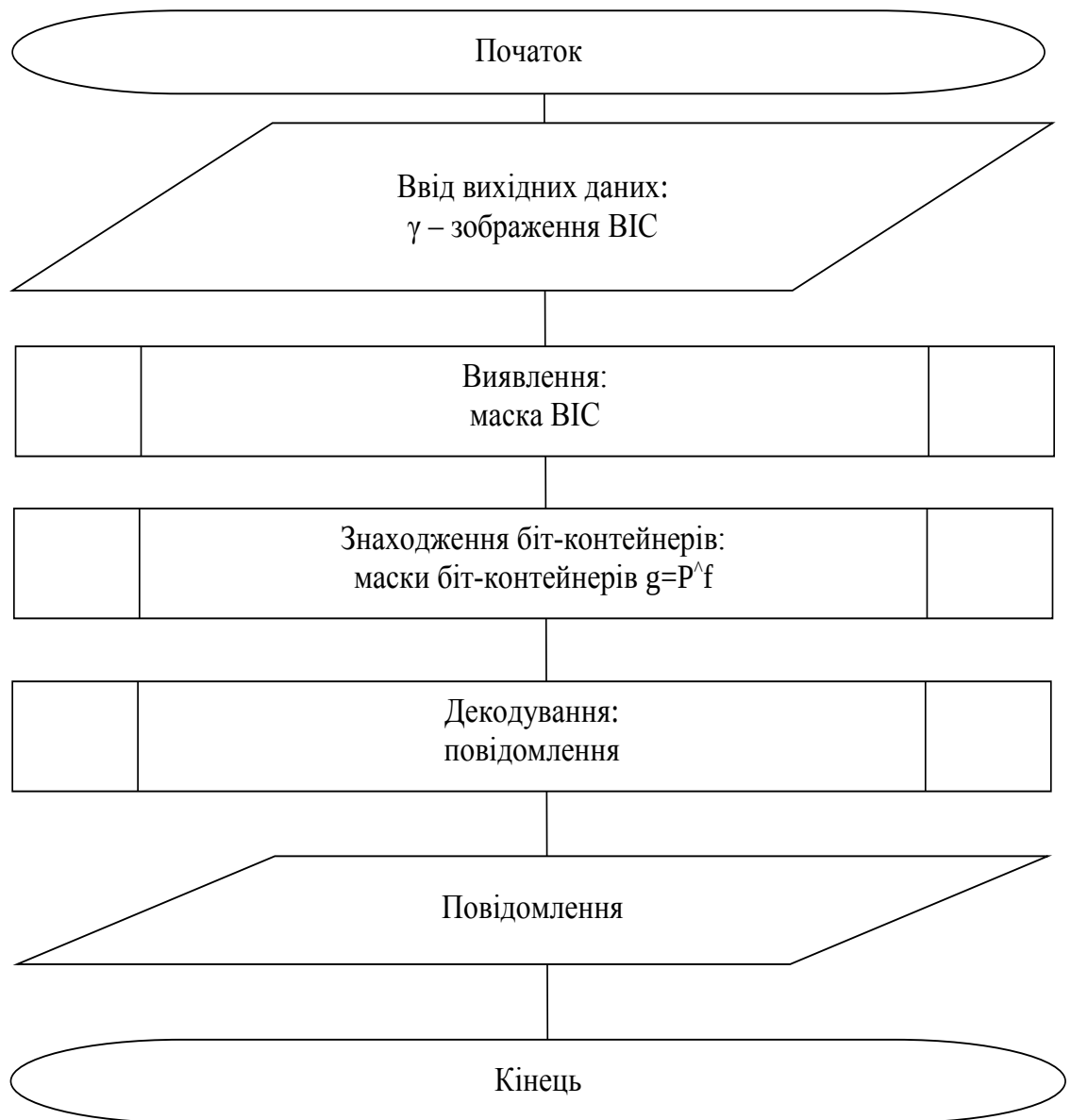


Рисунок 2.7 – Метод використання ВІС в якості стійкого матричного коду

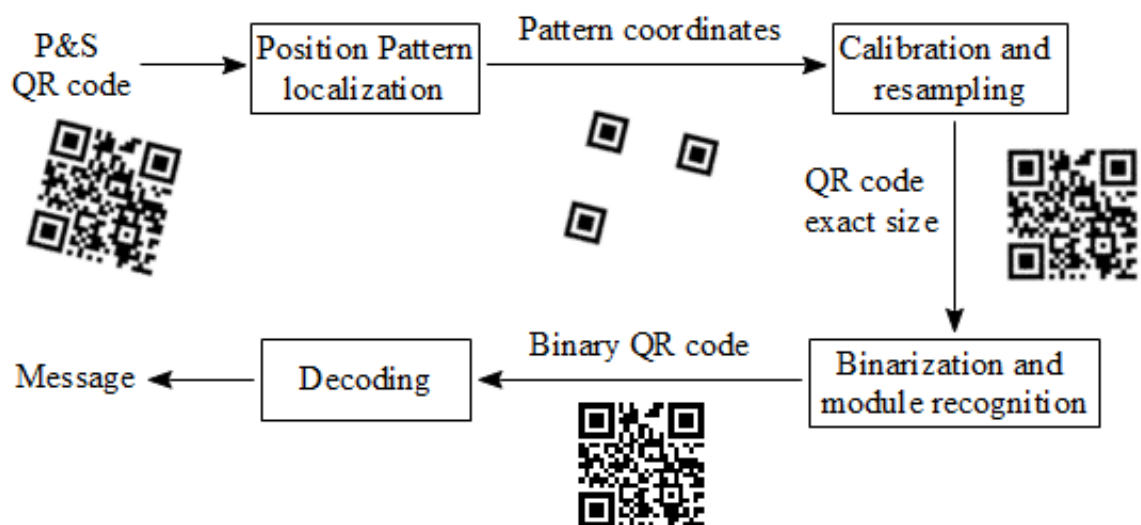


Рисунок 2.8 – Основні етапи розпізнавання QR-коду [219]

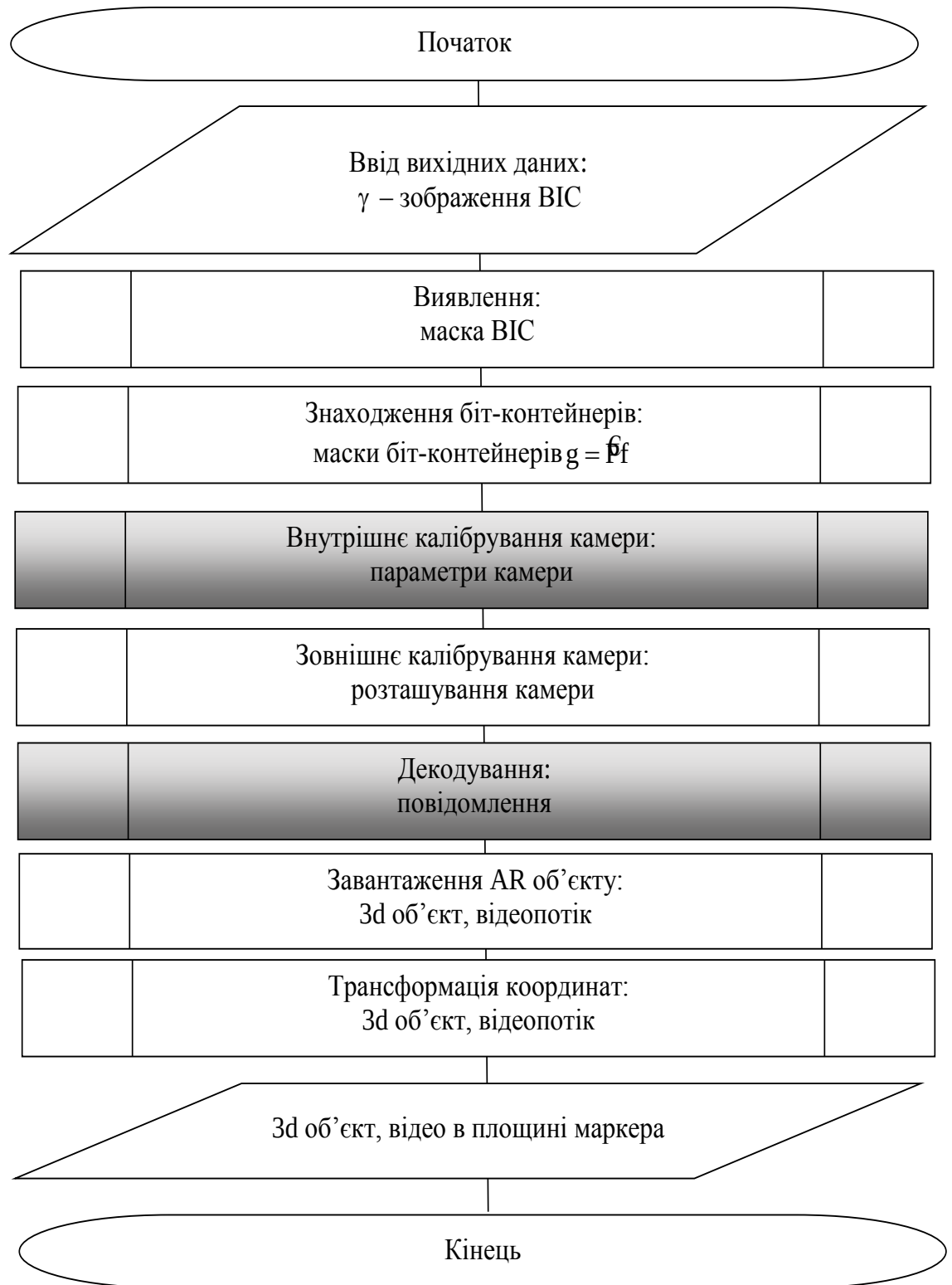
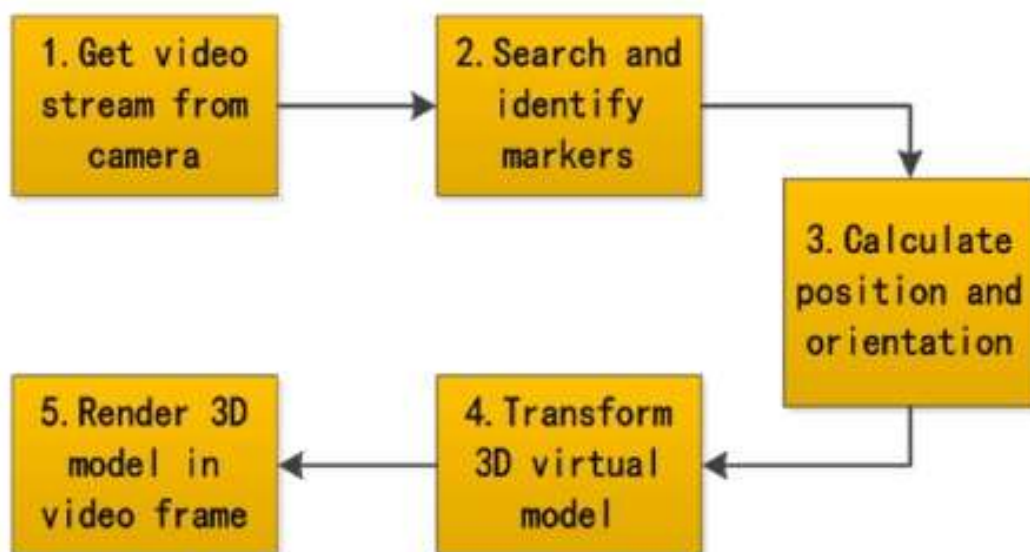
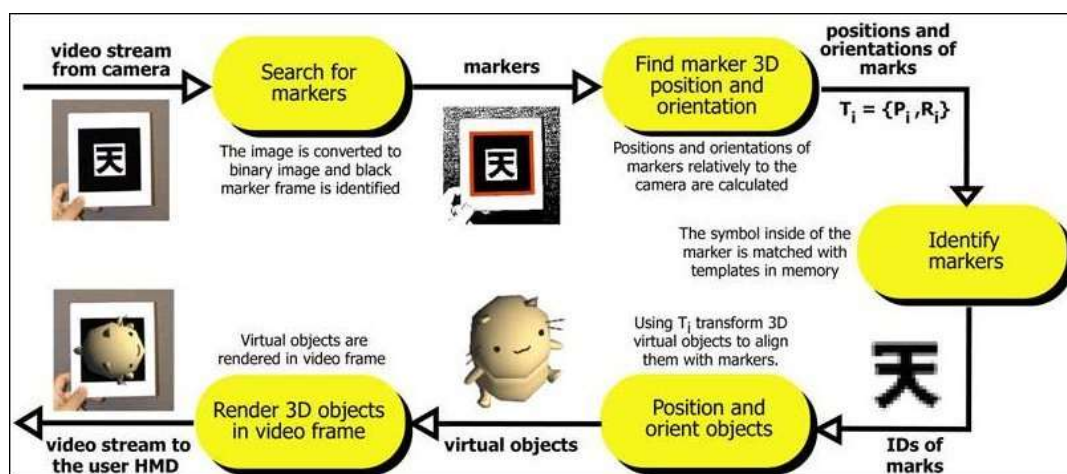


Рисунок 2.9 – Метод використання ВІС в якості візуального маркера доповненої реальності; блоки, що не використовуються у стандартних методах використання візуальних маркерів (внутрішнє калібрування камери, декодування повідомлення) виділені сірим кольором



а)



б)

Рисунок 2.10 – Основні етапи роботи з AR-маркером: а) згідно роботи [220]; б) згідно роботи [221]

Основні відмінності запропонованого методу у порівнянні з існуючими є такі:

1) внаслідок відсутності виділених елементів синхронізації ВІС, на відміну від візуальних маркерів, надає можливість зовнішнього калібрування камери по будь-якій зв'язній області ВІС (потребує розробки спеціального алгоритму визначення параметрів проєктивного перетворення, який описано нижче);

2) ВІС, на відміну від візуальних маркерів, надає можливість внутрішнього калібрування камери, що дозволяє проводити фізично адекватну візуалізацію;

3) ВІС, на відміну від візуальних маркерів, надає можливість закодувати у повідомленні посилання на 3d об'єкт і/або відео-файл, які будуть використовуватися для візуалізації.

Так само, не конкретизуючи імплементацію процедур виявлення чи декодування, які суттєвим чином залежать від імплементації обраного методу побудови ВІС, зауважимо, що завдяки введеній надлишковості і стохастичному перевпорядкуванню даних, ВІС як матричний код надає можливість стійкого і криптозахищеного відтворення інформації в умовах втрат.

Висновки до розділу 2

1. З урахуванням формалізації опису ВІС з використанням методів теорії множин і відображень, загального опису ВІС методів їх обробки і технологій на мові теорії категорій запропоновано основні теоретичні основи побудови ВІС доповненої реальності. Теоретичні основи побудови ВІС доповненої реальності розглянуті у вигляді сукупності моделей, методів та інформаційних технологій побудови і використання ВІС доповненої реальності з урахуванням вимог до ВІС та критеріїв оцінки якості ВІС, які пов'язані між собою і реалізують прийоми, способи і методи, що забезпечують побудову і використання ВІС доповненої реальності.

2. Отримали подальший розвиток теоретичні основи побудови і використання ВІС доповненої реальності, які, на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного

формування, перетворення та декодування візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем доповненої реальності.

3. Удосконалено модель ВІС доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

4. Сформульовано основні вимоги до ВІС доповненої реальності, а саме:

- помітність: ВІС повинні легко і швидко знаходитися у відео-потоці;

- простота: ВІС повинні бути побудовані з використанням мінімальної кількості кольорів (або градацій сірого);

- інформативність: ВІС повинні містити додаткову інформацію (повідомлення); дана вимога – основна, яка відрізняє ВІС від існуючих типів візуальних маркерів доповненої реальності; наявність додаткової інформації дозволяє суттєвим чином розширити сферу застосування ВІС, в першу чергу завдяки розширенню інтерактивності і універсальності застосувань;

- орієнтованість: ВІС повинні дозволяти визначати положення камери в момент отримання кожного кадру, де виявлено ВІС;

- робастність: ВІС повинні задовільняти вимоги інформативності та робастності при втраті до 50% інформації про ВІС (наприклад, при закритті зображення ВІС завадою чи фізичній відсутності будь-якої частини ВІС);

- криптостійкість: повідомлення, що закодоване у ВІС повинно бути стійким до криптоатак;

- універсальність: технології обробки ВІС повинні використовувати мінімум апріорної інформації.

5. Визначено показники якості ВІС та критерії їх оцінки.

Список використаних джерел у розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [51], [74]–[79], [81], [83], [90], [93]–[94], [99], [103], [209]–[221].

3 МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ МОЗАЇЧНИХ СТОХАСТИЧНИХ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

У даному розділі розроблені модель мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності; метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації, метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, метод рендерингу відеопотоку в області маркера доповненої реальності.

Матеріали розділу викладені в роботах [75]–[79], [80], [83]–[84], [85]–[90], [92], [93], [95]–[98], [100]–[102], [104].

3.1 Модель стійкого мозаїчного стохастичного візуального маркера доповненої реальності

Покажемо тепер, як на основі введеної у попередньому розділі абстрактної моделі ВІС, представленій у вигляді композиції деяких операторів, отримати конкретну модель стійкого мозаїчного стохастичного візуального маркера доповненої реальності [75]–[79].

Для опису моделі стійкого мозаїчного стохастичного візуального AR-маркера використаємо QR-код у якості зображення-повідомлення (рис. 3.1) і представимо конкретні реалізації операторів (2.1)–(2.3), що

використовувались для опису моделі ВІС:

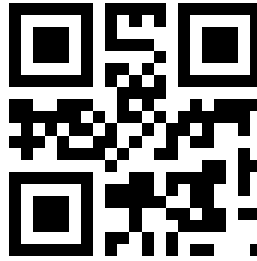


Рисунок 3.1 – Зображення-повідомлення (QR-код розміром $N = 21$, в якому задовано повідомлення «Hello, world!»)

1. Оператор введення надлишковості $\mathcal{S}$ пропонується реалізувати у вигляді процедури масштабування бінарного зображення-повідомлення у задане число разів k методом найближчого сусіда, що можна формалізувати у вигляді:

$$f^{(m,n)}(i,j) = f_0(m,n), \quad (3.1)$$

де, як і раніше, f_0 – зображення-повідомлення; f – блочно-збільшене зображення; (m,n) – координати пікселів у зображенні-повідомленні i , відповідно, блоків у збільшеному зображенні; $(i,j) = 0..k-1$ – координати пікселів в межах кожного блоку. Теоретична оцінка допустимого розміру блоку k проводиться нижче на основі аналізу умови робастності.

2. Оператор стохастичного перевпорядкування даних $\mathcal{P}$ пропонується реалізувати у вигляді процедури перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки p , що можна записати у вигляді:

$$g^{(m',n')} = f^{(m',n')}[p] \quad (3.2)$$

де g – блочно-пермутоване зображення; індекси (m', n') , нумерують блоки (рис. 3.2).

Зауважимо, що розмір блоку перемішування b у загальному випадку не співпадає з k . Теоретична оцінка допустимого розміру блоку перемішування b проводиться нижче на основі аналізу умови криптостійкості.



Рисунок 3.2 – Пермутоване зображення

3. Оператор додавання мозаїчного біт-контейнера $\mathcal{B}$ пропонується реалізувати у вигляді процедури кодування кольором клітинок маркера, які розділяються рамкою з проміжним кольором. Нагадаємо, що зображення g є бінарним, кожен піксель його піксель приймає значення 0 і 1, які кодуються кольорами клітинок маркера c_0 і c_1 відповідно; клітинки розділяються рамкою з проміжним кольором c_2 , що можна записати у вигляді:

$$\gamma^{(m'',n'')}(i,j)=\begin{cases} c_1g(m'',n'')+c_0(1-g(m'',n'')), & a_1 < (i,j) < a_0-a_1 \\ c_2, & (i,j) \leq a_1, (i,j) \geq a_0-a_1 \end{cases} \quad (3.3)$$

де (m'',n'') – координати пікселів у пермутованому зображенні g і, відповідно, блоків у зображенні маркера γ ; $(i,j)=0..a_0-1$ – координати пікселів в межах кожного блоку; a_0 – розмір клітинки; a_1 – розмір рамки (рис. 3.3). Теоретична оцінка значень кольорів c проводиться нижче на основі аналізу умови простоти.



Рисунок 3.3 – Зображення AR-маркера

Таким чином, вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності та метод їх формування, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення методом

найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності.

3.2 Метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

Для виявлення мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, модель якого наведена у п. 3.1 (див. рис. 3.3), в роботі запропоновано метод, структурна схема якого наведена на рис. 3.4 [78].



Рисунок 3.4 – Структурна схема методу виявлення мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

3.2.1 Попередня обробка вихідного зображення

Попередня обробка вхідного зображення включає в себе перехід від кольорового до зображення у градаціях сірого.

Формально це можна записати у вигляді

$$g = \frac{1}{255}(0,2989 \cdot R + 0,5870 \cdot G + 0,1140 \cdot B), \quad (3.4)$$

де R , G , B – відповідні кольорові компоненти вихідного зображення у RGB-представленні; g – зображення у градаціях сірого; коефіцієнти перетворення співпадають з коефіцієнтами для обчислення каналу яскравості при переході від RGB до NTSC-представлення; коефіцієнт $\frac{1}{255}$ вводиться для зручності – для нормування динамічного діапазону яскравості від 0..255 до 0..1.

3.2.2 Знаходження області маркера

Враховуючи, що AR-маркер містить тільки 3 значення градації сірого $\{0, 1/2, 1\}$, пропонується для його детектування на зображенні f використовувати операцію знаходження локального стандартного відхилення по квадратній області. На границі між клітинками AR-маркера локальне стандартне відхилення буде максимальним і малим для гладких областей зображення. Оскільки всі координати на зображеннях задаються цілими числами, то розмір області зручно (для симетрії) вибирати непарним числом.

Для квадратної області розміром $(2a+1) \times (2a+1)$ з центром у точці з координатами (x, y) маємо, що

$$\sigma(x, y) = \frac{1}{(2a+1)^2} \sum_{m=-a}^a \sum_{n=-a}^a (f(x+m, y+n) - \mu(x, y))^2, \quad (3.5)$$

де $\mu(x, y)$ – локальне середнє, що розраховується аналогічно

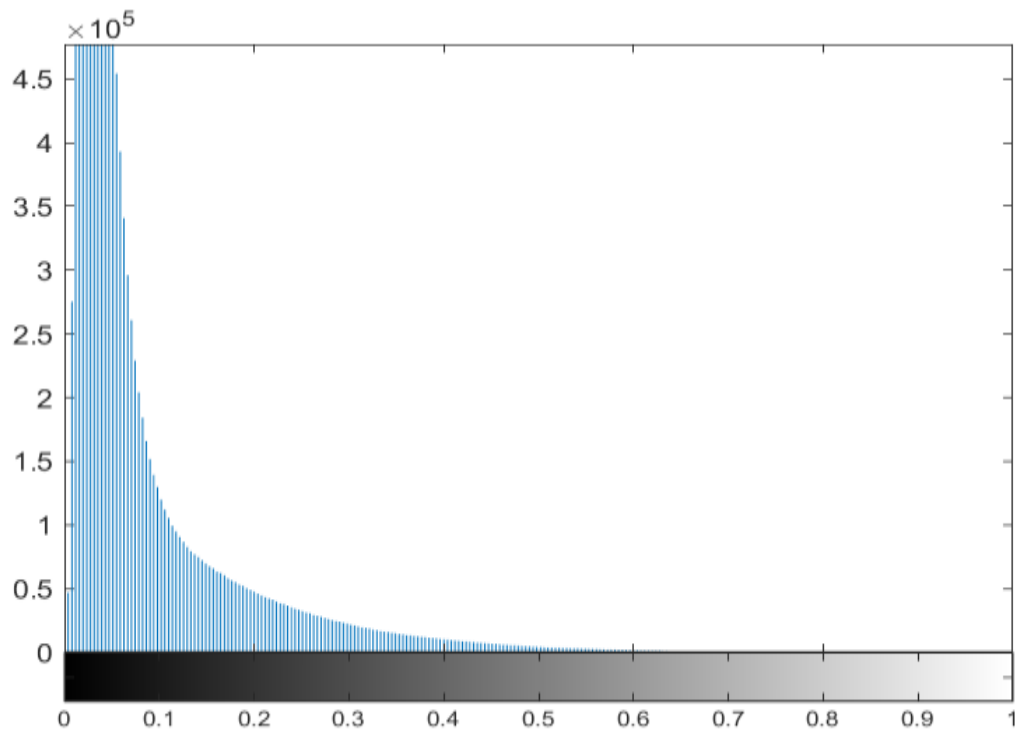
$$\mu(x, y) = \frac{1}{(2a+1)^2} \sum_{m=-a}^a \sum_{n=-a}^a f(x+m, y+n) \quad (3.6)$$

Наступним кроком необхідно бінаризувати це зображення.

Оскільки гістограма зображення локального стандартного відхилення є унімодальною у загальному випадку (рис. 3.5), то стандартна бінаризація по Отсу, що добре працює для бімодальних розподілів, у даному випадку буде давати завищений поріг, що призведе до втрати частини корисної інформації [229].

У даній роботі пропонується бінаризацію проводити за допомогою сегментації методом К-середніх. Найпростішим способом є сегментація на $K=2$ класи (фон, об'єкт), але у даному випадку це дасть результати, близькі до бінаризації по Отсу. Тому пропонується використовувати $K=3$ класи – фон, проміжні значення, об'єкт.

Тоді бінарне зображення отримується як об'єднання масок класів, що не належать фону. Фон визначається як клас який має найменше середнє значення яскравості. Оскільки фон займає найбільшу площу, то він визначається найкраще.



Р

исунок 3.5 – Гістограма зображення локального стандартного відхилення

Збільшення числа класів $K > 3$ суттєво не змінює результати і є недоцільним.

Отримане бінаризоване зображення обробляється за допомогою операцій математичної морфології. Для заповнення внутрішніх областей пропонується використовувати операцію морфологічного замикання з квадратним вікном, при цьому розмір вікна задає максимальний розмір порожнин, які будуть заповнені. У даній роботі запропоновано використовувати вікно розміром 63×63 .

Наступним кроком знаходиться найбільша по площі 4-зв'язна область. Надалі є сенс відкинути неінформативні області зображення і в якості області AR-маркера брати прямокутний фрагмент, в який вписана його маска. Всі подальші операції будуть проводитися тільки для частини зображення, що виділяється цією маскою.

3.2.3 Знаходження біт-контейнерів

Для визначення біт-контейнерів – інформаційних елементів-клітинок, колір яких кодує інформаційні біти, пропонується аналогічно до визначення області AR-маркера використовувати сегментацію зображення AR-маркера на $K=3$ класи за допомогою алгоритму K -середніх (k-means), який дає найкращі результати [80], [82], [84]–[90], [93], [95]–[98], [100]–[102], [104].

Слід зауважити, що алгоритм K -середніх призначає індекси класів довільним чином і для отримання картинки, що виглядає більш подібно до вихідного зображення, отримані індекси слід впорядкувати по зростанню середнього значення яскравості кожного класу.

Маючи правильно впорядковані індекси класів, можемо виділити маски клітинок, що відповідають кожному біту. Біт 0 кодується чорним кольором, йому буде відповідати клас з найменшим індексом, що рівний 1. Біт 1 кодується білим кольором, йому буде відповідати клас з найбільшим індексом, що рівний 3.

Наступним кроком є фільтрація масок біт-контейнерів, що ефективно виконується за допомогою операції морфологічного розмикання по квадратному вікну. Певною проблемою є вибір розміру вікна, такого, щоб максимально відфільтровувались артефакти і при цьому не видалялись інформаційні елементи.

Для вибору оптимального розміру вікна пропонується наступне. Порахуємо кількість $N(a)$ всіх 4-зв'язних областей на бінарному зображенні, що залишилися після операції морфологічного розмикання, як функцію розміру вікна фільтрації a (рис. 3.6).

Функція $N(a)$ спочатку спадає, оскільки із зростанням розміру вікна відфільтровується все більше областей, далі для певного діапазону розмірів

виходимо на плато – кількість областей залишається незмінною, оскільки розмір вікна є меншим за типовий розмір клітинки. При подальшому збільшенні розміру вікна функція $N(a)$ знову буде спадати, тому що почнуть відфільтровуватися клітинки.

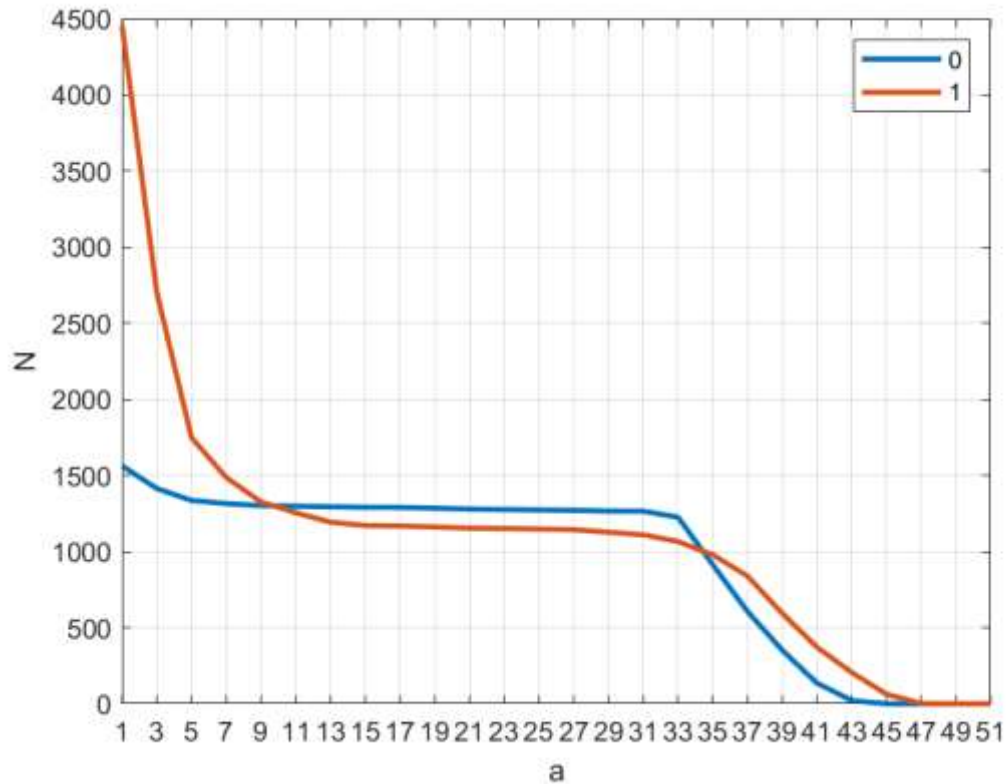
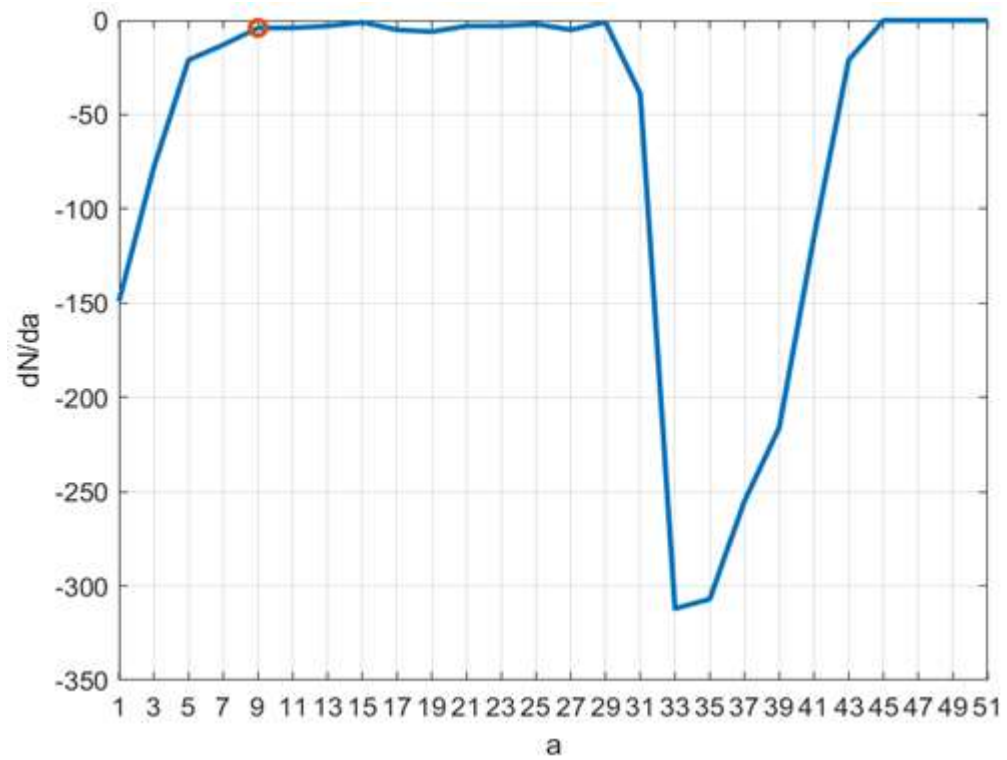
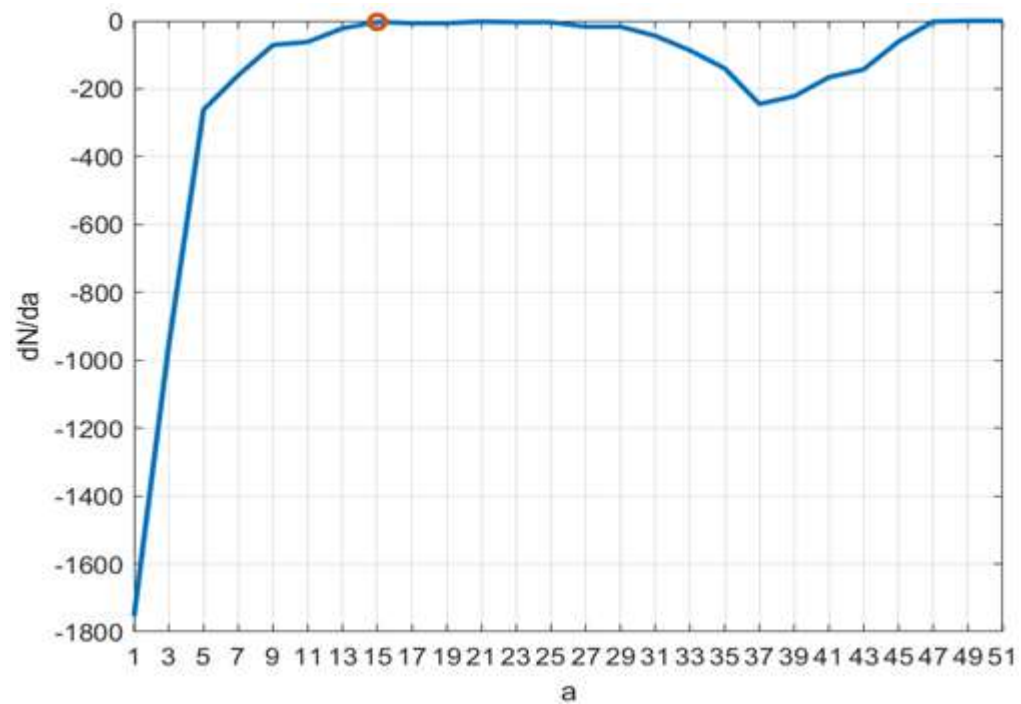


Рисунок 3.6 – Функція $N(a)$, порашована для кожної маски біт-контейнера

Таким чином, для визначення розміру вікна, необхідно знайти точку, при якій функція $N(a)$ виходить на плато. Це буде означати, що шум вже відфільтрувався, а клітинки ще ні. Оскільки функція $N(a)$ є незростаючою (за побудовою!), то для знаходження цієї точки достатньо знаходити перший максимум похідної $\frac{dN}{da}$ (рис. 3.7).



a)



б)

Рисунок 3.7 – Графіки похідної $\frac{dN}{da}$ для кожною маски біт-контейнера,

кружечком позначена точка першого максимуму: а) для 0; б) для 1

З урахуванням перспективних спотворень зображення описана поведінка функції $N(a)$ робиться менш визначеною, оскільки частина клітинок на дальній частині зображення буде меншого розміру ніж шум на ближній частині, однак, як показали проведені експерименти, запропонований спосіб визначення оптимального розміру вікна фільтрації дає непогані результати – як буде показано далі для пропонованих алгоритмів є менш критичним втрата певної кількості інформаційних клітинок, ніж наявність шумових областей.

Морфологічна фільтрація ефективно усуває тільки ті області, що є меншими за розмір клітинки, для фільтрації областей, що є значно більшими за цей розмір необхідно використовувати інший метод.

Якщо дрібні артефакти виникають через дефекти бінаризації, то природа цього шуму інша – це або завади, що закривають частину області контейнера, наприклад, рука або інший предмет, або частина клітинок, що «склеїлися» разом внаслідок нерівномірності освітлення.

Для усунення такого шуму пропонується використовувати статистичну фільтрацію по розміру зв'язних областей – відфільтровуються всі області, площа яких більша за 3 стандартних відхилення від середнього значення. Для збільшення ефективності даний метод використовується ітеративно. У даній роботі пропонується кількість ітерацій – 3.

Таким чином, вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення.

3.3 Метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації

Для подальшої роботи пропонованих алгоритмів необхідно прив'язати кожен клітинку біт-контейнера до координатної сітки. При наявності геометричних спотворень сітка також повинна бути перетворена відповідним чином.

В принципі існує два способи вирішення цієї задачі [76]:

- прямий пошук системи ліній, що проходять через кожен клітинку;
- пошук параметрів проективного перетворення для отримання прямокутної системи клітинок, задача прив'язки у цьому випадку зводиться до знаходження системи взаємно перпендикулярних ліній, які паралельні до сторін зображення.

Розглянемо кожен із цих способів окремо.

3.3.1 Прямий пошук системи ліній, що проходять через кожен клітинку

Для прямого пошуку системи ліній, що проходять через кожен клітинку найбільш підходящим способом є перетворення Хафа. Але, як свідчать результати поставлених експериментів, перетворення Хафа не вирішує поставлену задачу (рис. 3.8) [92], [100]–[102].

Проблема в тому, що для регулярної системи точок, а точніше зв'язних неточкових областей, перетворення Хафа знаходить велику кількість "шумових" піків, що відповідають, для прикладу, діагональним лініям.

Інша проблема – вибір правильного кроку дискретизації по радіусу і по куту, що у даному випадку є нетривіальною задачею і вимагає певної апріорної інформації – наприклад, розміру клітинки, – що зменшує універсальність даного підходу.

Таким чином, використання перетворення Хафа для прямого пошуку системи ліній, що проходять через кожну клітинку є недоцільним.

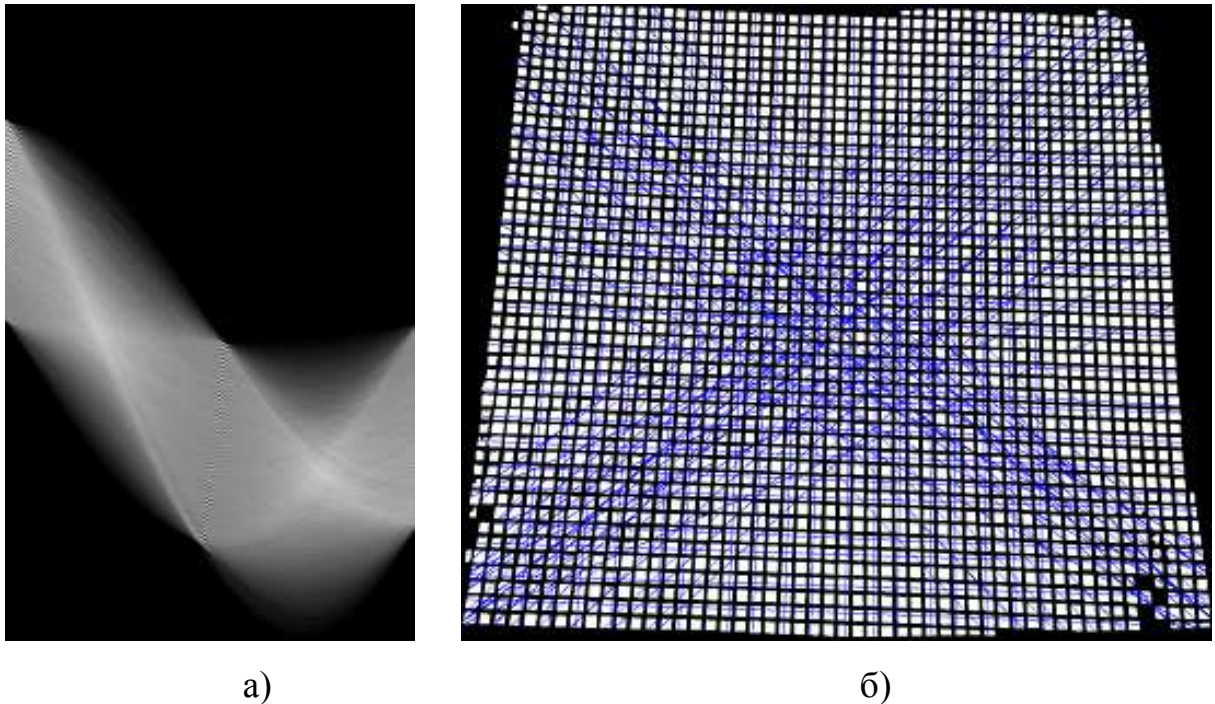


Рисунок 3.8 – Перетворення Хафа: а) матриця перетворення, крок по радіусу – 3 піксела, по куту – $0,1^\circ$; б) результат знаходження ліній

3.3.2 Визначення параметрів проективного перетворення

Для детального опису методів відстеження точкових особливостей, калібрування камери і реконструкції тривимірних об'єктів необхідно ввести модель перспективного проєціювання і описати геометричні властивості

цього перетворення (рис. 3.9). Точки декількох зображень, отриманих за допомогою перспективної проєкції, знаходяться в особливих відношеннях одна з одною, які описуються епіполярною геометрією. Моделі цих відношень повинні бути детально розглянуті, тому що практично всі методи тривимірної реконструкції вимагають оцінки відповідних моделей і спираються на їх властивості [42].

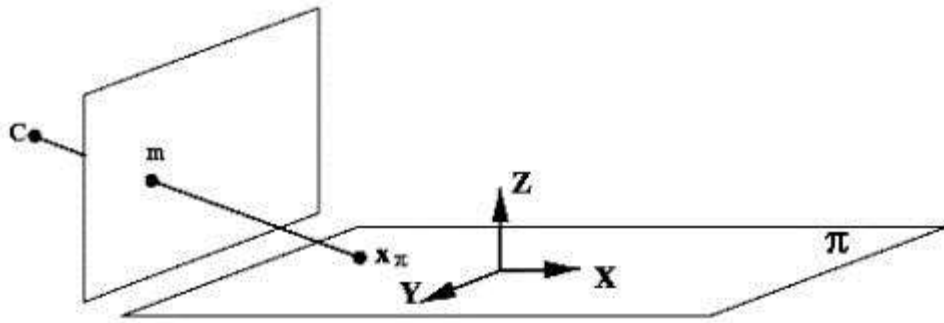


Рисунок 3.9 – Перспективне перетворення площини – проєктивне перетворення (гомографія)

Найпростіший випадок перспективного перетворення площини називається *проєктивним перетворенням*.

Розглянемо площину, що задається рівнянням $Z=0$, однорідні тривимірні координати будь-якої її точки можна представити у виді $M=(X,Y,0,1)$. Для будь-якої камери з матрицею проєціювання камери P , перспективне перетворення площини описується матрицею розмірності 3×3 :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$

Оскільки будь-яку площину в 3-вимірному просторі можна перевести в площину $Z=0$ евклідовим перетворенням повороту і перенесення, що еквівалентно домноженню матриці проєціювання камери P на деяку матрицю перетворення E , то перспективне відображення довільної площини в просторі описується лінійним перетворенням з матрицею розмірності 3×3 .

Проективне перетворення часто також називають *гомографією*. У матричній формі проективне перетворення (гомографія) записується як:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3.8)$$

де введено матрицю

$$H = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{34} \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Якщо вся сцена або її частина являє собою площину, то її зображення, що створені камерами з незбіжними центрами, можна перевести одне в одне перетворенням гомографії:

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

де (x_i, y_i) і (x'_i, y'_i) – набори точок на зображеннях; індекс $i=1..n$ нумерує відповідні точки; n – загальна кількість точок.

Переходячи від однорідних координат до звичайних, отримуємо систему рівнянь:

$$x'_i = \frac{h_{00}x_i + h_{01}y_i + h_{02}}{h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}}, \quad (3.11)$$

$$y'_i = \frac{h_{10}x_i + h_{11}y_i + h_{12}}{h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}}, \quad (3.12)$$

або

$$x'_i (h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}) = h_{00}x_i + h_{01}y_i + h_{02}, \quad (3.13)$$

$$y'_i (h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}) = h_{10}x_i + h_{11}y_i + h_{12}, \quad (3.14)$$

що можна переписати у вигляді рівнянь відносно вектора невідомих коефіцієнтів $\mathbf{h}$:

$$\begin{pmatrix} x_i & y_i & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_i x_i & -x'_i y_i & -x'_i \\ 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & 1 & -y'_i x_i & -y'_i y_i & -y'_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{00} \\ h_{01} \\ h_{02} \\ h_{10} \\ h_{11} \\ h_{12} \\ h_{20} \\ h_{21} \\ h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

Щоб знайти матрицю проективного перетворення, необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1 x_1 & -x'_1 y_1 & -x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1 x_1 & -y'_1 y_1 & -y'_1 \\ & & & & & \vdots & & & \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_n x_n & -x'_n y_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_n x_n & -y'_n y_n & -y'_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{00} \\ h_{01} \\ h_{02} \\ h_{10} \\ h_{11} \\ h_{12} \\ h_{20} \\ h_{21} \\ h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

або

$$A\mathbf{h} = \mathbf{0}, \quad (3.17)$$

де введено матрицю

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1 x_1 & -x'_1 y_1 & -x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1 x_1 & -y'_1 y_1 & -y'_1 \\ & & & & & \vdots & & & \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_n x_n & -x'_n y_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_n x_n & -y'_n y_n & -y'_n \end{pmatrix}, \quad (3.18)$$

вектор змінних

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} h_{00} \\ h_{01} \\ h_{02} \\ h_{10} \\ h_{11} \\ h_{12} \\ h_{20} \\ h_{21} \\ h_{22} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

та $\mathbf{0}$ -вектор

$$\mathbf{0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Система (3.17) є перевизначеною у загальному випадку, оскільки розмір матриці $A \in 2n \times 9$, вектора $\mathbf{h}: 9 \times 1$, а вектора $\mathbf{0}: 2n \times 1$. Тому розв'язок зводиться до мінімізації методом найменших квадратів:

$$\min \|\mathbf{A}\mathbf{h} - \mathbf{0}\|_2. \quad (3.21)$$

Оскільки $\mathbf{h}$ визначено з точністю до масштабу, то розв'язок шукаємо для одиничного по модулю вектора $\tilde{\mathbf{h}}$, при цьому розв'язок $\tilde{\mathbf{h}}$ є власним вектором добутку матриць $A^T A$ для найменшого власного значення цього добутку (псевдообернення Мура-Пенроуза, [82], [222]– [227]).

Отже, проєктивне перетворення задається 8 параметрами і для їх

знаходження достатньо знайти 4 опорні точки, які є вершинами прямокутника у неспотвореному зображенні (рис. 3.10).

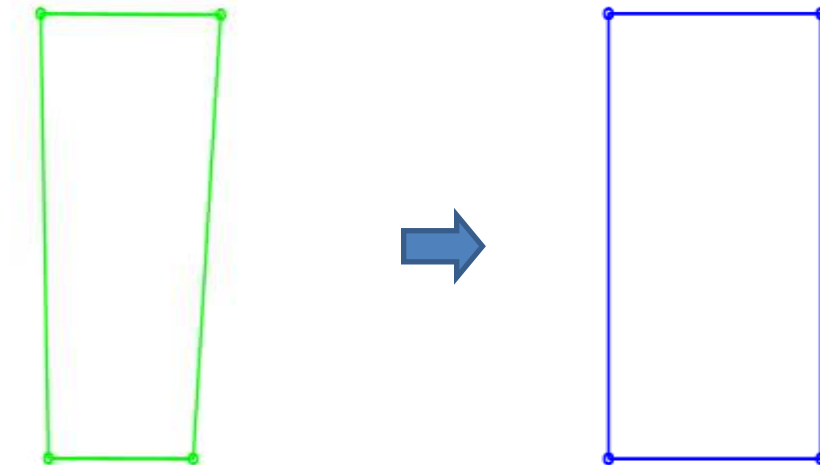


Рисунок 3.10 – Проективне перетворення 4 точок

3.3.3 Пошук опорних точок

Для пошуку опорних точок запропоновано підхід, що ґрунтується на двох основних ідеях, які відрізняють його від існуючих [76], [95]:

- перехід замість координатного простору в індексний, тобто замість прямого задання координат на зображенні задаються індекси клітинок (при чому порядок індексування може бути довільним), а координати знаходяться як функція множини точок клітинки, наприклад їх центроїд (центр мас);
- вибір підходящої цільової функції, яка приймає гострий екстремум для прямокутної системи точок.

Щодо вибору цільової функції, то зауважимо, що вектори усереднення по рядках (стовпцях) для проективно спотвореного бінарного зображення біт-

контейнера b представляють собою нерегулярні структури (рис. 3.11), в той час аналогічні вектори, побудовані для прямокутної системи точок є більш регулярними (рис. 3.12).

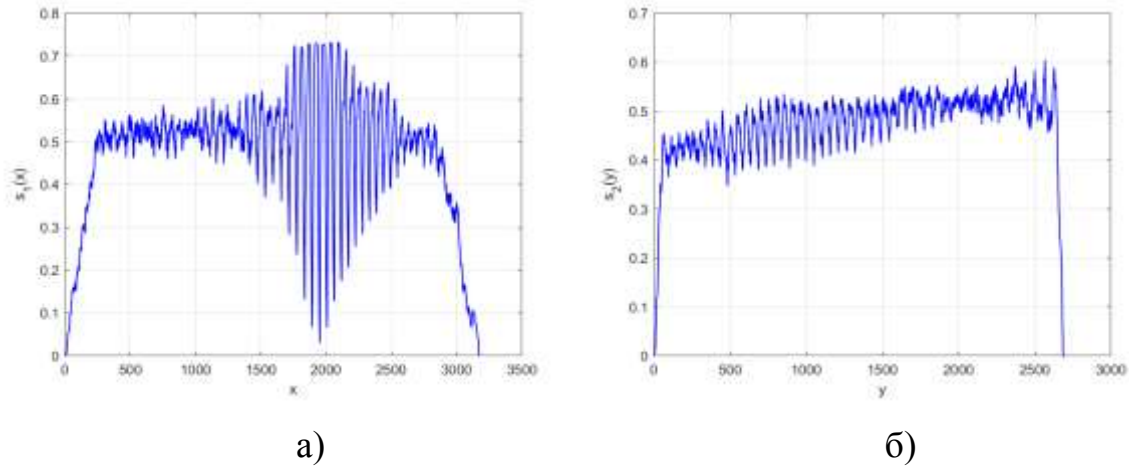


Рисунок 3.11 – Графіки усереднення для проективно-спотвореного зображення b : а) по стовпцях; б) по рядках

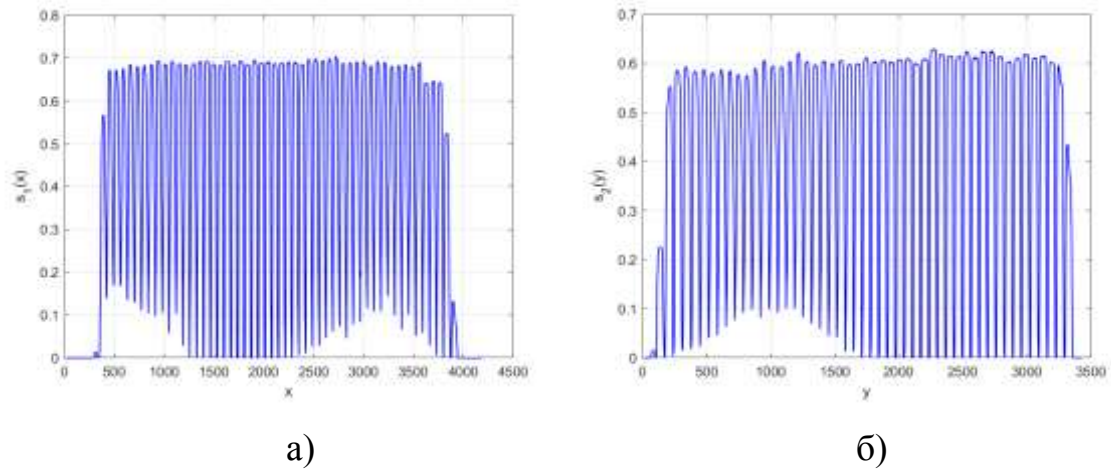


Рисунок 3.12 – Графіки усереднення для вирівняного зображення b' : а) по стовпцях; б) по рядках

Очевидно, що у другому випадку дисперсія D такого вектора буде більше. Покажемо, що це справді так [97]. Визначимо для початку функції:

$$s_1(x) = \frac{1}{h} \sum_y b_{x,y}, \quad (3.22)$$

$$s_2(y) = \frac{1}{w} \sum_x b_{x,y}, \quad (3.23)$$

де w, h – довжина і ширина зображення b відповідно.

Область значення цих функцій – інтервал $0..1$. Для регулярних векторів в якості простої моделі розглянемо послідовність

$$s_{1,2} = \{1, 0, 1, 0, \dots\} = \{a, b, a, b, \dots\}, \quad (3.24)$$

де в даному випадку маємо $a=1$, $b=0$ – локальні максимуми/мінімуми відповідно.

У такому випадку середнє значення:

$$s_{1,2} = \frac{a+b}{2}, \quad (3.25)$$

а дисперсія (незміщена)

$$D(s_{1,2}) = \frac{N}{N-1} \frac{a^2 - b^2}{4}, \quad (3.26)$$

де N – це кількість елементів у векторі, для $s_1(x)$ маємо, що $N=w$; для

$s_2(y)$ буде $N=h$. Для достатньо великих $N \gg 1$ маємо, що $\frac{N}{N-1} \approx 1$, отже

незміщена дисперсія буде рівна

$$D(s_{1,2}) \approx \frac{a^2 - b^2}{4} \quad (3.27)$$

Оскільки $a \leq 1$, $b \geq 0$, то максимум різниці $a^2 - b^2$ досягається при $a = 1$, $b = 0$, тобто

$$D(s_{1,2}) \leq \frac{1}{4}. \quad (3.28)$$

Нерегулярні вектори ми будемо представляти як послідовність достатньо довгих (щоб справджувалося співвідношення $\frac{N_i}{N_i - 1} \approx 1$) регулярних частин

$$s_{1,2} = \{a_1, b_1, a_1, b_1, \dots, a_2, b_2, a_2, b_2, \dots\}. \quad (3.29)$$

Тоді

$$D(s_{1,2}) \approx \sum_i \frac{a_i^2 - b_i^2}{4} \frac{N_i}{N} = \frac{a_i^2 - b_i^2}{4} \leq \frac{1}{4}. \quad (3.30)$$

Рівність буде досягатися тільки, якщо всі $a_i = 1$, $b_i = 0$.

Таким чином, пропонується цільову функцію для даного алгоритму визначати як:

$$s(b) = D\left(\frac{1}{h} \sum_y b_{x,y}\right) + D\left(\frac{1}{w} \sum_y b_{x,y}\right). \quad (3.31)$$

У загальному пропонований алгоритм визначення точок, по яких розраховується трансформація, складається із таких кроків:

1. Встановлюємо лічильник ітерацій в 0 (індексація для ненульової кількості елементів проводиться, як було сказано вище, з 1; для порожніх множин і початкових ініціалізацій індекс зручно задавати 0):

$$t = 0. \quad (3.32)$$

2. Розрахуємо цільову функцію для бінарного зображення біт-контейнера b :

$$s_0 = s(b). \quad (3.33)$$

3. Вибираємо 4 фіксовані точки P^0 , що задають прямокутник у неспотвореному зображенні, їх зручно вибирати як

$$P_1^0 = (1,1), P_2^0 = (1,1), P_3^0 = (w,1), P_4^0 = (w,h). \quad (3.34)$$

4. Вибираємо 4 опорні точки.

Для ефективності краще їх вибирати наступним чином. Нехай $\{x, y\}$ – вектор центроїдів, знайдемо тоді індекси $ind_1..ind_4$ шуканих точок як

$$ind_1 = \underset{i}{\operatorname{argmin}} (+x_i + y_i), \quad (3.35)$$

$$ind_2 = \underset{i}{\operatorname{argmin}} (-x_i + y_i), \quad (3.36)$$

$$\text{ind}_3 = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(-x_i - y_i), \quad (3.37)$$

$$\text{ind}_4 = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(+x_i - y_i). \quad (3.38)$$

5. Інкрементуємо лічильник ітерацій:

$$t = t + 1. \quad (3.39)$$

6. В околі кожної із опорних точок знаходимо по $k=5$ (центральна точка і 4 сусідів в L_1 -метриці) найближчих сусідів в L_1 -метриці.

7. Для кожної із $j=1..k^4$ комбінацій по 4 точки:

– вибираємо поточну комбінацію точок P^j (рухомі точки);

– рахуємо матрицю проєктивного перетворення $H = H(P^j, P^0)$;

– проводимо геометричну трансформацію бінарного зображення b за допомогою знайденої матриці H :

$$b' = \mathcal{F}(b, H); \quad (3.40)$$

– рахуємо цільову функцію:

$$s'_j = s(b'). \quad (3.41)$$

8. Знаходимо мінімум цільової функції по всіх комбінаціях рухомих точок:

$$s_t = \min s' \quad (3.42)$$

і запам'ятовуємо комбінацію точок P' , що йому відповідає.

9. Порівнюємо поточне значення цільової функції із значенням на попередній ітерації: якщо $s_t < s_{t-1}$, тоді вивести збережену комбінацію P' , вихід; інакше – вибрати в якості опорних точок збережену комбінацію P' , перехід до кроку 5.

На виході описаного алгоритму отримуємо збережену комбінацію точок P' , з якої рахуємо матрицю проективного перетворення $H = H(P', P^0)$ і проводимо геометричну трансформацію бінарного зображення біт-контейнера. Трансформоване зображення представляє собою прямокутну систему точок.

На рис. 3.13 представлено графік зміни цільової функції в залежності від кількості ітерацій, на рис. 3.14 результат роботи алгоритму.

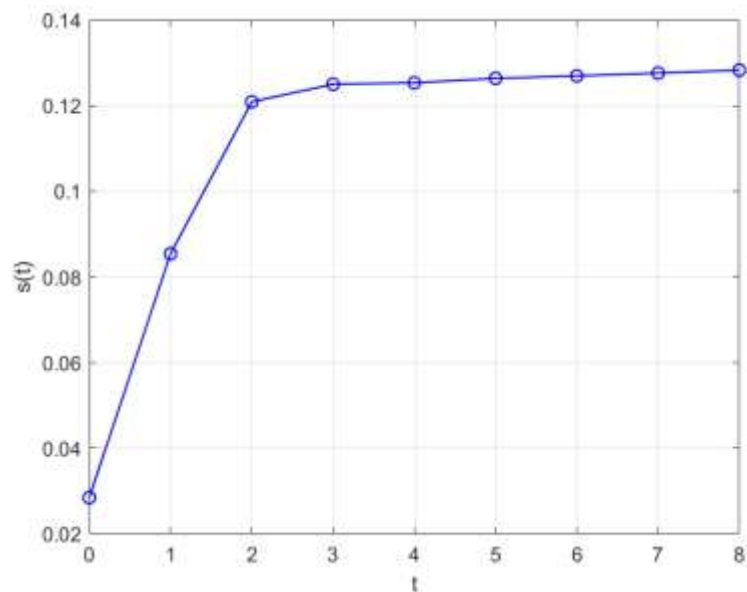


Рисунок 3.13 – Графік зміни цільової функції

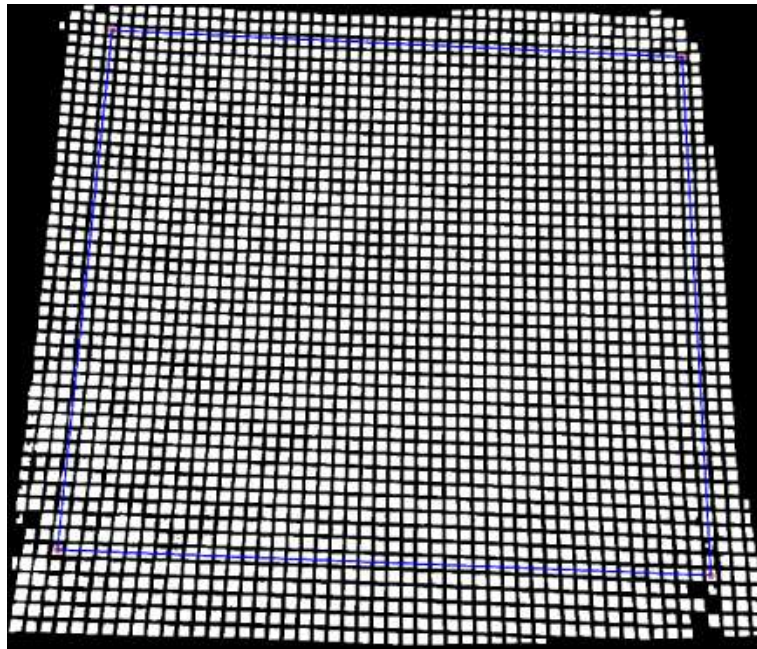


Рисунок 3.14 – Результат роботи алгоритму пошуку точок

Зауважимо, що початкова ініціалізація вибрана вдало, запропонований алгоритм вже на 4 ітерації по суті дозволяє правильно визначити шукану матрицю перетворення, тим не менш алгоритм збігається до дещо меншого 4-кутника опорних точок, оскільки на краях зображення присутні невеликі нелінійні спотворення, спричинені:

- а) нелінійністю оптичної системи смартфона;
- б) скручуванням по краях листка паперу після друку.

Використовуючи отриману матрицю H , проводимо трансформацію зображень AR-кода і його маски.

Таким чином, вперше розроблено метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апіорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера.

3.4 Метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

3.4.1 Визначення кількості рядків і стовпців

Для декодування маркера необхідно вирішити задачу визначення кількості рядків і стовпців у робочій області, що зручно зробити по трансформованому зображенню маски AR-кода [79].

Для цього скористаємося введеними вище функціями $s_1(x)$ і $s_2(y)$.

Так, щоб визначити кількість стовпців W , необхідно порахувати кількість перетинів знизу вгору функцією $s_1(x)$ лінії порога $\theta_1(x)$; аналогічно для визначення кількості рядків H порахуємо кількість перетинів знизу вгору функцією $s_2(y)$ лінії порога $\theta_2(y)$ (рис. 3.14):

$$W = \sum_x \frac{d}{dx} \text{sign}(s_1(x) - \theta_1(x)) \quad (3.43)$$

$$H = \sum_y \frac{d}{dy} \text{sign}(s_2(y) - \theta_2(y)) \quad (3.44)$$

де $\text{sign}(x)$ – функція, що повертає знак числа x .

Графіки функцій $s_1(x)$ і $s_2(y)$ ($s_{1,2}$) наведені на рис. 3.15.

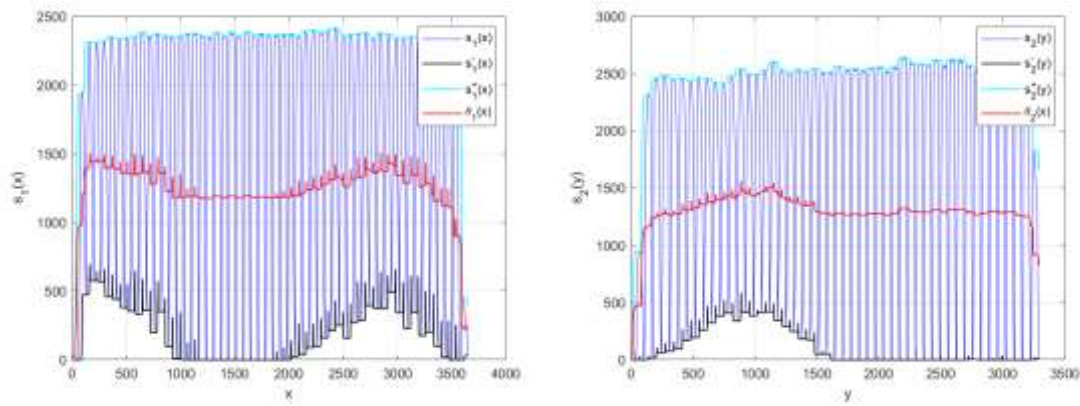


Рисунок 3.15 – Графіки функцій $s_1(x)$ і $s_2(y)$ ($s_{1,2}$) з огинаючими і порогами

Пропонується функції порогів $\theta_{1,2}$ визначати як середнє між верхньою і нижньою огинаючими відповідних функцій $s_{1,2}$:

$$\theta_{1,2} = \frac{1}{2}(s_{1,2}^+ + s_{1,2}^-) \quad (3.45)$$

де верхні огинаючі $s_{1,2}^+$ знаходяться за допомогою операції морфологічного розширення по відрітку $[a]$ (що еквівалентно локальному максимуму по цьому відрітку)

$$s_{1,2}^+ = \max_{[a]} s_{1,2}. \quad (3.46)$$

Аналогічно, нижні огинаючі $s_{1,2}^-$ знаходяться за допомогою операції морфологічного звуження по відрітку довжиною $[a]$ (що еквівалентно локальному мінімуму по цьому відрітку)

$$s_{1,2}^- = \min_{[a]} s_{1,2}. \quad (3.47)$$

У даній роботі прийнято $a = 63$.

3.4.2 Заповнення матриці біт-контейнера

Зробивши геометричну трансформацію біт-контейнера і визначивши H, W , можемо заповнити матрицю біт-контейнера $\gamma_{m,n}$ значеннями бітів [90]:

$$\gamma_{m(y),n(x)} = g'(y, x), \quad (3.48)$$

де $g'(y, x)$ – трансформоване зображення біт-контейнера, а індекси m, n є функціями відповідних координат x, y і розраховуються як

$$m(y) = \left\lfloor \frac{y - \min y}{\max y - \min y} (H - 1) \right\rfloor + 1, \quad (3.49)$$

$$n(x) = \left\lfloor \frac{x - \min x}{\max x - \min x} (W - 1) \right\rfloor + 1, \quad (3.50)$$

де $\lfloor x \rfloor$ – функція округлення знизу.

3.4.3 Визначення зсуву матриці біт-контейнера

На даному етапі ми маємо вже заповнену матрицю біт-контейнера γ ,

але, оскільки для обробки міг бути представлений тільки фрагмент зображення, матриця біт-контейнера може визначитися меншого розміру і ми повинні визначити положення заповненої матриці у матриці повного розміру Γ (в нашому випадку її розмір 63×63). Недостаючі значення, як і раніше, заповнимо 0.

Для вирішення цієї задачі основна ідея є така: переберемо послідовно всі можливі способи вписати існуючий фрагмент у матрицю повного розміру, після чого проведемо декодування (інверсну перестановку) і для декодованої матриці порахуємо деяку функцію, що має різкий екстремум для правильно дешифрованих зображень (аналогічно до попереднього розділу). Оскільки у правильно декодованому зображенні його пікселі будуть суттєво корельованими, то наша функція повинна приймати екстремальні значення для цього випадку.

Положення матриці біт-контейнера знаходиться з умови мінімуму цільової функції:

$$\{m_0, n_0\} = \arg \min_{m,n} s(\mathbf{P}^{-1}\Gamma). \quad (3.51)$$

Як було показано [103], в якості такої функції можемо взяти

$$s(\mathbf{P}^{-1}\Gamma) = \frac{1}{4} \left\langle \left| \nabla (\mathbf{P}^{-1}\Gamma) \right|^2 \right\rangle \quad (3.52)$$

де $\mathbf{P}^{-1}$ означає інверсну перестановку, трикутні дужки $\langle \dots \rangle$ позначають операцію усереднення, а коефіцієнт $1/4$ введено з міркувань зручності (рис. 3.16).

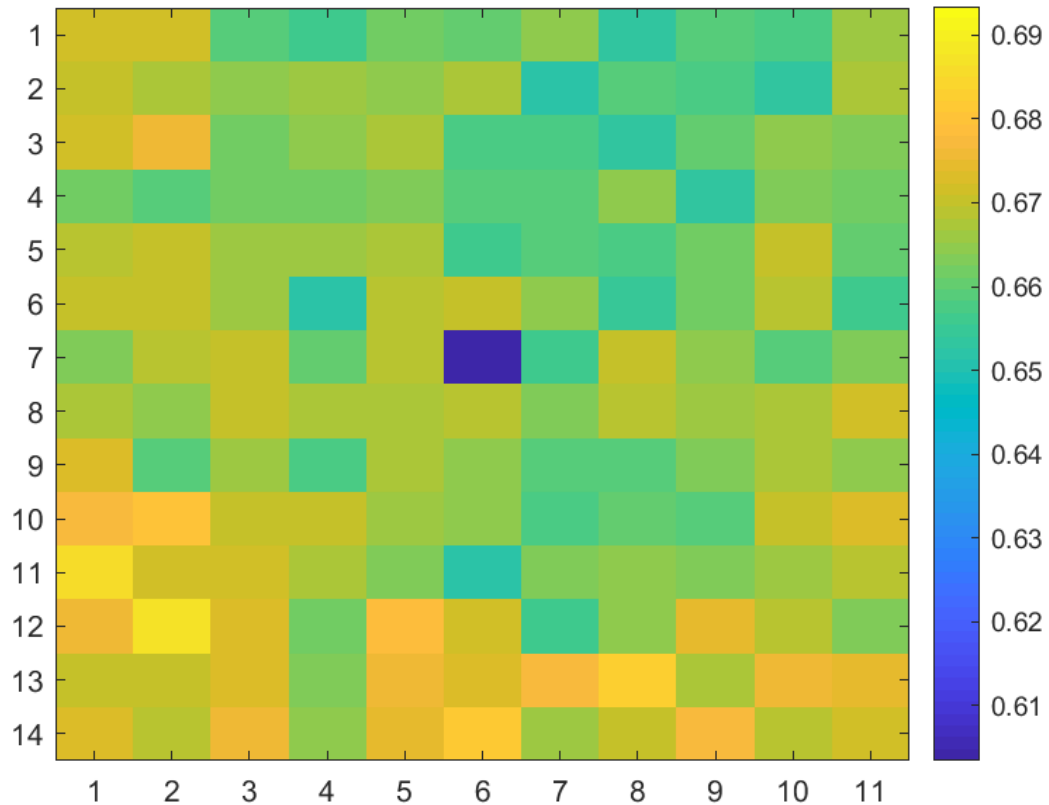


Рисунок 3.16 – Графік цільової функції для всіх можливих положень

В даному випадку мінімум знаходиться в точці (7, 6), що відповідає індексам розташування верхнього лівого матриці кута біт-контейнера у повній матриці. Тоді повна матриця біт-контейнера заповнюється як

$$\Gamma_{m+m_0-1, n+n_0-1} = \gamma_{m,n}. \quad (3.53)$$

3.4.4 Декодування повної матриці біт-контейнера

Декодування повної матриці біт-контейнера Γ проводиться за

допомогою інверсної псевдовипадкової перестановки $\mathbf{P}^{-1}$ (вважаємо, що вона нам відома):

$$\mathbf{G} = \mathbf{P}^{-1}(\Gamma). \quad (3.54)$$

Наступним етапом проводиться заповнення невизначених пікселів. Ця операція проводиться для кожного блоку розміром 3×3 пікселі, значення блоку присвоюється тому біту, що зустрічається найчастіше (0 елементи до розгляду не беруться). Це виконується за допомогою λ -функції (у MATLAB-нотації):

$$\text{fun} = @(\mathbf{x}) \text{mode}(\mathbf{x}(\mathbf{x} > 0)), \quad (3.55)$$

де $\text{mode}(\mathbf{x})$ – функція, що повертає моду послідовності $\mathbf{x}$ (елемент послідовності, що зустрічається найчастіше).

Таким чином, вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію перматованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації.

3.5 Метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності

3.5.1 Перспективна проєкція

Модель перспективної проєкції відповідає ідеальній камері-обскури [42], [233]. Ця модель досить точно відповідає процесу побудови зображення в більшості сучасних фото- і відеокамер. Однак через обмеження сучасної оптики реальний процес дещо відрізняється від моделі камери-обскури. Відмінності реального процесу від моделі називаються спотвореннями і моделюються окремо.

Модель найпростішої камери-обскури зручна тим, що вона повністю описується центром проєкції і положенням площини зображення. Тому проєкція будь-якої точки сцени на зображенні може бути знайдена як перетин променя, що сполучає центр проєкції і точку сцени, з площиною зображення (рис. 3.17).

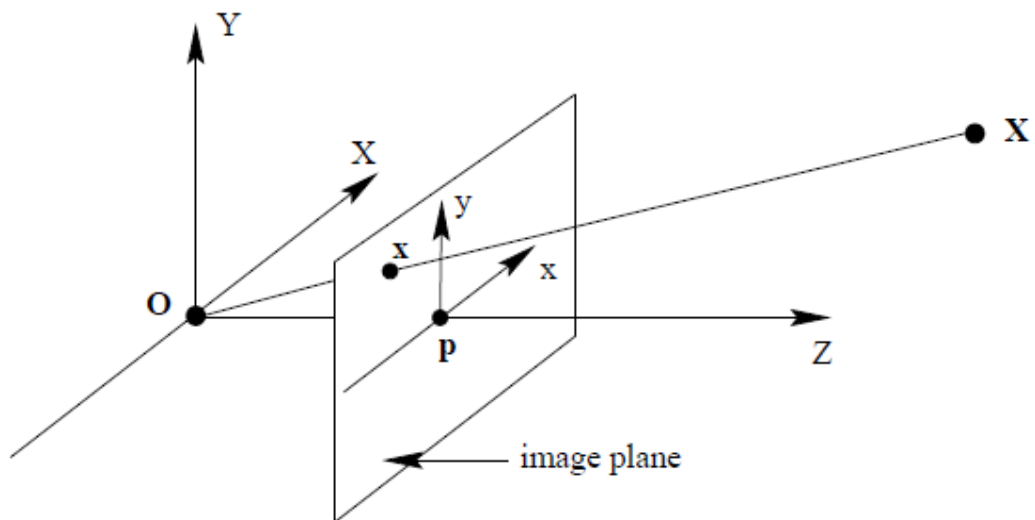


Рисунок 3.17 – Модель перспективної проєкції [42]

3.5.2 Найпростіша модель перспективної проекції

Розглянемо найпростіший випадок, коли центр проекції камери (фокус) поміщений в початок системи координат, площина зображення збігається з площиною $Z = 1$.

Нехай $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$ – координати точки в 3-вимірному просторі, а $\mathbf{x} = (x, y)$ – проекція цієї точки на зображенні І. Перспективна проекція в цьому випадку задається наступними рівняннями:

$$x = \frac{X}{Z}, \quad (3.56)$$

$$y = \frac{Y}{Z}. \quad (3.57)$$

У матричній формі з використанням однорідних координат ці рівняння переписуються в наступному вигляді:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.58)$$

Площина, що розташована на відстані 1 від центру проекції і перпендикулярна до оптичної осі, називається ідеальною площиною зображення. Оптична вісь перетинає ідеальну площину зображення в точці $\mathbf{c}$, яку називають головною точкою.

3.5.3 Внутрішнє калібрування камери

Найпростіший випадок перспективної проекції практично завжди не відповідає реальній камері. Відстань від центру проекції до площини зображення, тобто фокусна відстань, що позначається f , зазвичай не дорівнює 1. Також координати точки в площині зображення можуть не збігатися з абсолютними координатами. При використанні цифрової камери, співвідношення між координатами точки в зображенні і абсолютними координатами точки на ідеальній площині визначається формою і розмірами пікселів матриці.

Позначимо розміри пікселя матриці цифрової камери p_x, p_y , кут нахилу пікселя α , а головну точку через $(c_x, c_y, 1)$, рис. 3.18. Тоді координати точки (x, y) на зображенні, що відповідає точці (x_R, y_R) на ідеальній площині, визначаються виразом:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{p_x} & \tan \alpha & c_x \\ 0 & \frac{f}{p_y} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.59)$$

Якщо позначити:

$$f_x = \frac{f}{p_x}, \quad (3.60)$$

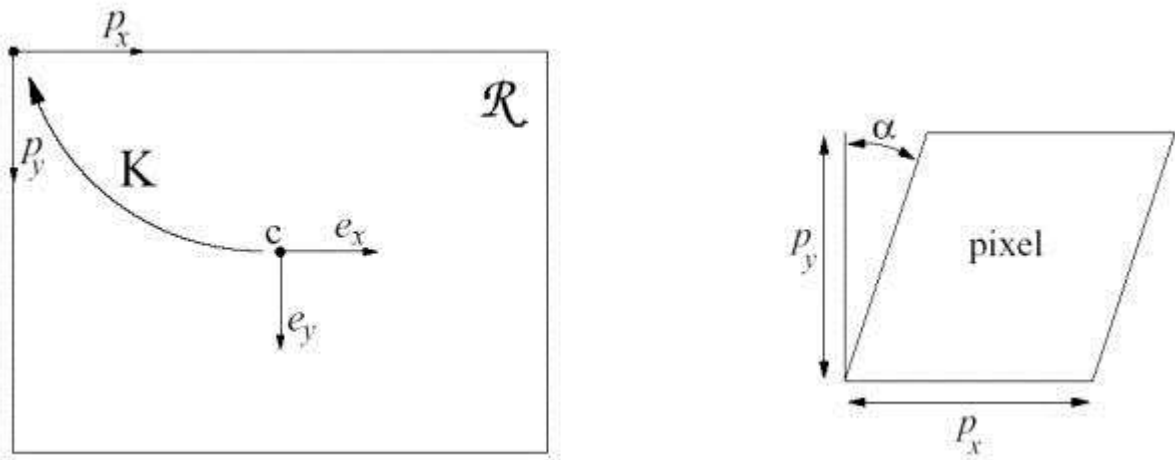


Рисунок 3.18 – Перетворення з координат ідеальної площини в координати зображення [42]

$$f_y = \frac{f}{p_y}, \quad (3.61)$$

а також позначити

$$s = \tan \alpha, \quad (3.62)$$

то формула (3.59) перетворюється на:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.63)$$

Матриця K називається матрицею внутрішнього калібрування камери. У більшості випадків у реальних цифрових камер кут нахилу пікселів близький до прямого, тобто параметр $s = 0$, а ширина і висота пікселя рівні. Головна точка зазвичай розташовується в центрі зображення. Тому матриця

К може бути записана у вигляді:

$$K = \begin{pmatrix} f' & 0 & c_x \\ 0 & f' & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.64)$$

де позначено

$$f' = f_x = f_y. \quad (3.65)$$

Це припущення (3.64) про вид матриці К широко використовуються для спрощення алгоритмів визначення внутрішньої калібрування камери, а також при синтетичному моделюванні зображень, необхідних для оцінки якості і ефективності методів тривимірної реконструкції.

3.5.4 Зовнішнє калібрування камери

Нехай $\mathbf{m}$ – точка сцени в 3-вимірному просторі. Будь-який рух є евклідовим перетворенням простору, тому в однорідних координатах результат переміщення, який ми позначимо $\mathbf{m}'$, може бути записаний як:

$$\mathbf{m}' = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \mathbf{m}, \quad (3.66)$$

де $\mathbf{R}$ – матриця повороту, $\mathbf{t}$ – вектор переносу (рис. 3.19).

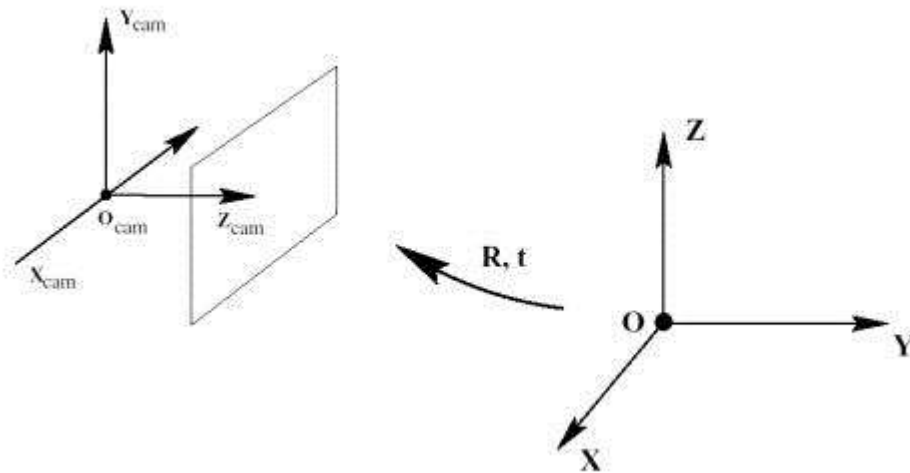


Рисунок 3.19 – Евклидово перетворення простору з системи координат сцени в систему координат, пов'язану з камерою [42]

Рух камери відносно сцени еквівалентний зворотньому руху точок сцени відносно камери, тому можемо записати, що:

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \mathbf{m}' = \mathbf{C} \mathbf{m}'. \quad (3.67)$$

Матриця

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (3.68)$$

називається матрицею зовнішнього калібрування камери. Матриця $\mathbf{C}^{-1}$ називається матрицею руху камери. Таким чином, матриця зовнішнього калібрування камери переводить координати точок сцени з системи координат сцени в систему координат камери.

3.5.5 Повна модель перспективної проекції

З виразів (3.63), (3.64), (3.68) можна вивести загальний вираз перспективної проекції будь-якої камери з довільною орієнтацією і положенням у просторі:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^T & -R^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.69)$$

З урахуванням попередніх позначень, ця формула може бути записана як:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.70)$$

Матриця

$$P = K \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} C \quad (3.71)$$

називається *матрицею проекції* камери (або *проектором*), іноді вираз (3.71) скорочено записують як

$$P = K[R | \mathbf{t}].$$

3.5.6 Задача калібрування камери

Задача калібрування камери формулюється таким чином: з n відповідностей

$$\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{X}_i, \quad (3.72)$$

де $\mathbf{X}_i$ – точки 3-вимірної сцени, а $\mathbf{x}_i$ – відповідні точки зображення, потрібно знайти матрицю $P = K[R | \mathbf{t}]$, таку, що задовільняються умові

$$\mathbf{x}_i = P\mathbf{X}_i.$$

На рис. 3.20 показано набори відповідних точок.

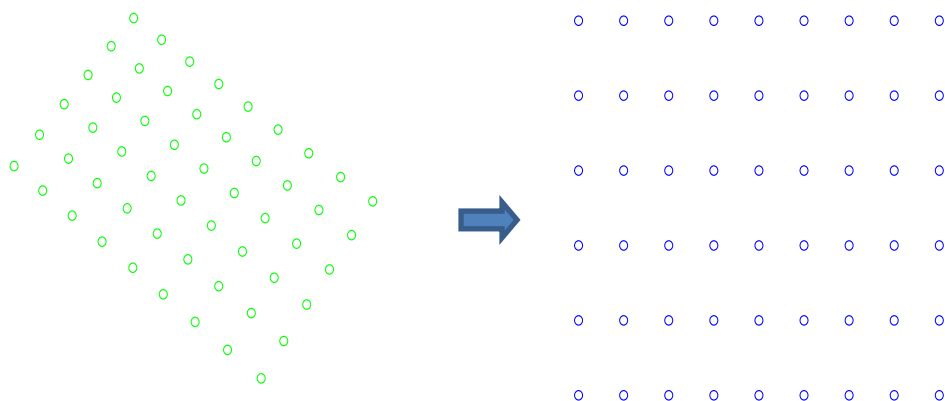


Рисунок 3.20 – Задача калібрування камери

Задача складається з 2 етапів:

1) знаходження матриці P по набору відповідностей (3.71) між точками сцени і зображення;

2) декомпозиція матриці P на матрицю внутрішнього калібрування K , матрицю поворота камери R і вектор зміщення t за допомогою QR-розкладу [42].

Перший етап зводиться, до розв'язування оптимізаційної задачі

$$\min_P \sum_i (\mathbf{x}_i - P\mathbf{X}_i)^2. \quad (3.73)$$

Вводячи 12-вектор $\mathbf{p}$, який складається з елементів матриці P :

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ P_{14} \\ P_{21} \\ P_{22} \\ P_{23} \\ P_{24} \\ P_{31} \\ P_{32} \\ P_{33} \\ P_{34} \end{pmatrix}, \quad (3.74)$$

можемо сформулювати (3.73) у еквівалентному матричному вигляді

$$A\mathbf{p} = \mathbf{0}, \quad (3.75)$$

де введено матрицю

$$A = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 & -x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -y_1 Z_1 & -y_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_n X_n & -x_n Y_n & -x_n Z_n & -x_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_n X_n & -y_n Y_n & -y_n Z_n & -y_n \end{pmatrix}, \quad (3.76)$$

$\mathbf{0}$ – нульовий 12-вектор.

Розв’язок системи (3.75) знаходиться у вигляді власного вектора (з найменшим власним значенням) добутку матриць $A^T A$ [42].

Другий етап робиться таким чином:

– беремо M – верхню 3×3 підматрицю матриці P і за допомогою QR-розкладу розкладаємо її на добуток матриці внутрішнього калібрування K та матриці поворота камери R :

$$M = KR;$$

– знаходимо вектор зміщення $\mathbf{t}$:

$$\mathbf{t} = K^{-1} \begin{pmatrix} p_{14} \\ p_{24} \\ p_{34} \end{pmatrix},$$

що й дає розв’язок задачі калібрування.

3.5.7 Модель радіальних спотворень зображення

Окремо знаходяться параметри корекції радіальних спотворень зображення (рис. 3.21).

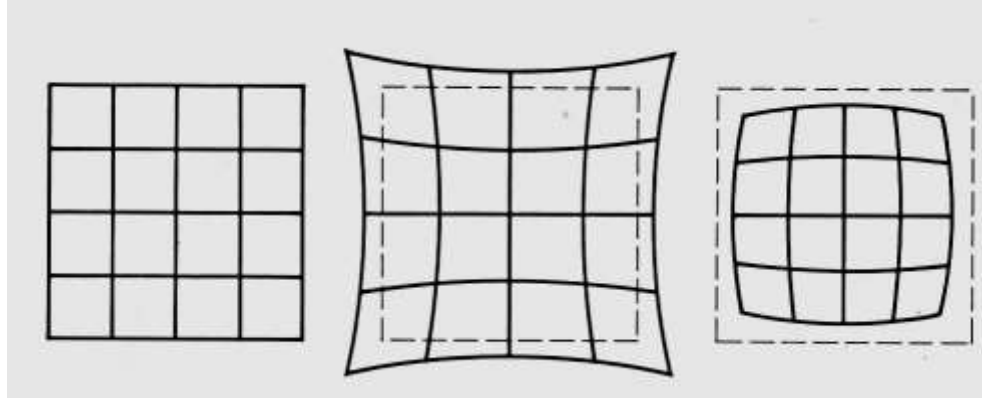


Рисунок 3.21 – Приклади радіальних спотворень (зліва направо):
без спотворень, «подушка», «бочка»

Модель радіальних спотворень може бути записана у вигляді [228]:

1) нормалізація координат:

$$x_i^n = \frac{x_i}{z_i}, \quad (3.77)$$

$$y_i^n = \frac{y_i}{z_i}, \quad (3.78)$$

де x_i , y_i , z_i – звичайні, а x_i^n , y_i^n – нормалізовані координати сцени;

2) розрахунок спотворень:

$$x_i^d = x_i^n (1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4), \quad (3.79)$$

$$y_i^d = y_i^n (1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^2), \quad (3.80)$$

де

$$r_i^2 = (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \quad (3.81)$$

і введено вектор параметрів радіального спотворення $k = (k_1, k_2)$;

3) перехід в систему координат камери:

$$x'_i = f x_i^d + x_c, \quad (3.82)$$

$$y'_i = f y_i^d + y_c, \quad (3.83)$$

де (x_c, y_c) – координати центра камери; f – фокусна відстань.

3.5.8 Калібраційні маркери

У більшості практичних застосувань (наприклад, в системі MATLAB [230] або у популярній бібліотеці обробки зображень OpenCV [231]) для калібрування використовуються спеціальні калібраційні маркери, в якості якого часто використовується зображення шахової дошки. При цьому точки x_i на зображенні шукаються за допомогою детектора кутів Харріса [232] (рис. 3.22), а точки сцени X_i – генеруються.

Як видно, загальна кількість точок, що використовуються для калібрування, при виборі в якості калібраційного маркера шахової дошки – близько 30.

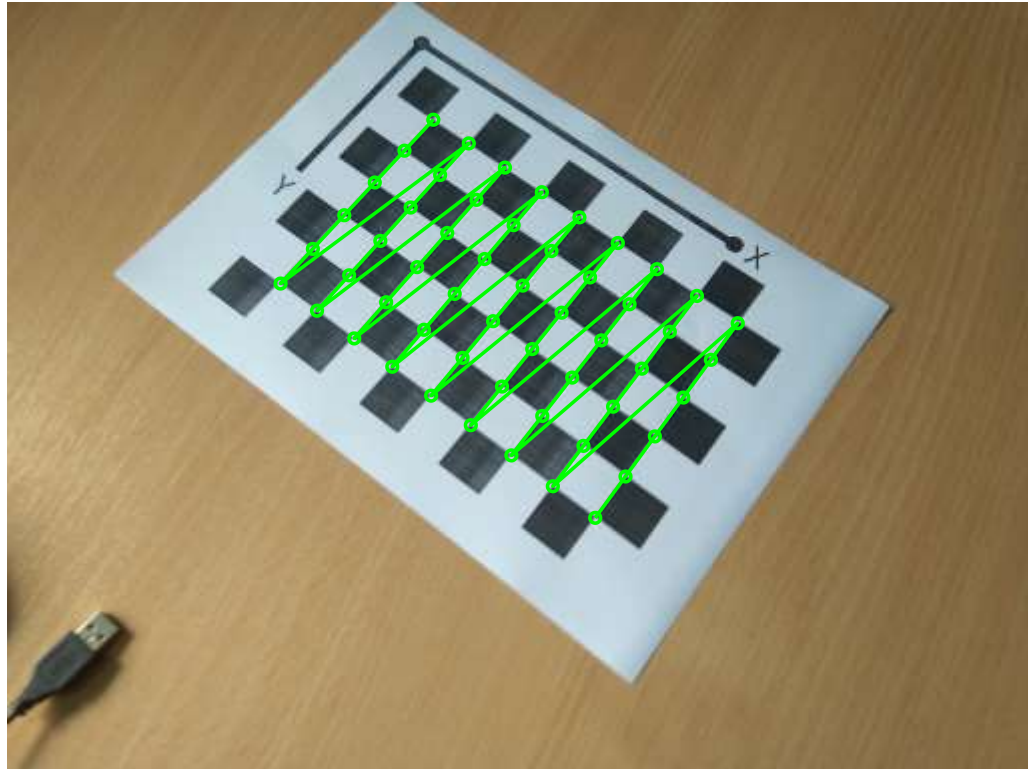
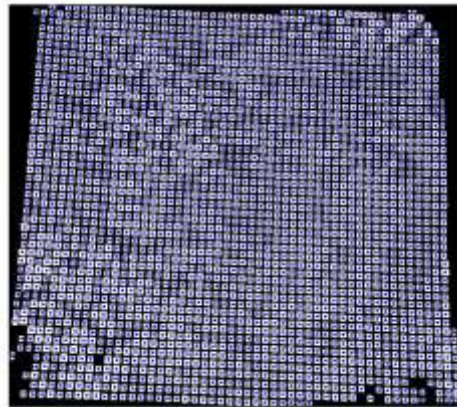


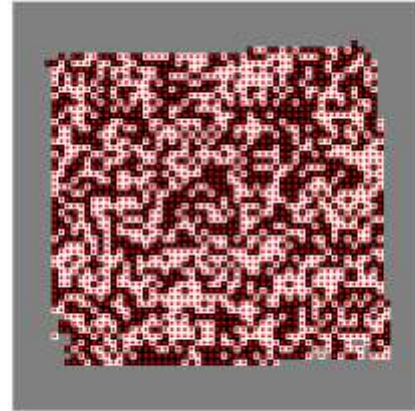
Рисунок 3.22 – Знаходження особливих точок на зображенні шахової дошки

У даній роботі запропоновано використовувати в якості калібраційного маркера сам мозаїчний AR-маркер (рис. 3.23), при цьому точки x_i на зображенні – це центроїди клітинок біт-контейнерів, а точки X_i – центроїди відповідних клітинок біт-контейнерів у AR-маркері, який згенеровано з декодованого зображення-повідомлення. Єдиним додатковим параметром є фізичний розмір клітинки AR-маркера (у міліметрах), але його можна вважати стандартним. Загальна кількість точок, що використовуються для калібрування – близько 2000 (загальна кількість клітинок $63^2 = 3969$, з умови

робастності 50% може бути відсутніми).



а)



б)

Рисунок 3.23 – Використання AR-маркера для калібрування:

а) точки x_i на зображенні; б) точки X_i на AR-маркері, який згенеровано з декодованого зображення-повідомлення

3.5.9 Проеціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності

На початку роботи системи доповненої реальності застосовується метод внутрішнього калібрування камери засобу візуальної реєстрації і отримується матриця K . Ця процедура проводиться один раз (або за вимогою користувача), оскільки вважається, що параметри камери не будуть мінятися у процесі експлуатації.

Далі у процесі роботи для кожного кадру, на якому виявлено маркер доповненої реальності, визначаються матриця повороту R і вектор зміщення t і за формулою (3.68) розраховується матриця зовнішнього калібрування S .

Після того проводиться трансформація набору координат 3d об'єкту

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \text{ у координати кадру } \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} :$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{X}. \quad (3.84)$$

Оскільки результуючі координати кадру отримуються в однорідних координатах, то необхідно провести їх нормування:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{\mathbf{x}_3} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix}. \quad (3.85)$$

Використовуючи набір координат (3.85), зображення 3d об'єкту поточною виводиться поверх зображення кадру.

Таким чином, отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потoku в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення.

3.6 Метод рендерингу відеопотоку в області маркера доповненої реальності

3.6.1 Декомпозиція матриці гомографії

Вище (див. п. 3.3) було описано метод визначення параметрів проєктивного перетворення, результатом якого була матриця гомографії H . Зауважимо, що описаний метод знаходить H з точністю до масштабу і зсуву, оскільки введена у п. 3.3.3 цільова функція (3.31) інваріантна по відношенню до зміни масштабів і зсувів. Покажемо зараз, як можна виправити даний недолік і отримати коректну матрицю гомографії.

Запишемо для цього матрицю H у вигляді [42]:

$$H = \begin{pmatrix} A & \mathbf{t} \\ \mathbf{v}^T & v \end{pmatrix}, \quad (3.86)$$

де $\mathbf{t}$ – вектор зсуву, який потребуватиме корекції; $\mathbf{v}^T$ – деякий вектор; введено матрицю A розміром 2×2 :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}. \quad (3.87)$$

Як показано у [42], ми можемо зробити факторизацію матриці A і представити її у вигляді добутку 3 матриць:

$$A = SQR, \quad (3.88)$$

де S – масштабна матриця (s_x, s_y – масштабні коефіцієнти по відповідних осях):

$$S = \begin{pmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{pmatrix}; \quad (3.89)$$

Q – матриця тангенціального спотворення (q – коефіцієнт тангенціального спотворення або скосу):

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ q & 1 \end{pmatrix}; \quad (3.90)$$

R – матриця 2d-повороту (θ – кут повороту):

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (3.91)$$

Дані параметри виражаються через значення елементів матриці A таким чином [42]:

$$s_x = \sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2}, \quad (3.92)$$

$$s_y = \frac{\det A}{s_x} = \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2}}, \quad (3.93)$$

$$q = \frac{a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22}}{\det A} = \frac{a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \quad (3.94)$$

$$\theta = \operatorname{atan} \frac{a_{12}}{a_{11}}. \quad (3.95)$$

Значення параметрів q і θ є коректними, масштабні коефіцієнти потрібно перерахувати, для цього (аналогічно до попереднього розділу) по декодованому повідомленню будується зображення AR-маркера, звідки визначається уточнені значення масштабних коефіцієнтів s'_x , s'_y ; використовуючи результати п. 3.4.3 будується уточнене значення вектору зсуву $\mathbf{t}'$.

Маючи уточнені значення s'_x , s'_y , можна отримати уточнене значення матриці A' :

$$A' = \begin{pmatrix} s'_x & 0 \\ 0 & s'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ q & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (3.96)$$

після чого, використовуючи уточнене значення вектору зсуву $\mathbf{t}'$, будемо уточнену матрицю гомографії H' :

$$H' = \begin{pmatrix} A' & \mathbf{t}' \\ \mathbf{v}^T & v \end{pmatrix}. \quad (3.97)$$

Уточнена матриця гомографії H' буде використовуватися при перетворенні координат.

3.6.2 Трансформація координат

Вважаючи, що адреса відео закодована у повідомленні AR-маркера, ми можемо рендерити відео-потік в області маркера, розраховуючи для кожного кадру, що виводиться в момент часу t , свою уточнену матрицю гомографії $H'(t)$ і проводячи трансформації координат кадру по формулі:

$$\begin{pmatrix} x'(t) \\ y'(t) \\ 1 \end{pmatrix} = H'(t) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3.98)$$

де $x = 0..W_F - 1$, $y = 0..H_F - 1$ – координати точок кадру, розмір якого $W_F \times H_F$; $H'(t)$ – уточнена матриця гомографії; $x'(t)$, $y'(t)$ – трансформовані координати кадру, що порашовані для моменту часу t .

Використовуючи описаний вище підхід, можна також зробити спрощену версію проєціювання 3d-об'єктів на площину AR-маркера, при цьому трансформація координат x , y проводиться по формулі (3.95), а для координати z використовується просте масштабування:

$$z'(t) = s_z(t)z. \quad (3.99)$$

Масштабний коефіцієнт $s_z(t)$ в кожен момент часу розраховується з матриці A :

$$s_z = \sqrt{s_x s_y} = \sqrt{\det A} = \sqrt{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}. \quad (3.100)$$

Обидва методи проєціювання дають прийнятні результати, що близькі для зображень, коли площина камери майже паралельна до площини AR-маркера. Перевагами спрощеного методу є його нижча обчислювальна вартість і відсутність необхідності знаходження матриці внутрішнього калібрування, тому він використовується у більшості реалізацій систем доповненої реальності, де немаж необхідності фізично точної візуалізації.

Висновки до розділу 3

1. Вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності та метод їх формування, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності.

2. Вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення.

3. Вперше розроблено метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх

значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера.

4. Вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію перматованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації.

5. Отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потoku в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення.

Список використаних джерел у розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [42], [75]–[79], [80], [83]–[84], [85]–[90], [92], [93], [95]–[98], [100]–[102], [104], [214]–[233].

4 ПОБУДОВА ТА ВИЯВЛЕННЯ МОЗАЇЧНИХ СТОХАСТИЧНИХ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

У даному розділі запропоновано реалізацію методів побудови і виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, методу визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апіорної інформації, методу декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, методів проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, методу рендерингу відеопотоку в області маркера доповненої реальності. Прототипування всіх розроблених методів проводилося у системі MATLAB.

Матеріали розділу викладені в роботах [75]–[79], [82], [85]–[86], [90]–[91], [93]–[94], [101].

4.1 Побудова мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

У даному підрозділі буде описано загальну реалізацію методу побудови мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, на рис. 4.1 наведено блок-схему алгоритму, що його реалізує [75], [77].

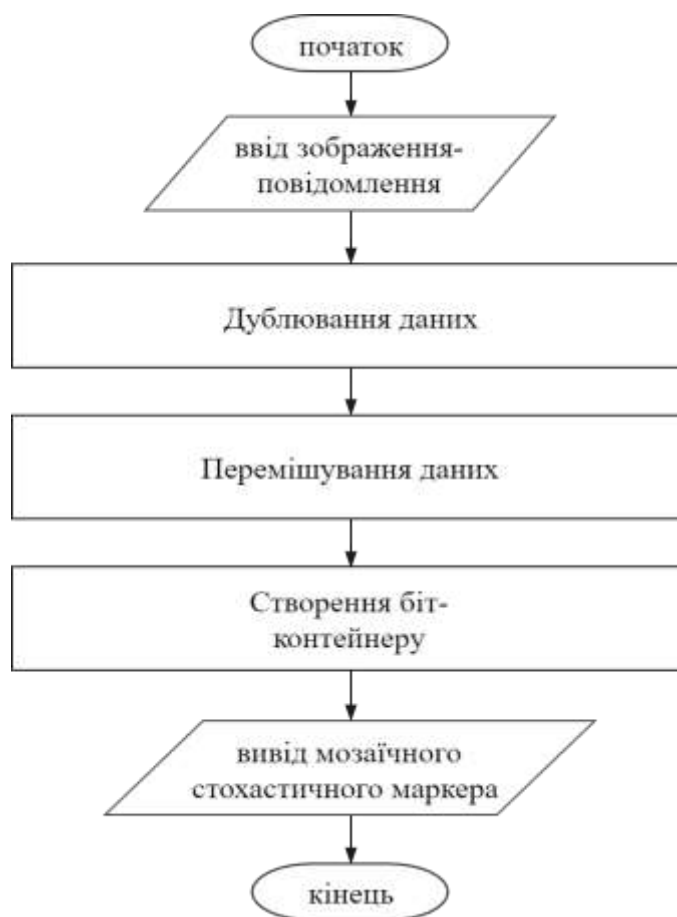


Рисунок 4.1 – Блок-схема загального алгоритму побудови мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

Вхідними даними для алгоритму є зображення-повідомлення. У дисертаційній роботі пропонується в якості зображення-повідомлення брати зображення QR-коду (рис. 4.2), що створюється стандартними генераторами QR-коду (див. наприклад, [235]).

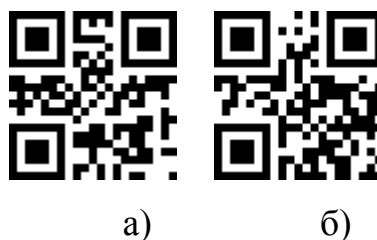


Рисунок 4.2 – Приклади зображення-повідомлення – QR-код, в якому закодовано: а) «Hello, world!»; б) url-адреса відео з YouTube [236]

Надалі, якщо це не буде спеціально оговорено, всі приклади будуть

наводиться для зображення повідомлення рис. 4.2а.

Розмір зображення повідомлення $N = 21$ (21×21 пікселів).

4.1.1 Дублювання даних

Для реалізації процедури дублювання даних пропонується використовувати масштабування методом найближчого сусіда бінарного зображення-повідомлення, що задано змінною `qr`, у задане число (змінна `k`) разів (рис. 4.3) [93]:

```
g = imresize(qr, k, 'nearest');
```



Рисунок 4.3 – Зображення-повідомлення, збільшене у $k = 3$ разів

Зауважимо, що збільшення зображення у k разів дублює дані (пікселі зображення-повідомлення) у k^2 разів.

4.1.2 Перемішування даних

Для реалізації процедури перемішування даних, яка необхідна для забезпечення псевдоголографічного кодування, пропонується

використовувати псевдовипадкову перестановку, що генерується стандартною функцією `randperm` з фіксованим початковим станом генератора `state` (рис. 4.4) [75], [237]. Останнє необхідно, щоб забезпечити відтворюваність перестановки.

```
rand('state', state);  
ind = randperm(size);
```



Рисунок 4.4 – Пермутоване зображення – результат псевдовипадкового перемішування пікселів

Значення `state` може бути довільним, головне, щоб воно було однаковим для методів створення і використання, в даній роботі прийнято `state=0`. Змінна `size` приймає значення кількості елементів у збільшеному зображенні, що рівно $(N \cdot k)^2$, тобто `size=3969`.

4.1.3 Створення біт-контейнеру

Попереднє зображення (див. рис. 4.4) кодує кожен біт повідомлення кольором клітинки, при цьому біт 0 кодується чорним кольором, біт 1 –

білим. Для забезпечення вимог помітності, простоти, робастності, універсальності та орієнтованості, що дає покращення розпізнавання та можливість використання спеціального алгоритму визначення положення камери, використовується процедура створення біт-контейнера.

Для реалізації процедури створення біт-контейнера, клітинки розділювались рамкою товщиною $a_1 = 1$ з проміжним сірим кольором. Результатом є зображення сформованого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Зображення AR-маркера – результат додавання мозаїчного біт-контейнеру

4.2 Виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

Структурна блок-схема загального алгоритму виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності зображена на рис. 4.6 [76]–[78].

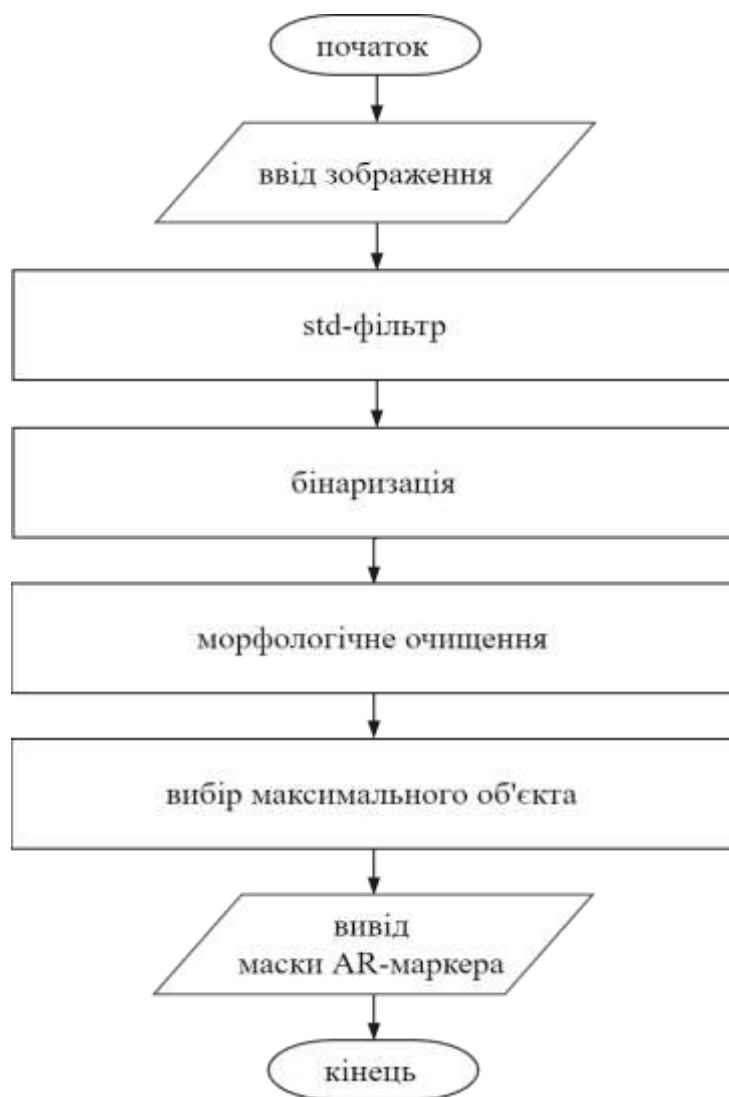


Рисунок 4.6 – Блок-схема загального алгоритму виявлення AR-маркера

4.2.1 Ввід зображення

На вхід алгоритму подається кольорове зображення (рис. 4.7), що перетворюється на зображення у градаціях сірого (рис. 4.8).



Рисунок 4.7 – Вихідне зображення

Для конвертації використовується стандартна функція

```
f = rgb2gray(im);
```



Рисунок 4.8 – Зображення у градаціях сірого

Змінна `im` використовується для кольорового RGB зображення, що приведено до типу `single` і нормалізовано до діапазону `0..1`, `im` – зображення у градаціях сірого.

4.2.2 Застосування std-фільтра

Для реалізації std-фільтра (процедури, що розраховує по зображенню локальне стандартне відхилення ковзаючим вікном, у даному випадку розміром 3×3) використовується функція

```
s = stdfilt(f, ones(3));
```

Змінна s – зображення у градаціях сірого, кожен піксель якого є результатом std-фільтрації (рис. 4.9).

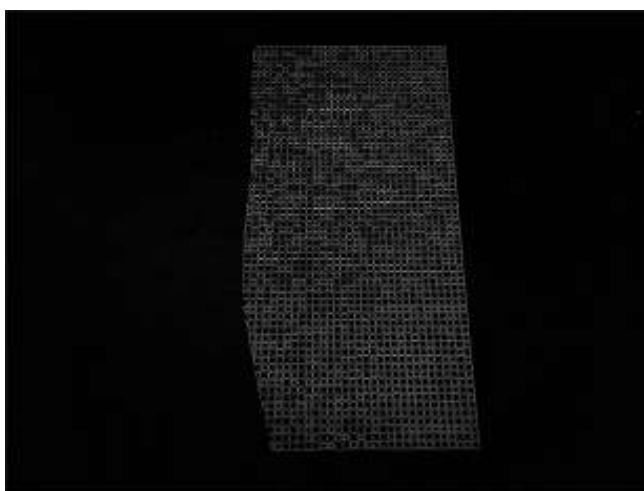


Рисунок 4.9 – Результат обчислення локального стандартного відхилення по області розміром 3×3

4.2.3 Бінаризація

Як було запропоновано у розділі 3, для бінаризації використовується не стандартний метод бінаризації по Отсу, а застосовується сегментація зображення методом К-середніх на $K = 3$ класи.

Сегментація проводиться за допомогою функції

```
[idx, cnt] = imsegkmeans(s, 3, 'NumAttempts', 3);
```

Параметр `'NumAttempts'`, що в даному випадку рівний 3, задає кількість запусків функції, щоб отримати стійкіший результат; змінна `idx` кодує індексне зображення, в якому кожен піксель відповідає індексу класу, `cnt` – середні значення яскравості для кожного класу (рис. 4.10) [79], [82].

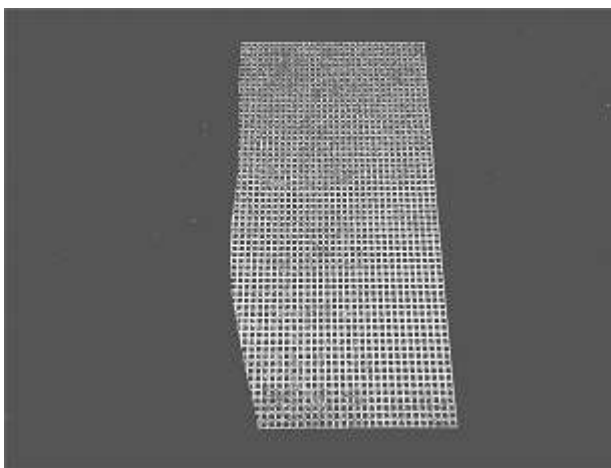


Рисунок 4.10 – Індексне зображення – результат сегментації на $K=3$ класи

Бінаризація – це результат належності до класу, колір якого не є мінімальним:

```
[~, i] = min(cnt);  
bw = idx ~= i;
```

Змінна `bw` – бінарне зображення, де кожен піксель приймає значення 1 чи 0 в залежності від того, чи виконується вказана умова.

Результат бінаризації запропонованим методом представлено на рис. 4.11.

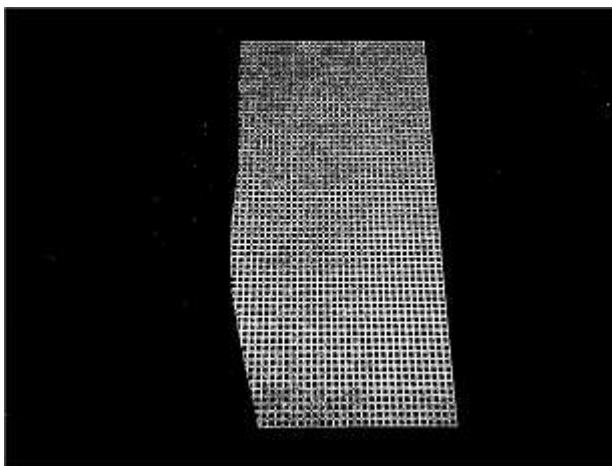


Рисунок 4.11 – Результат бінаризації запропонованим методом

Для порівняння результатів на рис. 4.12 показані фрагменти бінарних масок отриманих методом Отсу і запропонованим методом.

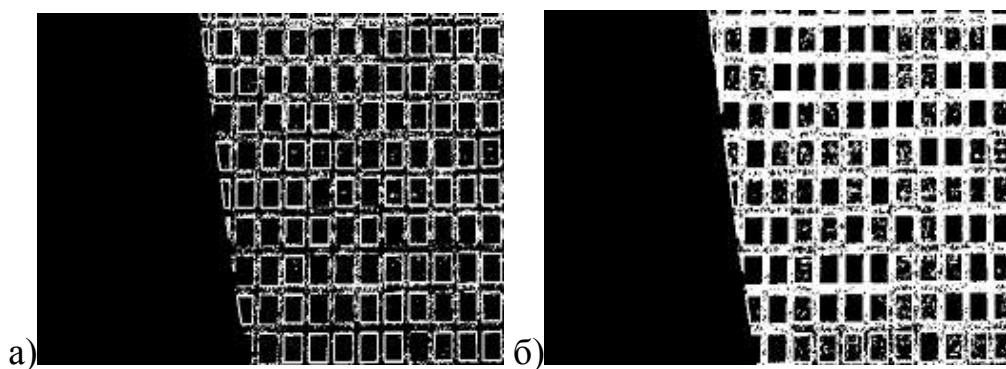


Рисунок 4.12 – Порівняння результатів бінаризації: а) методом Отсу;
б) запропонованим методом

З аналізу рис. 4.12 можна бачити, що візуально запропонований метод дає суттєво кращі результати – всі контури клітинок добре виділяються.

4.2.4 Морфологічне очищення

Отримане бінарне зображення очищається від шуму (за допомогою функції `bwareaopen(bw, 200)` відкидаються всі зв'язні області з

площею менше 200 пікселів) і до нього застосовується операція морфологічного замикання `imclose` з достатньо великим квадратним ядром розміром 63×63 , що дозволяє заповнити внутрішні області контурів і отримати маску AR-маркера:

```
bw = bwareaopen(bw, 200);  
bw = imclose(bw, ones(63));
```

Результат морфологічного очищення показано на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Результат заповнення внутрішніх областей

4.2.5 Вибір максимального по площі об'єкта

Для точного визначення маски AR-маркера пропонується в отриманому бінарному зображенні (див. рис. 4.13) знайти найбільшу по площі зв'язну область (рис. 4.14a):

```
props = regionprops(bw, 'area');  
[~,k] = max([props.Area]);  
bw = ismember(bwlabel(bw), k);
```

В подальшому є сенс відкинути неінформативні порожні області і в якості маски AR-маркера брати зображення у максимальному описаному прямокутнику:

```
[y,x] = find(bw);  
bw = bw(min(y):max(y),min(x):max(x));
```

Результат представлено на рис. 4.14б.

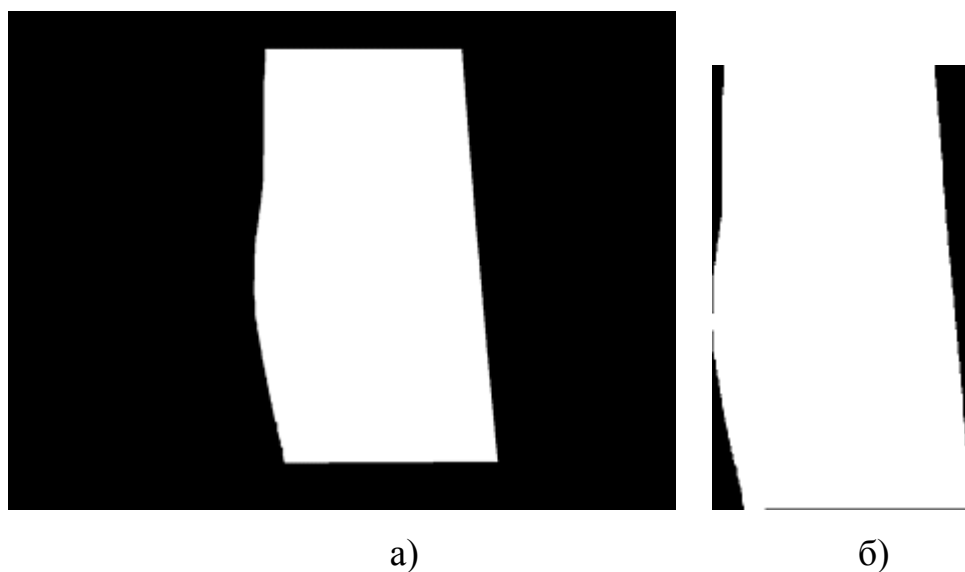


Рисунок 4.14 – Вибір максимального об'єкту: а) найбільша зв'язна область;
б) маска AR-маркера

4.2.6 Знаходження біт-контейнерів

Структурна блок-схема алгоритму знаходження біт-контейнерів на зображенні мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності зображена на рис. 4.15.

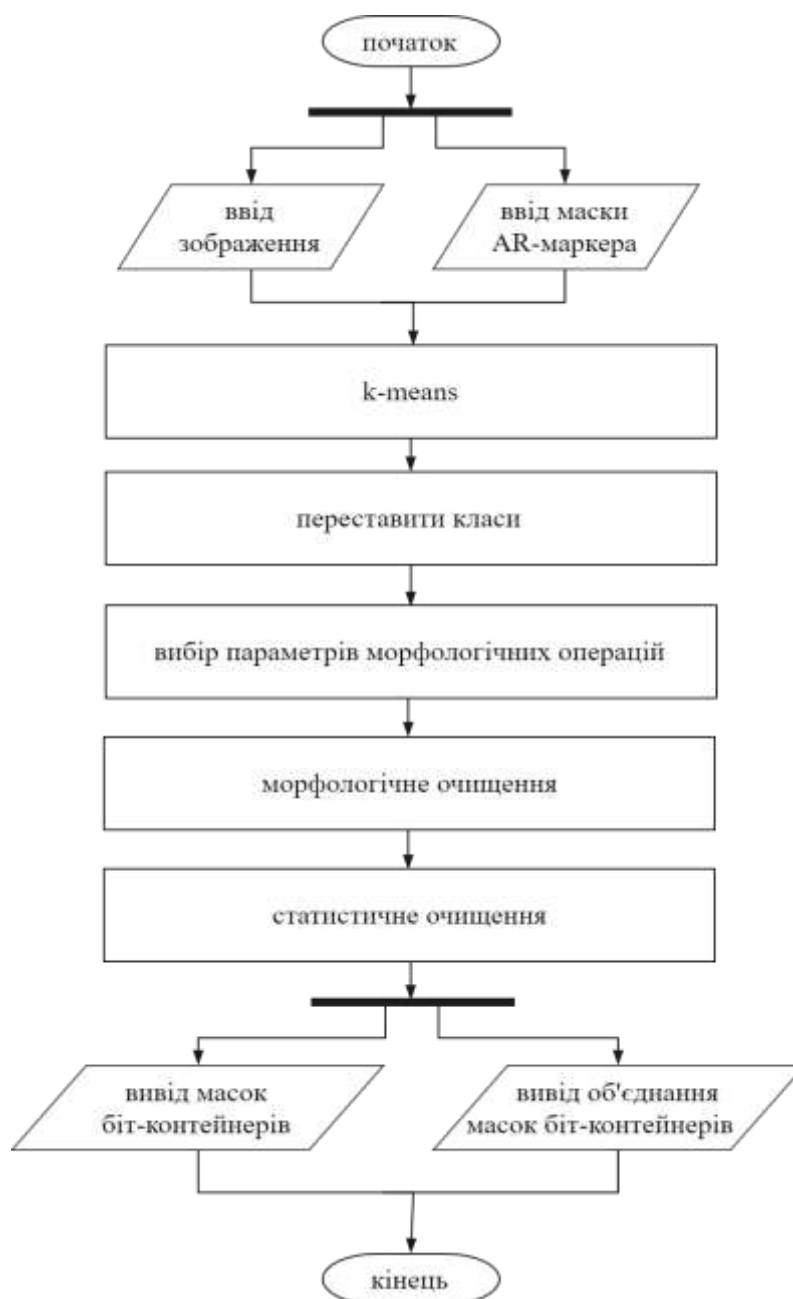


Рисунок 4.15 – Блок-схема алгоритму знаходження біт-контейнерів

На вхід алгоритму подаються знайдена маска AR-маркера (див. рис. 4.14б) і вихідне зображення у градаціях сірого (див. рис. 4.8), з якого по масці виділяється зображення області AR-маркера (рис. 4.16а). Отримане зображення сегментується на $K=3$ класи (рис. 4.16б) у якому класи впорядковуються по зростанню яскравості (рис. 4.16в).

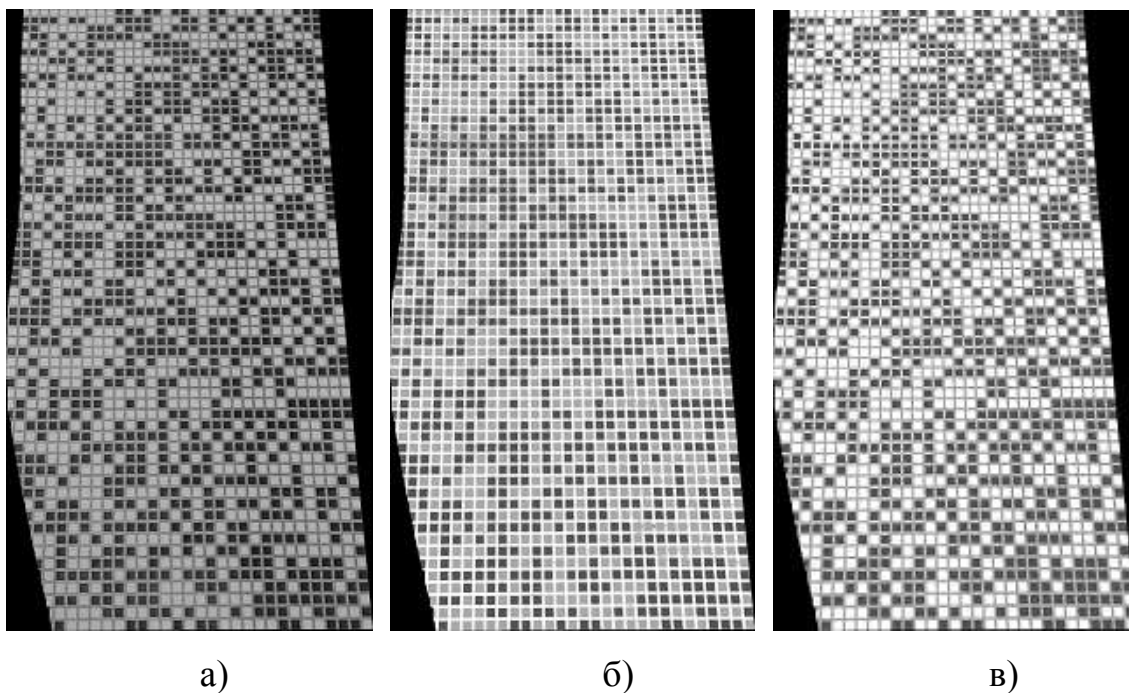


Рисунок 4.16 – Зображення області AR-маркера: а) вихідне зображення; б) результат сегментації; в) результат впорядкування індексів класів

Маски біт контейнерів (змінні `bw1`, `bw2`) визначаються як результат належності до відповідного класу (рис. 4.17):

```
[idx1, cnt] = imsegkmeans(f1(bw,:), K,
'NumAttempts',3);
idx = zeros(h*w,1);
idx(bw) = idx1;

label = reshape(idx,h,w);
fileName(label/K, 'lab')

[~,ind] = sort(cnt);
ii(ind) = 1:K;
ii = [1 ii+1];
idx = ii(idx+1)-1;

label = reshape(idx,h,w);

bw1 = label==1;
bw2 = label==K;
```



а)

б)

Рисунок 4.17 – Маски біт-контейнерів: а) 0-біт-контейнер; а) 1-біт-контейнер

Отримані маски містять доволі багато шуму, тому їх треба відфільтрувати [85]–[86].

Спочатку знаходяться розміри ядра морфологічної фільтрації (змінні a_1 , a_2), що застосовується до маски кожного біт-контейнера (рис. 4.18):

```
bw1 = imopen(bw1, ones(2*a1-1));
bw2 = imopen(bw2, ones(2*a2-1));
```

Наступним етапом виконується статистична фільтрація масок, її роль відкинути всі нестандартні по розміру клітинки (рис. 4.19аб):

```
k = 3;
for i=1:3
    props = regionprops(bw1, 'Area');
    area = [props.Area];
    cond = abs(area-mean(area)) < k*std(area);
    bw1 = ismember(bwlabel(bw1), find(cond));
end
```



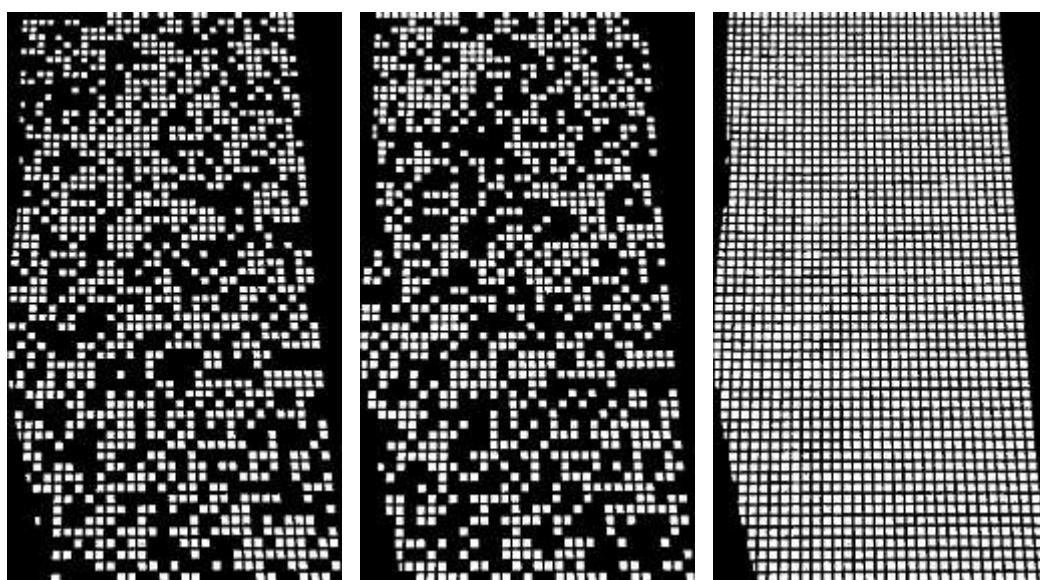
а)

б)

Рисунок 4.18 – Результат морфологічної фільтрації: а) 0-біт-контейнер; а) 1-біт-контейнер

Маючи відфільтровані маски для обох біт-контейнерів (змінні `bw1`, `bw2`), за допомогою логічної операції OR знаходиться об'єднання масок біт-контейнерів (змінна `bw`) (рис. 4.19в):

`bw = bw1 | bw2;`



а)

б)

в)

Рисунок 4.19 – Результат статистичної фільтрації: а) 0-біт-контейнер; а) 1-біт-контейнер; в) об'єднання масок

4.3 Знаходження параметрів проєціювання без врахування апіорної інформації

Структурну блок-схему алгоритму знаходження параметрів проєціювання без врахування апіорної інформації, що було описано у Розділі 3 (див. п. 3.3.3), наведено на рис. 4.20 [76].



Рисунок 4.20 – Блок-схема загального алгоритму знаходження параметрів проєціювання без врахування апіорної інформації

На вхід алгоритму подається об'єднання масок біт-контейнерів (див. рис. 4.19в), на виході отримуємо трансформовані зображення та маски біт-контейнерів. Ядром даного алгоритму є алгоритм знаходження 4 опорних точок, який буде описано нижче.

4.3.1 Ітеративне визначення опорних точок

Даний алгоритм (блок-схему наведено на рис. 4.21) суттєвим чином використовує властивість мозаїчності побудованого візуального AR-маркера – на його вхід подається об'єднання масок біт-контейнерів, що представляє собою набір окремих масок для кожної клітинки.

Алгоритм шукає 4 опорні точки, ітеративно максимізуючи цільову функцію (3.31), що введено у п. 3.3.3.

У загальному пропонований алгоритм визначення точок, по яких розраховується трансформація, складається із таких кроків:

1. Початкові ініціалізації:

```

props = regionprops(bw, 'Centroid');
centroid = reshape(round([props.Centroid]), [2
length(props)]);
x = centroid(:,1);
y = centroid(:,2);

x1 = min(x);
x2 = max(x);
y1 = min(y);
y2 = max(y);

w = round(x2-x1);
h = round(y2-y1);

fixedPoints(1,:) = [1 1];
fixedPoints(2,:) = [w 1];
fixedPoints(3,:) = [w h];
fixedPoints(4,:) = [1 h];

```

```

[~, id(1)] = min(+x+y);
[~, id(2)] = min(-x+y);
[~, id(3)] = min(-x-y);
[~, id(4)] = min(+x-y);

for j=1:4
    movingPoints(j,:) = [x(id(j)) y(id(j))];
end

```

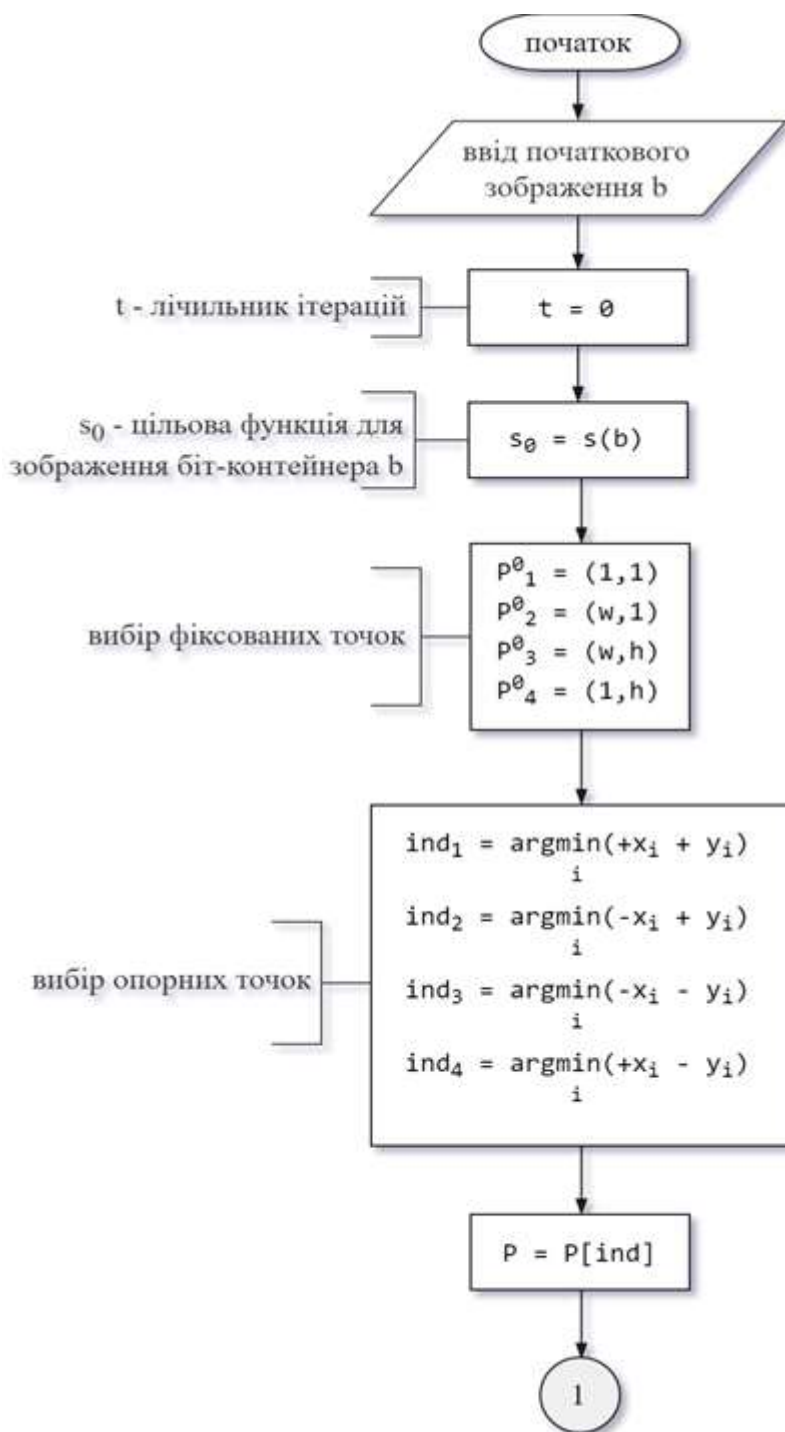


Рисунок 4.21 – Блок-схема алгоритму знаходження опорних точок,
аркуш 1

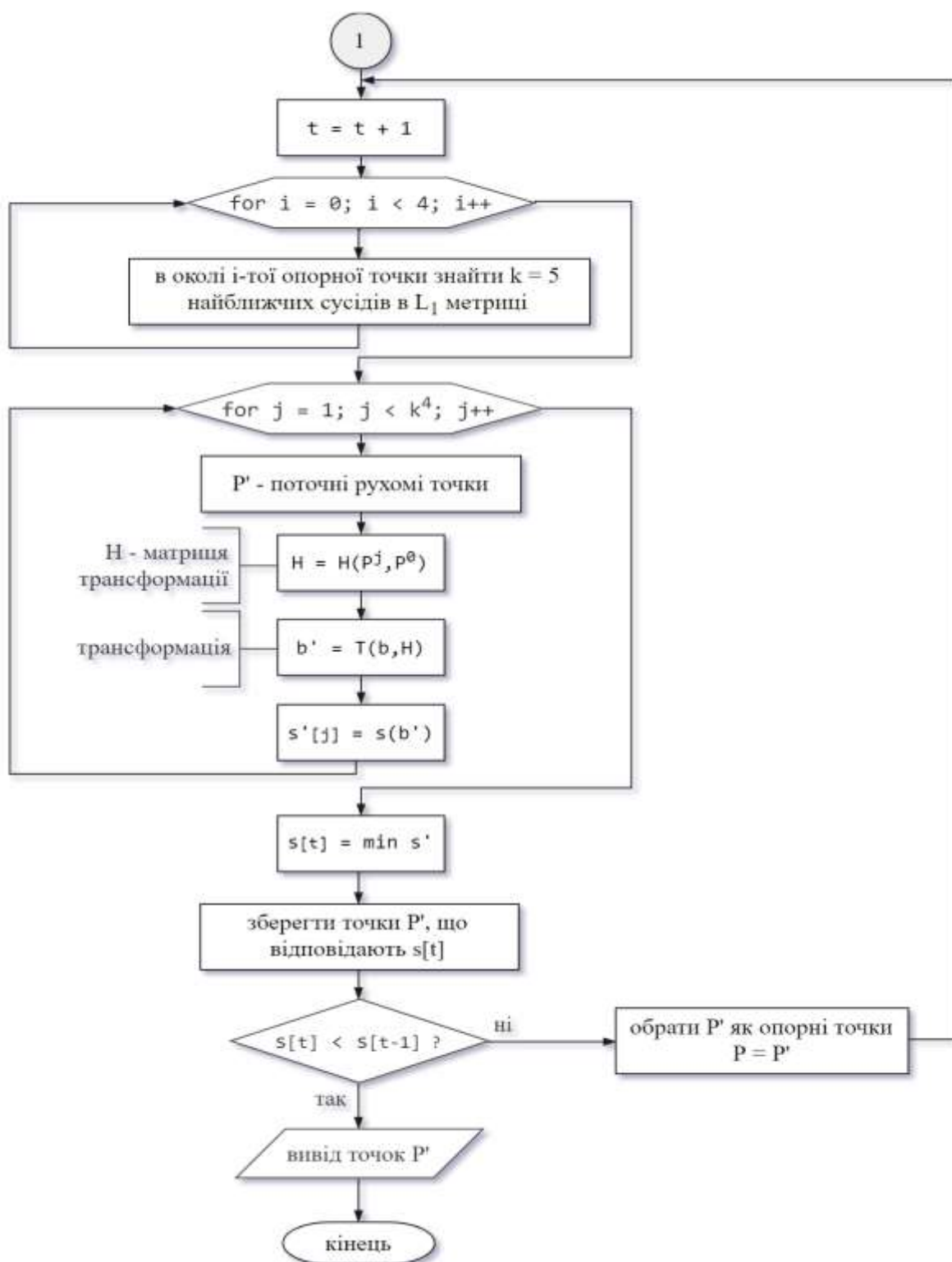


Рисунок 4.21, аркуш 2

2. Ітеративна мінімізація цільової функції:

```

k=5;
prev = 0;

```

```

it = 1;
mask = bw;
v = var(mean(mask,1)) + var(mean(mask,2));
s(it) = v;
while 1
    idx = zeros(4,k);
    for j=1:4
        d = sum(abs([x-x(id(j)) y-y(id(j))]),2);
        [~, ids] = sort(d);
        idx(j,:) = [ids(1:k)];
    end
    q = zeros(k,k,k,k);
    for j1=1:k
        i1 = idx(1,j1);
        movingPoints(1,:) = [x(i1) y(i1)];
        for j2=1:k
            i2 = idx(2,j2);
            movingPoints(2,:) = [x(i2) y(i2)];
            for j3=1:k
                i3 = idx(3,j3);
                movingPoints(3,:) = [x(i3) y(i3)];
                for j4=1:k
                    i4 = idx(4,j4);
                    movingPoints(4,:) = [x(i4)
y(i4)];

                                T = fitgeotrans(movingPoints,
fixedPoints, 'projective');
                                mask = imwarp(bw, T);
                                v = var(mean(mask,1)) +
var(mean(mask,2));
                                q(j1,j2,j3,j4) = v;
                                end
                            end
                        end
                    end

                curr = max(q(:))
                if curr <= prev
                    break;
                end
                prev = curr;
                ind0 = find(q==curr);
                [j1, j2, j3, j4] = ind2sub(size(q), ind0(1));

```

```

id(1) = idx(1,j1);
id(2) = idx(2,j2);
id(3) = idx(3,j3);
id(4) = idx(4,j4);
for j=1:4
    movingPoints(j,:) = [x(id(j)) y(id(j))];
end

it = it+1

s(it) = curr;
end

```

На рис. 4.22 представлено графік зміни цільової функції в залежності від кількості ітерацій, на рис. 4.23 – результат кінцевої ітерації алгоритму.

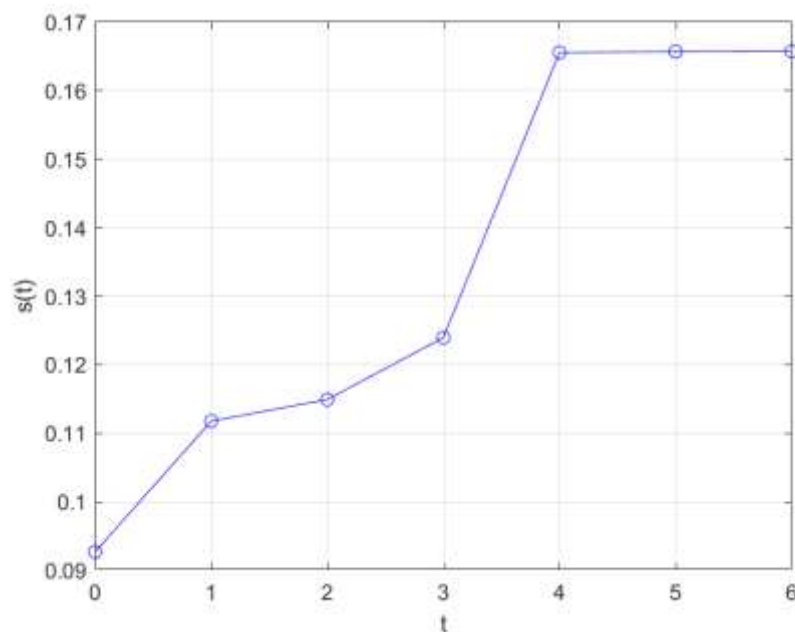


Рисунок 4.22 – Графік зміни цільової функції

3. Знаходження результуючої матриці проєктивного перетворення:

```

for j=1:4
    movingPoints(j,:) = [x(id(j)) y(id(j))];
end
T = fitgeotrans(movingPoints, fixedPoints,
'projective');

```

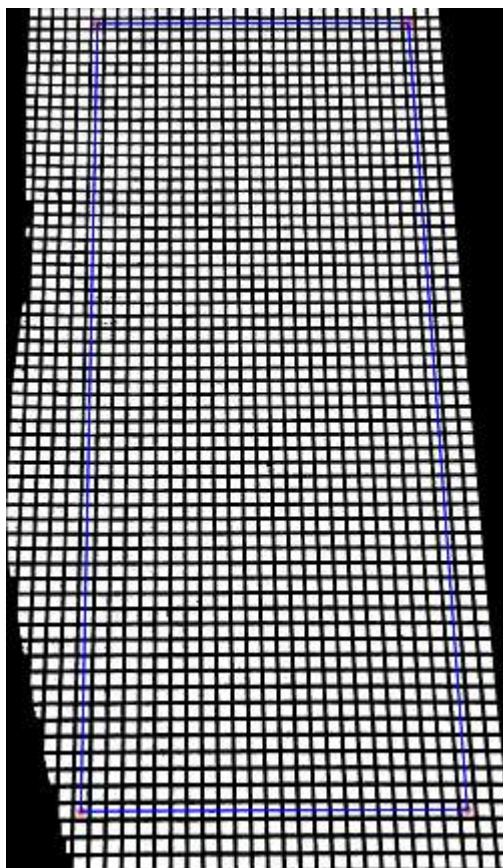


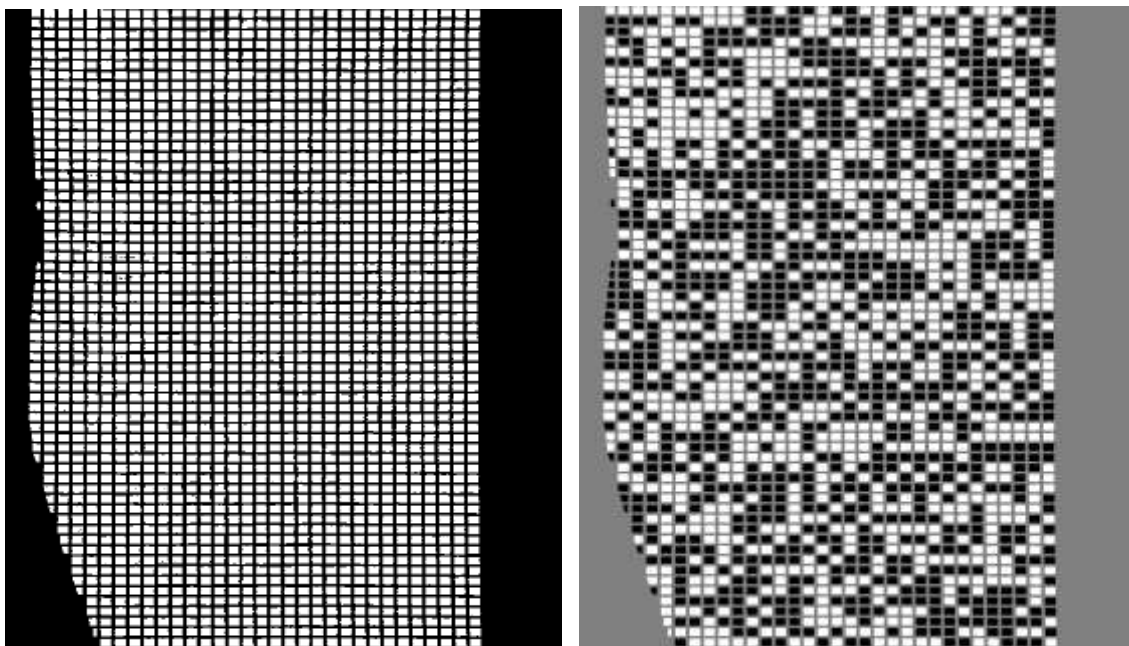
Рисунок 4.23 – Результат кінцевої ітерації алгоритму

4.3.2 Зауваження до реалізації методу

Зауважимо, що початкова ініціалізація досить вибрана вдало, запропонований вже на 4 ітерації по суті дозволяє правильно визначити шукану матрицю перетворення, тим не менш алгоритм збігається до дещо меншого 4-кутника опорних точок, оскільки на краях зображення присутні невеликі нелінійні спотворення, спричинені:

- а) нелінійністю оптичної системи смартфона;
- б) скручуванням по краях листка паперу після друку.

Трансформована маска біт-контейнера зображена на рис. 4.24а і представляє собою прямокутну систему клітинок, як і повинно бути. На рис. 4.24б представлено трансформоване зображення біт-контейнера.



а)

б)

Рисунок 4.24 – Результати трансформації: а) маска біт-контейнера; б) зображення біт-контейнера

Слід зауважити, що параметри проєктивного перетворення шукаються з точністю до масштабів по осях, оскільки фіксовані точки вибираються у вигляді довільного прямокутника (у даному випадку довжина і ширина цього прямокутника вибирається як довжина і ширина вхідного зображення відповідно).

4.4 Декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

Загальну структурну блок-схему алгоритму декодування наведено на рис. 4.25 [79].

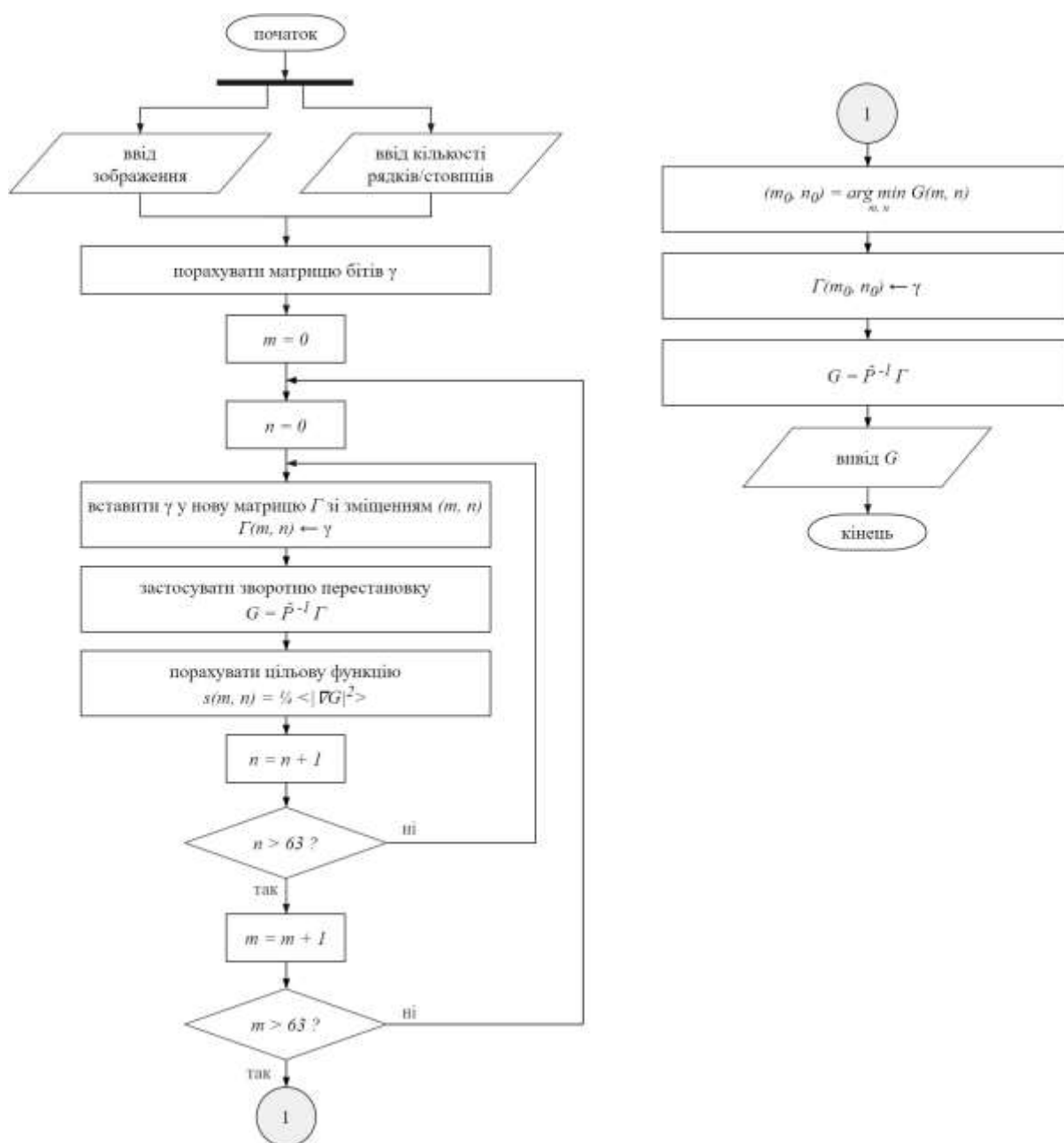


Рисунок 4.25 – Блок-схема алгоритму декодування

4.4.1 Визначення кількості рядків і стовпців

Структурну блок-схему методу знаходження кількості рядків і стовпців наведено на рис. 4.26.



Рисунок 4.26 – Блок-схема алгоритму знаходження кількості рядків/стовпців

На вхід алгоритму подається трансформована маска біт-контейнера (змінна bw), що представляє собою об'єднання масок для окремих біт-контейнерів (рис. 4.24а), після чого знаходяться суми по рядках (змінна $s1$) і стовпцях (змінна $s2$):

$$s1 = \text{sum}(bw, 1);$$

$$s2 = \text{sum}(bw, 2);$$

Далі методами математичної морфології рахуються нижні (змінні $m1$, $m2$) і верхні ($d1$, $d2$) огинаючі; потім, як середнє між верхніми і нижніми огинаючими, пороги ($t1$, $t2$):

```

m1 = imerode(s1, ones(1,63));
m2 = imerode(s2, ones(63,1));
d1 = imdilate(s1, ones(1,63));
d2 = imdilate(s2, ones(63,1));
t1 = 0.5*(m1+d1);
t2 = 0.5*(m2+d2);

```

Результати наведено на рис. 4.27.

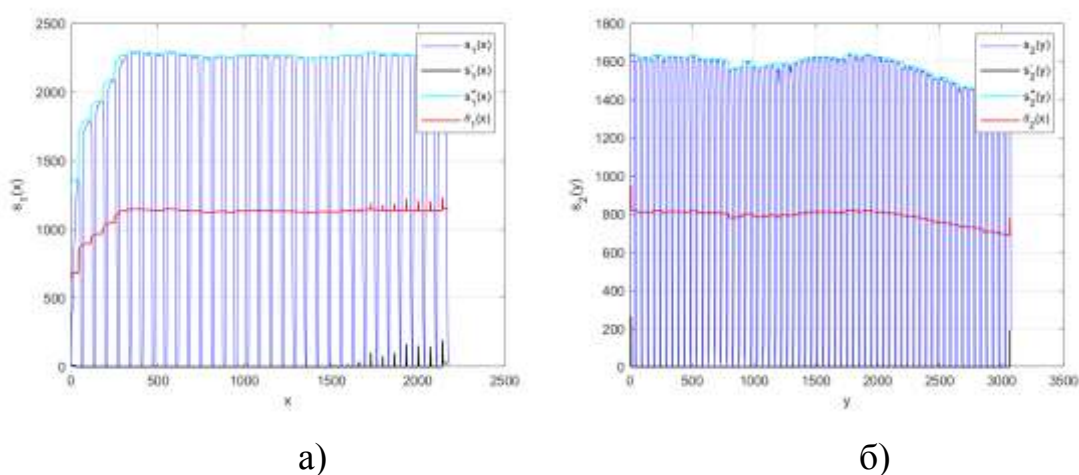


Рисунок 4.27 – Графіки середніх, огинаючих і порогів: а) рядки; б) стовпці

Після чого рахується кількість стовпців/рядків як кількість перевищень порогу для відповідних (по рядках/стовпцях) сум:

```

s1 = diff([0; s1(:)>t1(:)]);
s2 = diff([0; s2(:)>t2(:)]);
w = sum(s1>0);
h = sum(s2>0);

```

4.4.2 Заповнення матриці біт-контейнера

Маючи правильні розміри (змінні h, w), з трансформованого зображення f заповнюємо по координатах центроїдів (x, y) матрицю бітів

g:

```

dy = (max(y)-min(y))/(h-1);
dx = (max(x)-min(y))/(w-1);

r = round( (y)-min(y))/dy+1 );
c = round( (x-min(x))/dx+1 );

g(r,c) = f(round(y),round(x));

```

Заповнена матриця біт-контейнера показана на рис. 4.28, при цьому значення бітів 1 кодується білим кольором, бітів 0 – сірим кольором, а невизначені значення (відсутні клітинки) – чорним.

4.4.3 Визначення зсуву у повній матриці бітів

Отримана матриця бітів має розмір, що не співпадає з розміром повної матриці бітів (у даному випадку 63×63). Для коректного декодування зображення необхідно знайти зсув у повній матриці бітів, куди вставляється заповнена матриця біт-контейнера, решта матриці заповнюється невизначеним значенням – 1/2.



Рисунок 4.28 – Заповнена матриця біт-контейнера

Для знаходження зсуву послідовно перебираються всі можливі положення отриманої матриці бітів у повній матриці бітів, після чого застосовується інверсна перестановка і від отриманого зображення розраховується цільова функція (3.52), що була введена у п. 3.4.3. Графік цільової функції для всіх можливих зсувів наведено на рис. 4.29.

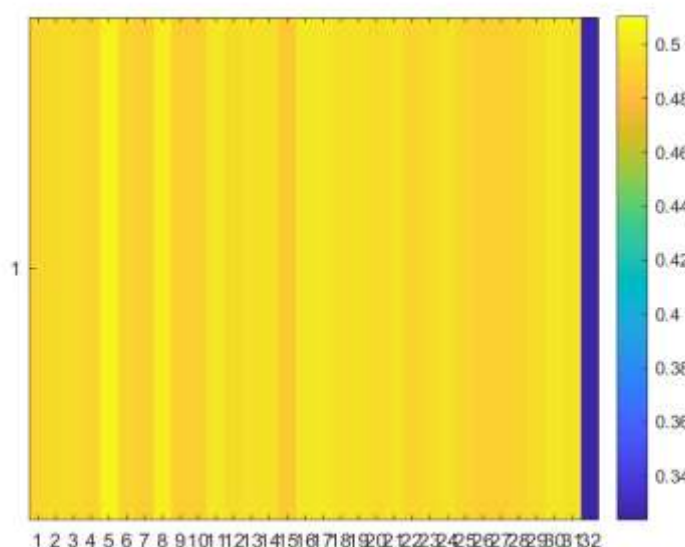


Рисунок 4.29 – Графік цільової функції для всіх можливих зсувів

У даному випадку мінімум знаходиться в точці (1, 32), що відповідає індексам розташування верхнього лівого заповненої матриці кута біт-контейнера у повній матриці. Повна матриця біт-контейнера, куди із правильним зсувом вставлена отримана матриця бітів, показана на рис. 4.30.



Рисунок 4.30 – Повна матриця біт-контейнера

4.4.4 Декодування повної матриці біт-контейнера

Декодування повної матриці біт-контейнера проводиться шляхом інверсної перестановки [90]–[91].

Оскільки велика кількість даних пропущена, то до отриманого зображення застосовується процедура фільтрації, коли для кожного клітинки розміром $[k \ k]$ розраховується `mode` – значення, що зустрічається найчастіше не враховуючи невизначених значень (нагадаємо, що їх колір 1/2):

```
proc = @(x) mode(x(x~=1/2));
fun = @(block_struct) proc(block_struct.data(:)) *
ones(size(block_struct.data));
res = blockproc(res, [k k], fun);
res(isnan(res))=0;
```



Рисунок 4.31 – Результат застосування інверсної псевдовипадкової перестановки до повної матриці біт-контейнера

Кінцевий результат декодування маркера (змінна `res`) представлено на рис. 4.32, всі біти, не зважаючи на досить значну частину пропусків (див. рис. 4.30), відновлено правильно.



Рисунок 4.32 – Кінцевий результат декодування маркера

Для ілюстрації на рис. 4.33 покажемо поруч зображення-повідомлення, що використовувалось для побудови даного AR-маркера (див. рис. 4.2), зображення-повідомлення, що отримано в результаті декодування AR-маркера і їх по-бітову різницю (як результат по-бітової операції XOR). Як бачимо, помилки відсутні.

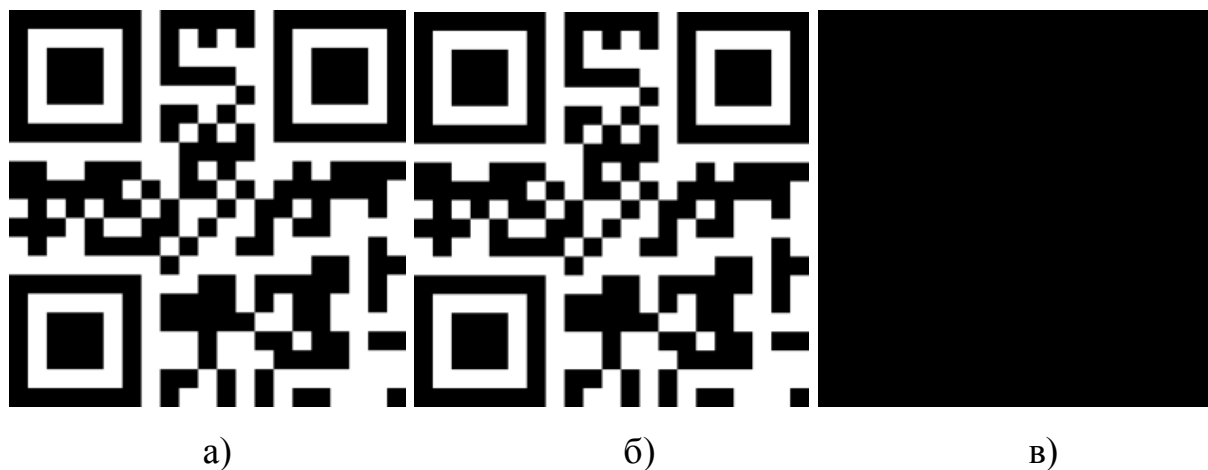


Рисунок 4.33 – Порівняння результатів: а) вхідний QR-код; б) декодований QR-код; в) їх різниця

4.5 Загальні методи використання мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

Загальну структурну схему алгоритму використання мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності наведено на рис. 4.34.

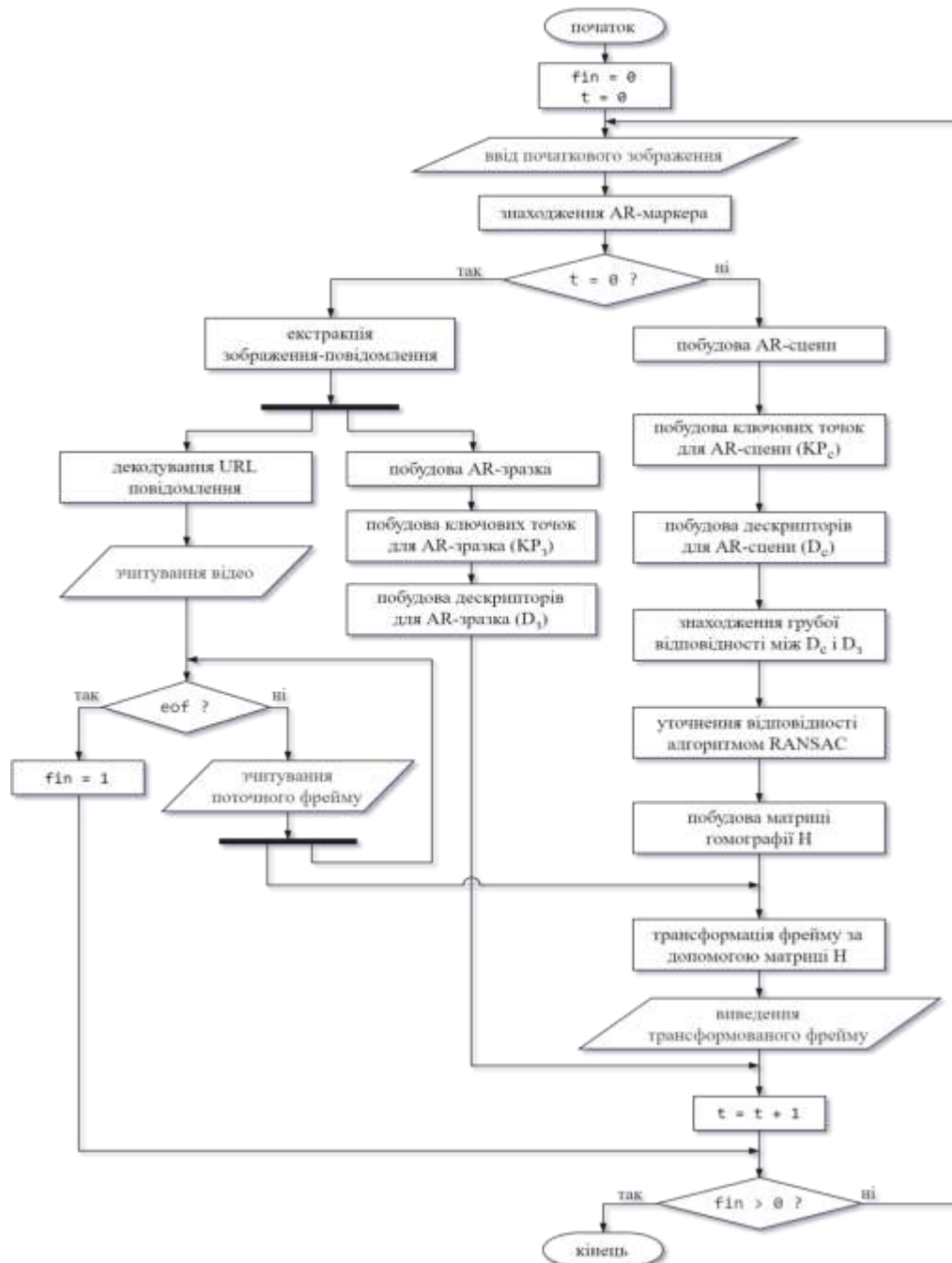


Рисунок 4.34 – Блок-схема алгоритму використання стохастичного маркера доповненої реальності

4.5.1 Проеціювання віртуального об'єкта на площину маркера

В якості віртуальних об'єктів, що використовується для демонстрації можливостей метода, обрано стандартний 3d-об'єкт системи MATLAB «чайник», що задається набором своїх 3d-координат за допомогою функції `teapotGeometry` [233] та 3d-об'єкт «куб», який задається за допомогою функції:

```
function [vertices, faces] = cube
vertices = [
    0 0 0
    1 0 0
    1 1 0
    0 1 0
    0 0 1
    1 0 1
    1 1 1
    0 1 1] - ...
    1/2*[1 1 0];

faces = [
    1 2 6 5
    2 3 7 6
    3 4 8 7
    4 1 5 8
    1 2 3 4
    5 6 7 8];
```

Результати збережено у змінних:

```
[vertices2, faces2, cindex] = teapotGeometry;
[vertices1, faces1] = cube;
```

Процедура корекції радіальних спотворень зображення `im` виконується з використанням знайдених параметрів камери `cameraParams` за допомогою стандартної функції MATLAB:

```
im = undistortImage(im, cameraParams);
```

Для визначення внутрішніх параметрів камери потрібно знайти відповідні точки на зображенні маркера `imagePoints` і на зображенні сцени `worldPoints`, для чого використовується знайдена раніше і уточнена матриця трансформації T (при цьому враховано масштаб переходу до координат сцени $scale = 8*8/600*25.4$):

```
boxPolygon = [0 0; 63 0; 63 63; 0 63];
newBoxPolygon = transformPointsForward(T,
8*boxPolygon);
```

```
scale = 8*8/600*25.4;
imagePoints = double(newBoxPolygon);
worldPoints = scale*double(boxPolygon);
```

Наступним кроком знаходяться параметри внутрішнього калібрування $[R, t]$:

```
[R, t] = extrinsics(imagePoints, worldPoints,
cameraParams);
```

Далі проводиться проєціювання віртуальних об'єктів «чайник» (змінна `vertices1`, масштаб $L1$) та «куб» (змінна `vertices2`, масштаб $L2$) та рамки маркера (змінна `worldPoints`) на площину AR-маркера (розташування обох об'єктів у центрі маркера – точці $[63/2 \ 63/2 \ 0]$):

```
L1 = 63;
L2 = 8;
projectedVertices1 = worldToImage(cameraParams, R, t,
scale * (L1*vertices1+[63/2 63/2 0]));

projectedVertices2 = worldToImage(cameraParams, R, t,
scale * (L2*vertices2+[63/2 63/2 0]));
```

```
projectedWorldPoints = worldToImage(cameraParams, R,
t, [worldPoints zeros(size(worldPoints,1),1)]);
```

Результати проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності (з попереднім калібруванням камери по маркеру і корекцією радіальних спотворень) наведено на рис. 4.35–4.36.

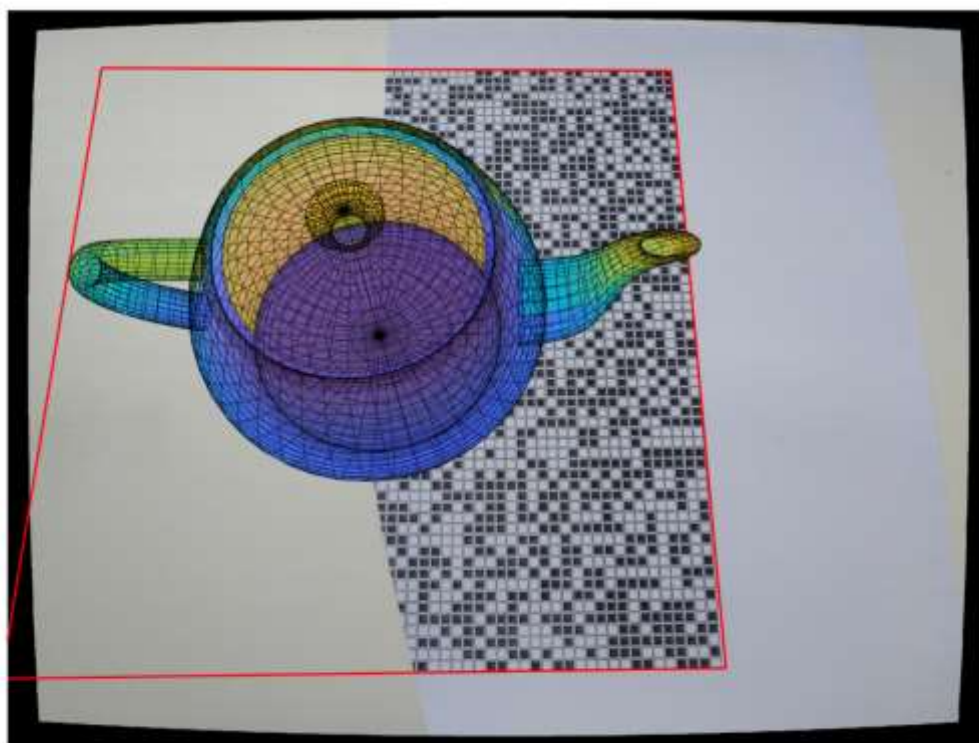


Рисунок 4.35 – Проеціювання віртуального об'єкта на площину AR-маркера

Спрощений підхід не вимагає повного калібрування камери і виконується так:

```
vertices1 = scale*vertices1;
projectedVertices1 = [transformPointsForward(T, L1*
vertices1(:,1:2) + scale*[1 1]*63/2)
sqrt(det(T.T(1:2,1:2)))*L1*vertices1(:,3)];

vertices2 = scale*vertices2;
```

```
projectedVertices2 = [transformPointsForward(T, L2*
vertices2(:,1:2) + scale*[1 1]*63/2)
sqrt(det(T.T(1:2,1:2)))*L2* vertices2(:,3)];
```

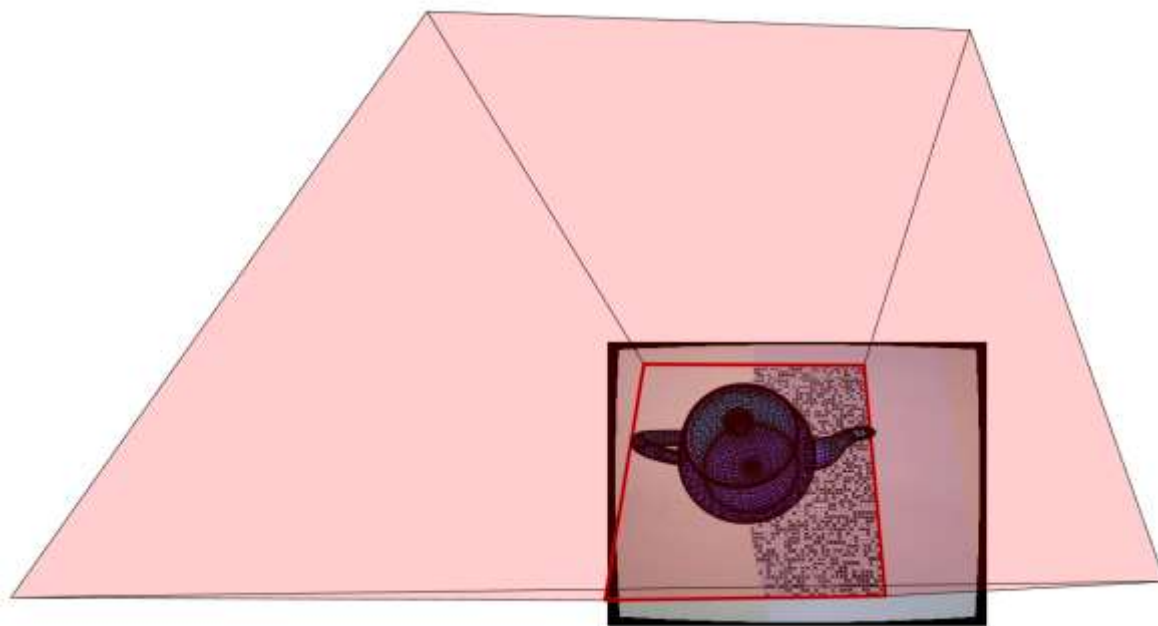


Рисунок 4.36 – Зображення віртуального об'єкта у системі координат камери, показано віртуальний куб, що побудовано на кутах маркера; вказано реальний масштаб

Візуалізація проводиться стандартно:

```
patch('Faces', faces1, 'Vertices',
projectedVertices1, 'facecolor', 'b', 'faceAlpha',
0.125);
p=patch('Faces', faces2, 'Vertices',
projectedVertices2, 'FaceVertexCData', cindex,
'FaceColor', 'none', 'faceAlpha', 0.5);
p.FaceAlpha = 1; % remove the transparency
axis equal off % make the axes equal and invisible
view(2)
```

На рис. 4.37–4.38 показано результати застосування спрощеного підходу, на рис. 4.39 показано рендеринг віртуального об'єкта – вивід його зображення з урахуванням освітлення, властивостей матеріалів та інших параметрів, що дозволяють отримувати фотореалістичне зображення

віртуального об'єкту, що накладено на зображення реальної сцени.

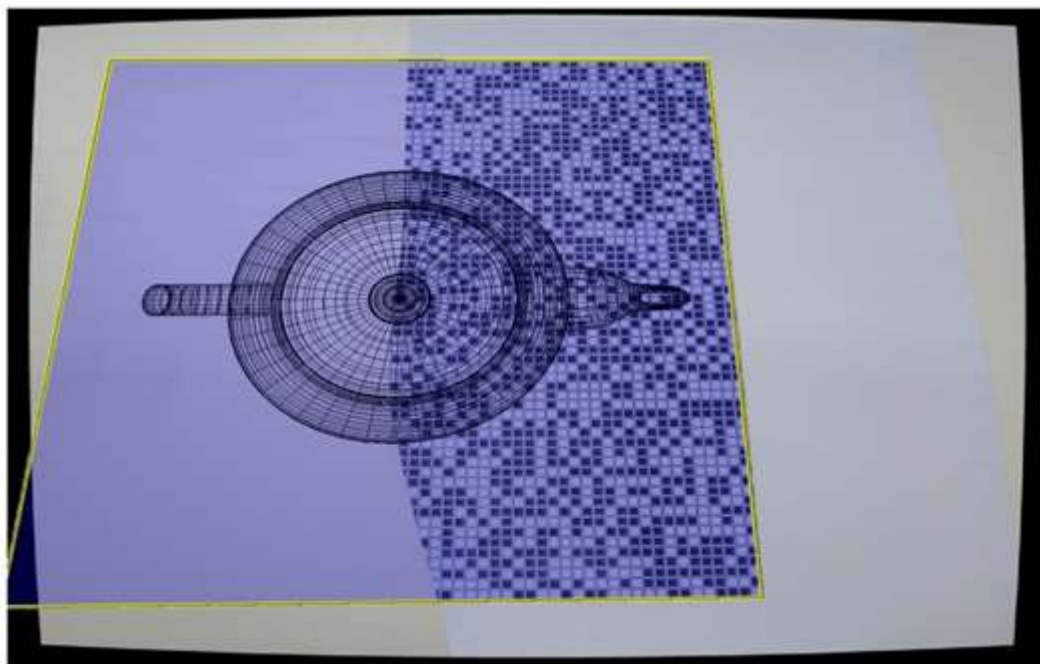


Рисунок 4.37 – Результат використання спрощеного підходу для проєціювання віртуального об'єкта на площину AR-маркера (пор. з рис. 4.35)

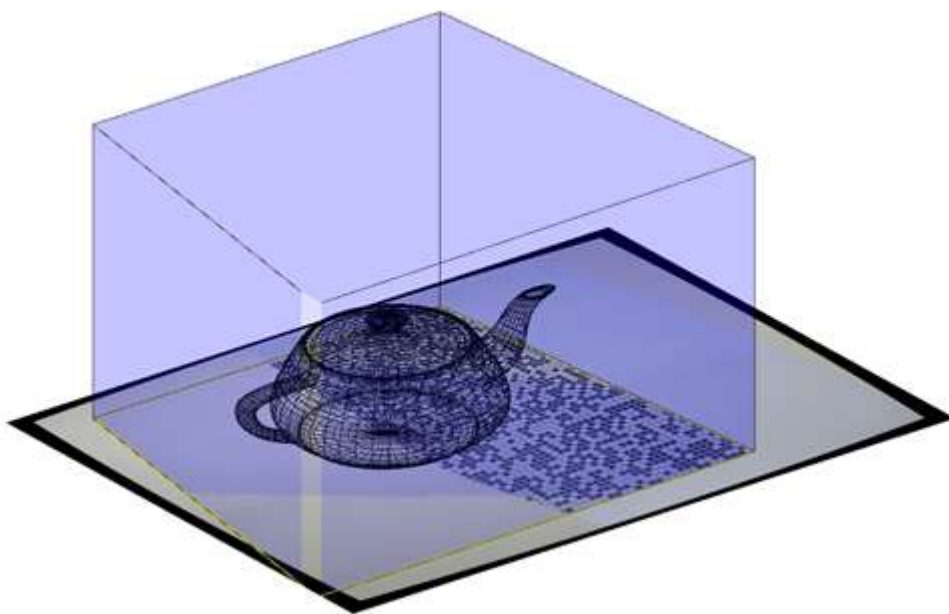


Рисунок 4.38 – Зображення віртуального об'єкта у системі координат камери, для ілюстрації показано віртуальний куб, що побудовано на кутах маркера

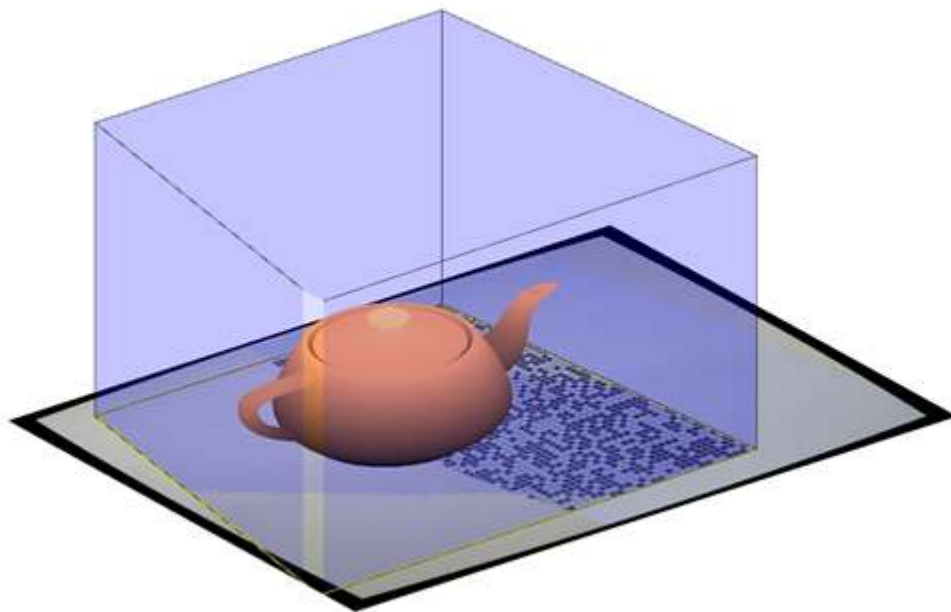


Рисунок 4.39 – Рендеринг віртуального об'єкту

4.5.2 Рендеринг відеопотоку в області AR-маркера

Рендеринг відео-потoku проводиться аналогічно. Спочатку з декодованого повідомлення будується url для доступу до відео, шляхом додавання стандартного префіксу:

```
url = ['https://www.youtube.com/watch?v='  
decodedMessage];
```

На рис. 4.40 показано скріншот відкривання відеоролика у YouTube, що знаходиться за вказаною адресою [236].

Доступ до відео-потoku отримуємо за допомогою примірника класу VideoReader:

```
reader = VideoReader(url);
```

і у циклі проводиться вичитка і геометрична трансформація кожного кадру

frame у область маркера за допомогою уточненої матриці проєктивного перетворення T :

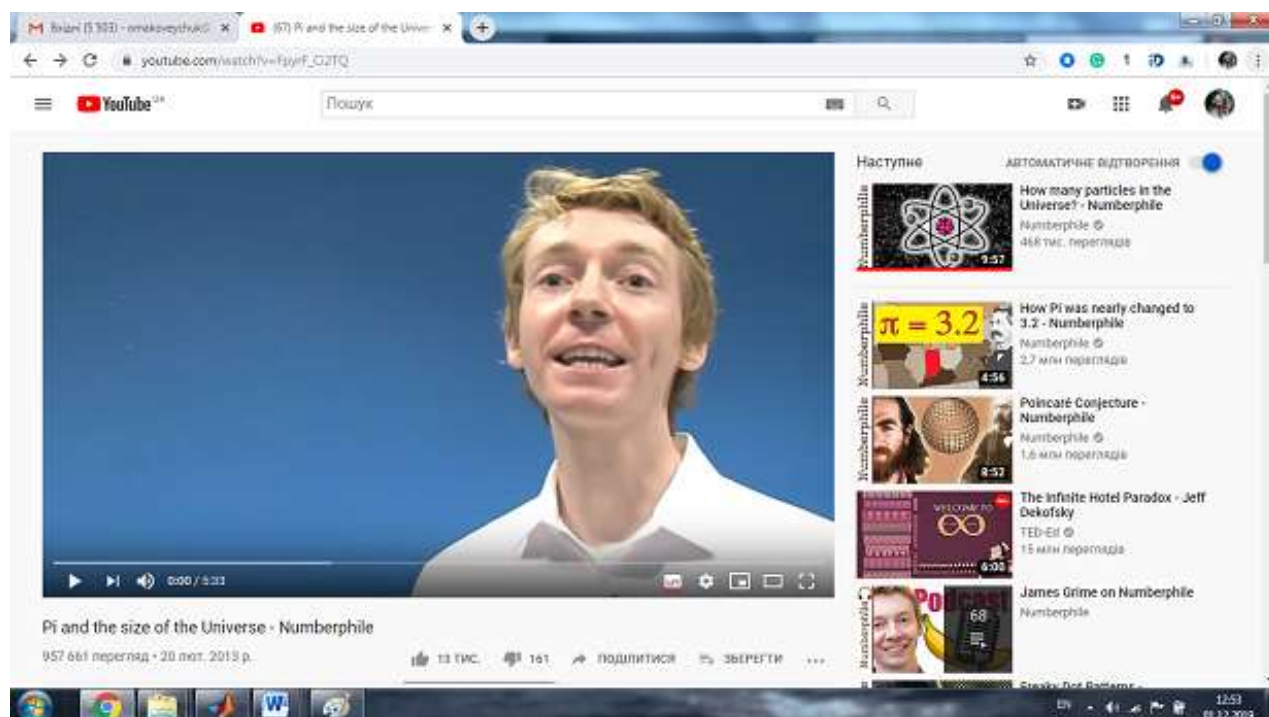


Рисунок 4.40 – Скріншот відео-ролика, що знаходиться у YouTube за адресою, декодованою з AR-маркера

```

while hasFrame(reader)
    frame = readFrame(reader);

    contentImage = double(frame)/255;
    contentImage = imresize(contentImage,
size(boxImage));

    mask = imwarp(ones(size(boxImage)), T,
'OutputView', imref2d(size(sceneImage)));
    contentImage = imwarp(contentImage, T,
'OutputView', imref2d(size(sceneImage)));

    res =
im.*~mask+0.2*im.*mask+0.8*contentImage;
    res = insertShape(res, 'Polygon',
reshape(newBoxPolygon', [1 8]), 'Color', 'y',
'linewidth', 4);

end

```


На рис. 4.41 показано окремий кадр з даного відео, на рис. 4.42 – результат рендерингу відео-потoku в області AR-маркера.



Рисунок 4.41 – Перший кадр відео

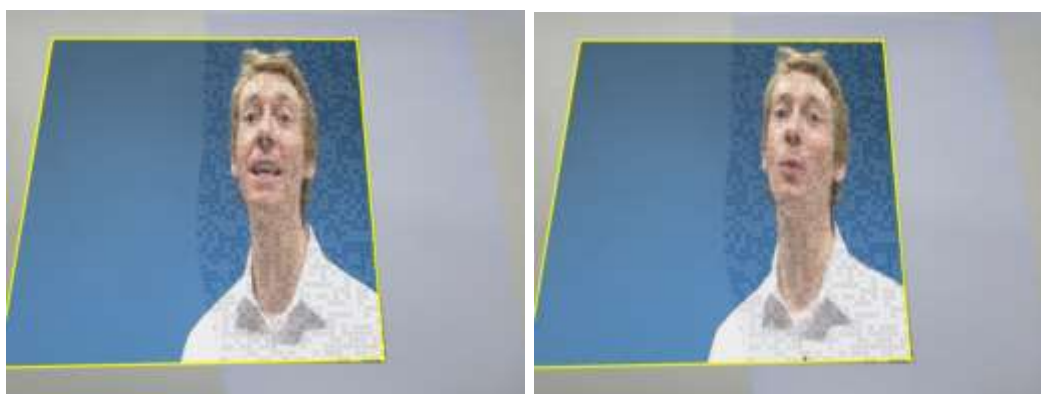


Рисунок 4.42 – Результат рендерингу послідовних кадрів в AR-маркері

Зауважимо, що оскільки область маркера має квадратну форму, а кадри відео прямокутну, то наявне спотворення масштабу по осях, що у даному розгляді не є суттєвим.

4.6 Теоретичні оцінки якості мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

4.6.1 Теоретичні оцінки помітності маркерів

Як критерій оцінки такого показника якості, як помітність,

запропоновано (див. п. 2.4) використовувати середній час у секундах τ_D виявлення тестового AR-маркера (рис. 4.5). При цьому слід враховувати, що основною платформою використання систем доповненої реальності є мобільні пристрої (див. також пп. 1.1–1.2), самі AR-системи в основному розраховані на функціонування у відео-режимі. У такому випадку для практичних застосувань достатньо, щоб час виявлення був менше часового проміжку між кадрами, тобто щоб виконувалась нерівність

$$\tau_D \leq \frac{1}{v} \quad (4.1)$$

де v – частота кадрів.

Для сучасних смартфонів типове значення $v = 30$ кадрів/сек [221], [246], а як було показано (див. п. 4.2), запропонований метод формування мозаїчних стохастичних маркерів дозволяє побудувати і імплементувати ефективний алгоритм виявлення (який суттєвим чином використовує властивість мозаїчності), що виконується за час $\tau_D \leq 0,03$ сек.

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка середнього часу у секундах виявлення тестового AR-маркера $\tau_D \leq 0,03$ сек.

4.6.2 Теоретичні оцінки простоти маркерів

Як критерій оцінки такого показника якості, як простота, запропоновано (див. п. 1.7) використовувати кількість кольорів n_c (градацій сірого), що необхідні для побудови маркера.

Запропонований метод формування мозаїчних стохастичних маркерів використовує 3 градації сірого – чорний та білий для кодування

бітів 0 та 1 відповідно, проміжний (сірий) колір, який ми будемо позначати c_b , – для рамки біт-контейнера.

Дана кількість є мінімальною для кодування сигналу з індикацією невизначеного стану [222].

Зауважимо, що подібний принцип використовується у цифровій схемотехніці, де також окрім логічного 0 і логічної 1 використовується т. зв. «третій стан» (або Z-стан). Як вказано в [223], одним із способів підключення логічних елементів на загальний вихід, який найбільш широко використовується, заснований на використанні в їх вихідних ланцюгах електронних буферних схем, здатних під дією керуючих сигналів або підключати до навантаження вихідний логічний сигнал, приймаючий значення (стану) 0 чи 1, або відключати вихід від навантаження – переводити його в так званий третій стан (Z-стан).

Враховуючи, що запропоновані алгоритми детекції границь біт-контейнера використовують обчислення локальної дисперсії по ковзаючому квадратному вікні, для максимізації відгуку детектора, необхідно, щоб були забезпечені максимальні перепади між рамкою і кольором біт-детектора. Покажемо, що ця умова задовільняється при виборі для рамки проміжного кольору, що знаходиться посередині динамічного діапазону і рівний $c_b = \frac{1}{2}$.

Не втрачаючи загальності, можемо вважати, що мінімальна товщина ліній на зображенні під час детектування складає 1 піксель. У такому випадку мінімальний розмір ковзаючого вікна є 3×3 . Розрахуємо тепер дисперсії для основних патернів у вікні розміром 3×3 , враховуючи, що значення дисперсії не залежить від порядку елементів у послідовності, і, що з міркувань симетрії, значення дисперсії не зміниться, якщо всі 0 замінити на 1 і навпаки:

$$\text{Var} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ c_b & c_b & c_b \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \text{Var} \begin{pmatrix} 0 & c_b & 0 \\ 0 & c_b & 0 \\ 0 & c_b & 0 \end{pmatrix} = \frac{c_b^2}{4}, \quad (4.2)$$

$$\text{Var} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ c_b & c_b & c_b \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \text{Var} \begin{pmatrix} 0 & c_b & 1 \\ 0 & c_b & 1 \\ 0 & c_b & 1 \end{pmatrix} = \frac{c_b^2 - c_b + 1}{4}, \quad (4.3)$$

$$\text{Var} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ c_b & c_b & c_b \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \text{Var} \begin{pmatrix} 1 & c_b & 1 \\ 1 & c_b & 1 \\ 1 & c_b & 1 \end{pmatrix} = \frac{(1 - c_b)^2}{4}, \quad (4.4)$$

$$\text{Var} \begin{pmatrix} c_b & c_b & c_b \\ c_b & 0 & 0 \\ c_b & 0 & 0 \end{pmatrix} = \text{Var} \begin{pmatrix} c_b & c_b & c_b \\ c_b & 1 & 1 \\ c_b & 1 & 1 \end{pmatrix} = \frac{5c_b^2}{18}. \quad (4.5)$$

При цьому, очевидно, що

$$\text{Var} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \text{Var} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = 0. \quad (4.6)$$

Аналізуючи вирази (4.2)–(4.5), легко бачити, що всі вони приймають мінімальне значення при $c_b = \frac{1}{2}$, при цьому мінімум досягається для виразу

(4.2), який відповідає детекції прямих ліній, і рівний $\frac{1}{16}$ (див. рис. 4.43).

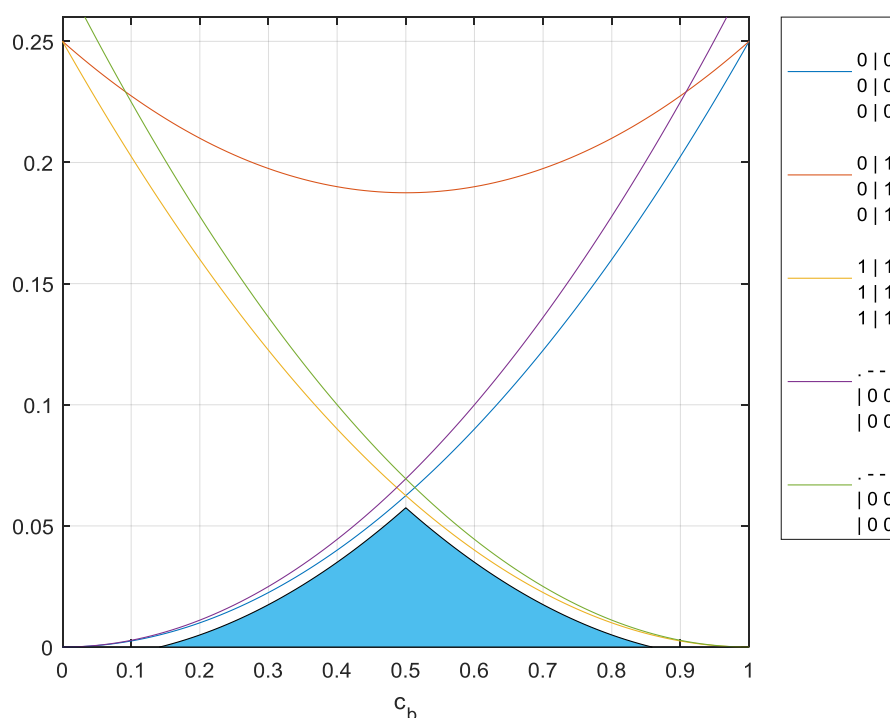


Рисунок 4.43 – Графіки залежності дисперсії від значення проміжного кольору c_b для основних патернів у квадратному вікні розміром 3×3

Таким чином, відгук фільтра буде не менше $\frac{1}{16}$ для границь, і 0 для області клітинки, отже для знаходження області маркера достатньо використовувати порогову бінаризацію для зображення локальної дисперсії по ковзаючому квадратному вікні.

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка кількості градацій сірого, що необхідні для побудови маркера, $n_c = 3$.

4.6.3 Теоретичні оцінки інформативності маркерів

Як критерій оцінки такого показника якості, як інформативність, запропоновано (див. п. 2.4) використовувати середню ентропію

повідомлення e_m у бітах/піксел, що закодовано у маркері.

В якості зображення-повідомлення у даній роботі запропоновано використовувати зображення QR-кодів. Враховуючи, що з міркувань робастності необхідно дублювати пікселі повідомлення з коефіцієнтом дублювання k , то за побудовою, маємо, що

$$e_m = \frac{1}{k^2}. \quad (4.7)$$

Як буде показано нижче (див. п. 4.6.5), достатнім є значення $k = 3$.

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка середньої ентропії повідомлення у маркері

$$e_m = \frac{1}{9} \text{ біт/піксель.}$$

4.6.4 Теоретичні оцінки орієнтованості маркерів

Як критерій оцінки такого показника якості, як орієнтованість, запропоновано (див. п. 2.4) використовувати можливість визначення положення камери по наявному зображенню маркера.

Як буде показано далі, запропонована модель мозаїчного стохастичного маркера дозволяє однозначно визначати положення камери по зображенню маркера без врахування додаткової апріорної інформації.

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка можливості визначення положення камери по наявному зображенню маркера – так.

4.6.5 Теоретичні оцінки робастності маркерів

Як критерій оцінки такого показника якості, як робастність, запропоновано (див. п. 2.4) використовувати кількість помилково декодованих бітів повідомлення n_e (в залежності від типу і рівня помилок) [81], [83].

Класифікація типів помилок, що ми будемо розглядати, наведено нижче на рис. 4.44.

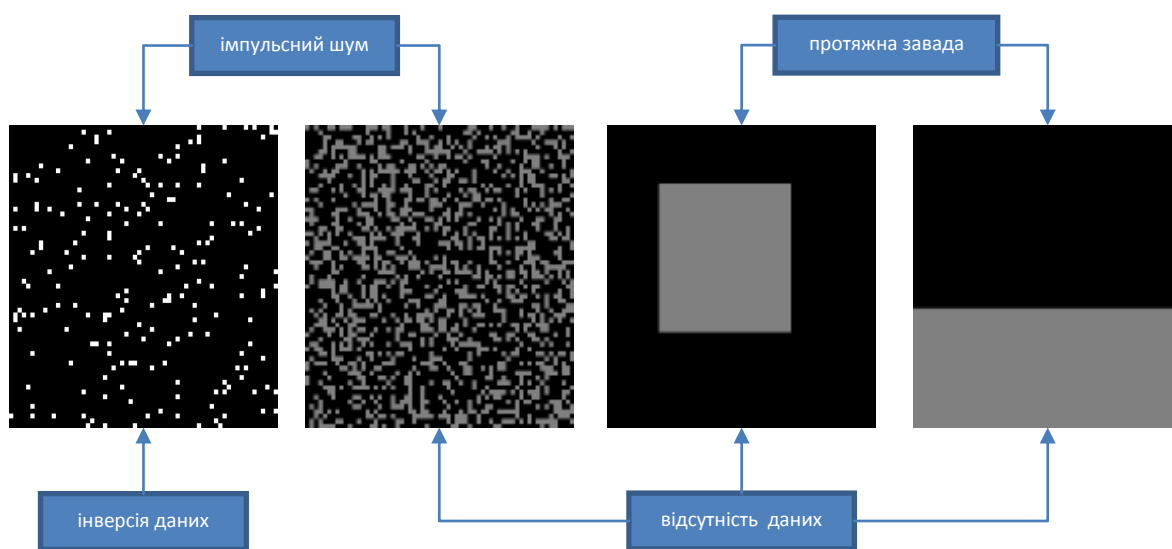


Рисунок 4.44 – Класифікація типів помилок

Розрахуємо спочатку імовірність правильної відновлюваності повідомлення при неправильному розпізнаванні (інверсії) частини бітів.

Нехай імовірність інверсії бітів є q . Як було вказано вище, кожен біт дублюється k^2 разів (матрицею $k \times k$). Клітинка відновиться правильно за умови, що кількість правильно розпізнаних бітів є більшою за кількість інвертованих. Імовірність такої події $p_1(q)$ задається кумулятивним біноміальним розподілом:

$$p_1(q) = 1 - \sum_{i=0}^{\frac{k^2}{2}} \binom{k^2}{i} q^i (1-q)^{k^2-i}. \quad (4.8)$$

Графік теоретично розрахованої імовірності відновлення даних в залежності від імовірності інверсії бітів показано на рис. 4.45.

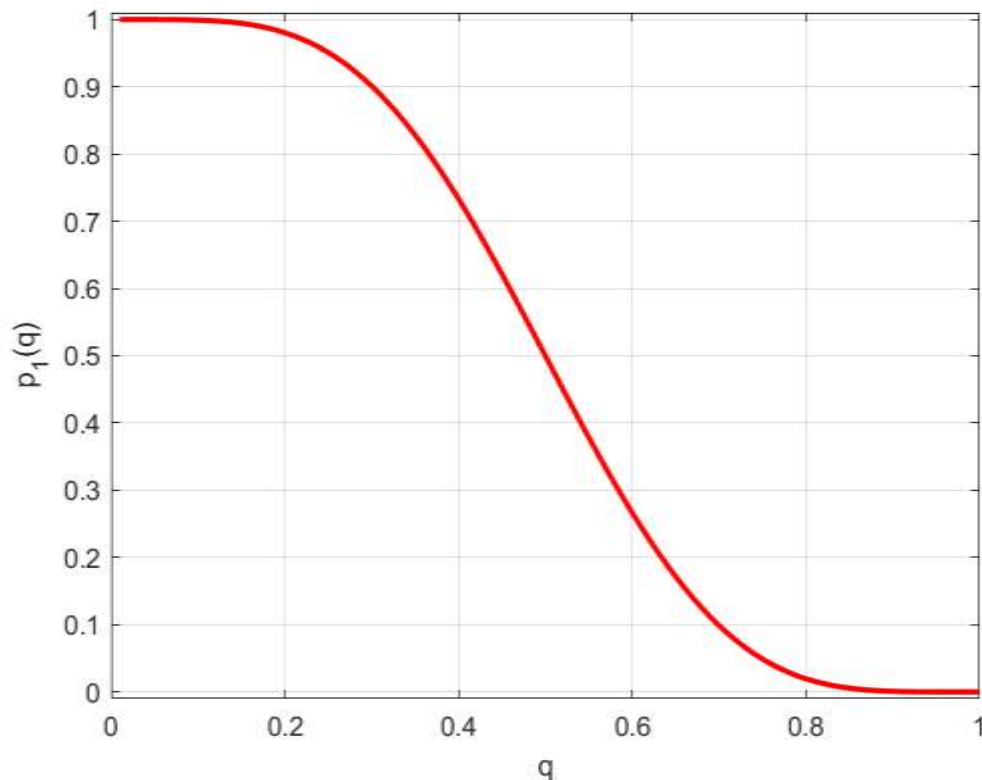


Рисунок 4.45 – Графік теоретично розрахованої за виразом (4.8) імовірності відновлення даних в залежності від імовірності інверсії бітів

Знайдемо тепер умову правильної відновлюваності повідомлення при втраті частини зображення, при цьому вважається, що всі розпізнані біти були розпізнані правильно, тобто похибка виникає тільки внаслідок втрати частини бітів. Нехай імовірність втрати біта є q , при цьому, як було вказано вище, кожен піксел ми дублювали k^2 разів. Клітинка відновиться правильно за умови, що в її межах знайдеться хоча б один правильно знайдений біт, імовірність такої події $p_2(q)$ легко розраховується:

$$p_2(q) = 1 - q^{k^2}. \quad (4.9)$$

Графік теоретично розрахованої імовірності відновлення даних в залежності від імовірності пропуску бітів показано рис. 4.46.

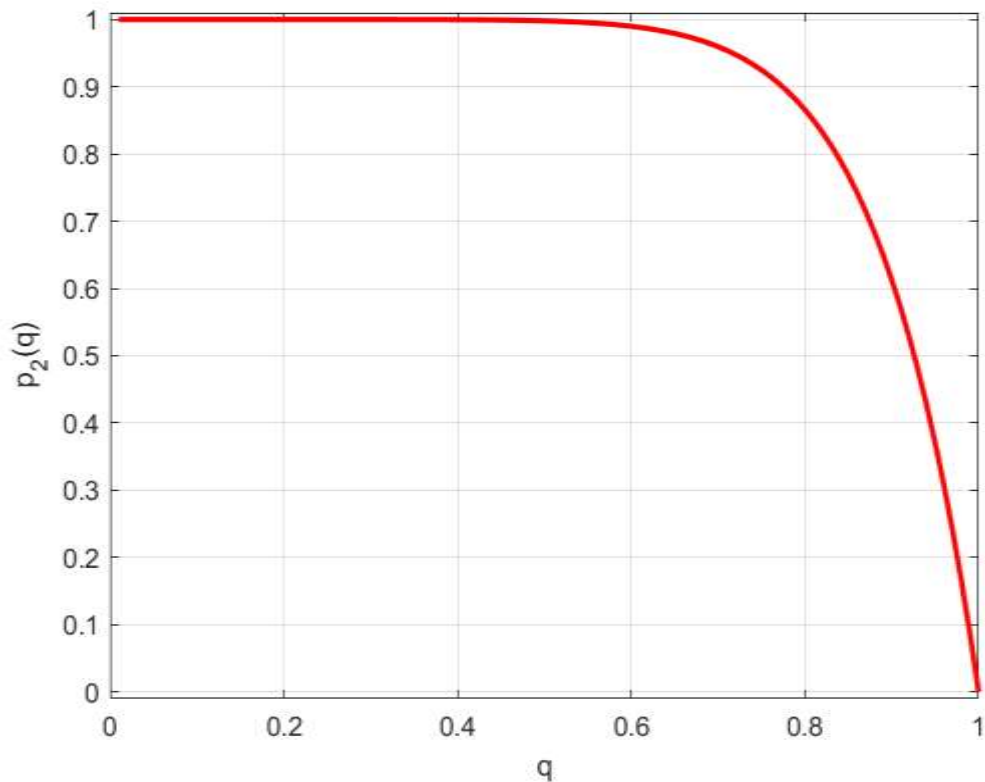


Рисунок 4.46 – Графік теоретично розрахованої за виразом (4.9) імовірності пропуску даних в залежності від імовірності інверсії бітів

Оскільки обидві події (інверсія біта чи його втрата) є незалежними, то загальна імовірність правильного розпізнавання p буде даватися добутком:

$$p(q_1, q_2) = p_1(q_1) \cdot p_2(q_2). \quad (4.10)$$

Якщо QR-код має розмір $N \times N$ клітинок, то математичне очікування n_e кількості невідновлених клітинок є

$$n_e = (1-p)N^2. \quad (4.11)$$

Умова правильного розпізнавання QR-коду:

$$n_e \leq 1. \quad (4.12)$$

(вважатимемо, що за рахунок певної надлишковості QR-коду, допускається 1 нерозпізнана клітинка, на практиці надлишковість забезпечується використанням кодів Ріда-Соломона [18] і він розпізнається правильно за відсутності більше ніж 1 клітинки).

Таким чином, отримуємо умову правильного розпізнавання:

$$p > 1 - \frac{1}{N^2}. \quad (4.13)$$

На рис. 4.47 зображено область допустимих значень імовірностей q_1 і q_2 при яких виконується умова (4.13).

Якщо враховувати тільки помилки, що виникають внаслідок втрати бітів, то нерівність (4.13), можна записати як

$$(1-q)^{k^2} N^2 \leq 1, \quad (4.14)$$

звідки знаходиться умова для визначення k :

$$k > \sqrt{-\frac{2 \ln N}{\ln(1-q)}} \quad (4.15)$$

(зауважимо, що підкореневий вираз буде додатнім, оскільки за

визначенням $q < 1$, отже і $\log(1-q) < 0$).

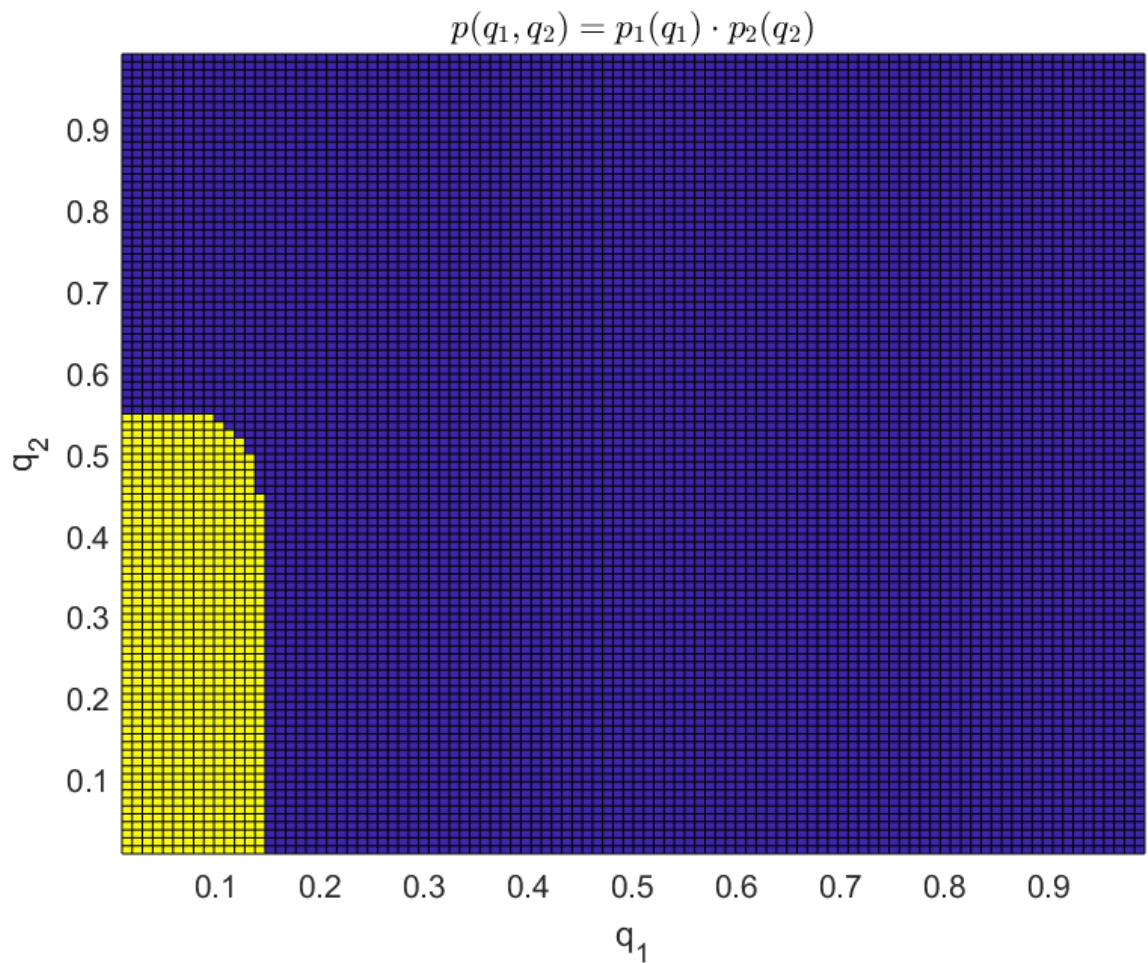


Рисунок 4.47 – Область допустимих значень імовірностей q_1 і q_2

Для QR-коду, як вже було вказано, мінімальне значення розміру $N = 21$ [18], при $q = 1/2$ (вимога робастності), отримуємо за формулою (4.15), що $k > 2.96$, отже мінімальне значення $k = 3$.

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка кількості помилково декодованих бітів повідомлення $p_e < 1$ при імовірності втрати бітів повідомлення $q \leq 1/2$ (значення коефіцієнта дублювання $k^2 = 9$).

4.6.6 Теоретичні оцінки криптостійкості маркерів

Як критерій оцінки такого показника якості, як криптостійкість, запропоновано (див. п. 2.4) використовувати середню кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації.

Нижче на основі підходящої моделі формування зображення ми виведемо обмеження на розмір блоку – покажемо, що якщо розмір блоку b перевищує певне значення, то не існує жодного алгоритму, який при відсутності додаткової апріорної інформації може знайти правильну перестановку, отже криптостійкість буде максимальна (середня кількість спроб буде порядку $(b^2)!$) [85], [94], [101].

Для розміру блоку b , що менше за критичне значення, існує ефективний спосіб «сліпого» (без залучення додаткової апріорної інформації) відновлення блочно-перматованого зображення за допомогою генетичного алгоритму (ГА). Вхідними параметрами алгоритму є тільки розмір блоку і саме перматоване зображення. Ми повернемося до цього у наступних розділах.

Оскільки у даній імплементації ГА шукані перестановки кодуються індексами відсортованих випадкових векторів x , то близькі значення відстані Хеммінга (суми неспівпадаючих бітів) для x будуть давати близькі значення для цільової функції $s(x)$, що в свою чергу означає, що ГА оптимізує по-бітно і знаходить правильну перестановку за $\sim \log b^2!$ спроб.

Знайдемо тепер критичне значення для розміру блоку.

Нехай f – вихідне зображення, з якого за допомогою блочної перестановки пікселів (псевдовипадкової, але однакової для кожного блоку) отримується перматоване зображення g . Тобто вихідне зображення

f розбивається на квадратні блоки розміром $b \times b$, у кожному з яких піксели переставляються однаковим чином. Схематично це можна записати у вигляді:

$$g^{(n)} = f^{(n)}(p), \quad (4.16)$$

де n нумерує блок, p – задана блочна перестановка (вектор індексів довжиною b^2 елементів).

Необхідно знайти перестановку p і відновити вихідне зображення f , знаючи тільки пермuted зображення g і розмір блоку b .

Для вибору цільової функції скористаємось тим, що псевдовипадкові перестановки роблять сусідні піксели зображення некорельованими, отже середня різниця яскравості для пермuted зображення зростає. Тому підходящою буде будь-яка неспадаюча функція від модуля градієнта зображення $|\nabla g|$, наприклад:

$$s = \frac{1}{4} \langle |\nabla g|^2 \rangle, \quad (4.17)$$

де трикутні дужки $\langle \dots \rangle$ позначають операцію усереднення, а коефіцієнт $1/4$ введено з міркувань зручності.

Представимо функцію, що задається рівнянням (4.16) у явному вигляді:

$$s = \frac{1}{4wh} \sum_x \sum_y \left((g_{x+1,y} - g_{x,y})^2 + (g_{x,y+1} - g_{x,y})^2 \right) \quad (4.18)$$

де w , h – довжина і ширина зображення відповідно, а сумування проводиться по всіх координатах x та y .

Враховуючи, що

$$|\nabla g|^2 = |\nabla_x g|^2 + |\nabla_y g|^2, \quad (4.19)$$

а також, що з міркувань відсутності виділеного напрямку у перматованому зображенні очевидно, що

$$\langle |\nabla_x g|^2 \rangle = \langle |\nabla_y g|^2 \rangle, \quad (4.20)$$

то достатньо розглянути тільки

$$\langle |\nabla_x g|^2 \rangle = \frac{1}{wh} \sum_x \sum_y (g_{x+1,y} - g_{x,y})^2. \quad (4.21)$$

Розпишемо тепер (4.21):

$$\langle |\nabla_x g|^2 \rangle = \frac{1}{wh} \sum_x \sum_y (g_{x+1,y}^2 - 2g_{x+1,y}g_{x,y} + g_{x,y}^2), \quad (4.22)$$

усереднюючи вираз в дужках, врахуємо що для некорельованих пікселів середні квадратів співпадають:

$$\frac{1}{wh} \sum_x \sum_y g_{x+1,y}^2 = \frac{1}{wh} \sum_x \sum_y g_{x,y}^2 = \langle g^2 \rangle, \quad (4.23)$$

а середні добутків – це є просто добутки середніх:

$$\frac{1}{wh} \sum_x \sum_y g_{x+1,y}g_{x,y} = \langle g \rangle^2. \quad (4.24)$$

Таким чином,

$$\langle |\nabla_x g|^2 \rangle = \langle |\nabla_y g|^2 \rangle = 2\langle g^2 \rangle - 2\langle g \rangle^2 = 2D(g), \quad (4.25)$$

де $D(g)$ – дисперсія зображення g , що розраховується стандартним чином.

Отже, маємо

$$\frac{1}{4}\langle |\nabla g|^2 \rangle = \frac{1}{4}\langle |\nabla_x g|^2 \rangle + \frac{1}{4}\langle |\nabla_y g|^2 \rangle = D(g), \quad (4.26)$$

а оскільки дисперсія (як і середнє значення) не залежать від порядку відліків, то

$$D(g) = D(f) = D_0. \quad (4.27)$$

Таким чином, у початковий момент часу $t=0$ значення цільової функції дорівнює дисперсії зображення:

$$s(t=0) = D_0. \quad (4.28)$$

Виникає питання – наскільки зміниться значення цільової функції у процесі оптимізації? Зрозуміло, що у випадку збіжності алгоритму, у певний момент часу t_c будемо мати

$$s(t=t_c) = \frac{1}{4}\langle |\nabla f|^2 \rangle, \quad (4.29)$$

тому для відповіді на поставлене питання необхідно оцінити величини $D(g) = D(f)$ і значення $\langle |\nabla f|^2 \rangle$.

Для оцінки $\langle |\nabla f|^2 \rangle$ будемо вважати, що вихідне (неперматоване) зображення f є реалізацією двовимірного випадкового процесу [117] і, як буде показано нижче, функція розподілу цього процесу може бути довільною. У найпростішому випадку зображення f формується в результаті згортки зображення r , що складається з рівномірно розподілених на інтервалі $[0..1]$ випадкових пікселів, з лінійним усереднюючим фільтром u з квадратною апертурою розміра $a \times a$:

$$f = r * u \quad (4.30)$$

або

$$f_{x,y} = \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+i,y+j} \quad (4.31)$$

Розрахуємо спочатку $\langle |\nabla_x f|^2 \rangle$. Аналогічно до формули (4.31):

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \frac{1}{wh} \sum_x \sum_y (f_{x+1,y} - f_{x,y})^2. \quad (4.32)$$

З урахуванням (4.31) маємо, що

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \frac{1}{wh} \sum_x \sum_y \left(\frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+1+i,y+j} - \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+i,y+j} \right)^2, \quad (4.33)$$

або

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \frac{1}{wh} \sum_x \sum_y \left(\frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a (r_{x+1+i,y+j} - r_{x+i,y+j}) \right)^2. \quad (4.34)$$

Різниця у дужках легко розписується як

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a (r_{x+1+i, y+j} - r_{x+i, y+j}) = \sum_{j=1}^a (r_{x+a+1, y+j} - r_{x+1, y+j}). \quad (4.35)$$

Квадрат цієї суми в свою чергу можна представити як

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{j=1}^a (r_{x+a+1, y+j} - r_{x+1, y+j}) \right)^2 = \\ & = \sum_{j=1}^a (r_{x+a+1, y+j} - r_{x+1, y+j})^2 + \sum_{j \neq j'}^a (r_{x+a+1, y+j} - r_{x+1, y+j})(r_{x+a+1, y+j'} - r_{x+1, y+j'}) \end{aligned} \quad (4.36)$$

Усереднюючи, маємо:

$$\left\langle \sum_{j=1}^a (r_{x+a+1, y+j} - r_{x+1, y+j})^2 \right\rangle = 2a(\langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2) = 2aD(r), \quad (4.37)$$

$$\left\langle \sum_{j \neq j'}^a (r_{x+a+1, y+j} - r_{x+1, y+j})(r_{x+a+1, y+j'} - r_{x+1, y+j'}) \right\rangle = a(a-1)(\langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2 - \langle r^2 \rangle + \langle r \rangle^2) = 0. \quad (4.38)$$

Отже

$$\langle |\nabla_x f|^2 \rangle = \langle |\nabla_y f|^2 \rangle = \frac{1}{a^4} 2aD(r) = \frac{2D(r)}{a^3} \quad (4.39)$$

і, відповідно,

$$\frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle = \frac{1}{4} \langle |\nabla_x f|^2 \rangle + \frac{1}{4} \langle |\nabla_y f|^2 \rangle = \frac{1}{a^3} D(r). \quad (4.40)$$

Зауважимо, що при $a = 1$ вираз (4.40) переходить у вираз (4.26), як і повинно бути.

З іншого боку,

$$D(f) = \langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2. \quad (4.41)$$

Оскільки (за побудовою)

$$\langle u \rangle = 1, \quad (4.42)$$

то

$$\langle f \rangle = \langle r * u \rangle = \langle r \rangle. \quad (4.43)$$

Розрахуємо тепер

$$\langle f^2 \rangle = \frac{1}{wh} \sum_x \sum_y \left(\frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a r_{x+1+i, y+j} \right)^2, \quad (4.44)$$

що дає

$$\langle f^2 \rangle = \frac{1}{a^4} \left(a^2 \langle r^2 \rangle + 2 \binom{a^2}{2} \langle r \rangle^2 \right), \quad (4.45)$$

де використано біноміальний коефіцієнт

$$\binom{a^2}{2} = \frac{a^2!}{(a^2 - 2)!2!}. \quad (4.46)$$

Отже,

$$\langle f^2 \rangle = \frac{1}{a^4} \left(a^2 \langle r^2 \rangle + a^2 (a^2 - 1) \langle r \rangle^2 \right), \quad (4.47)$$

збираючи подібні члени, маємо

$$\langle f^2 \rangle = \frac{1}{a^4} \left(a^2 \langle r^2 \rangle + (a^4 - a^2) \langle r \rangle^2 \right) = \frac{1}{a^2} \left(\langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2 \right) + \langle r \rangle^2. \quad (4.48)$$

Отже

$$D(f) = \frac{1}{a^2} \left(\langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2 \right) = \frac{1}{a^2} D(r). \quad (4.49)$$

Таким чином, маємо, що цільова функція на нульовій ітерації приймає значення:

$$s(t=0) = D(f) = \frac{1}{a^2} D(r), \quad (4.50)$$

а на ітерації, коли алгоритм знайшов правильну перестановку:

$$s(t=t_c) = \frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle = \frac{1}{a^3} D(r), \quad (4.51)$$

їх відношення при цьому є

$$\frac{s(t=t_c)}{s(t=0)} = \frac{1}{a}. \quad (4.52)$$

Тобто, у даній моделі формування зображення, для будь-якого закону розподілу величини r , значення цільової функції у процесі оптимізації зменшується у a разів. Зауважимо, що параметр a у цьому випадку відіграє роль радіусу кореляції [118].

Введемо за аналогією поняття *пермутаційного радіусу* r_p , що визначається як

$$r_p = \frac{D(f)}{\frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle}, \quad (4.53)$$

і сформулюємо *необхідну умову відновлення*: будь-який алгоритм зможе відновити блочно-пермутоване зображення, тільки якщо розмір блоку пермутації b менше пермутаційного радіусу:

$$b < r_p. \quad (4.54)$$

Зворотнє твердження також справедливе – якщо умова (4.54) не виконується, тобто $b > r_p$, то завжди можна знайти такі перестановки, які переведуть дане зображення у будь-яке інше оптимальним у сенсі заданої цільової функції чином. Це твердження досить очевидно, якщо розглядаються глобальні перестановки, тобто в якості блоку перестановки береться зображення в цілому, оскільки такі операції як, наприклад, віддзеркалення, транспонування чи повороти на кути, кратні $\pi/2$, вочевидь не змінюють значення цільової функції (4.17).

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка середньої кількості спроб n_p , що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової

апріорної інформації $n_p = b^2!$, якщо розмір блоку перестановки більший за пермутаційний радіус $b > r_p = \frac{D(f)}{\frac{1}{4}\langle |\nabla f|^2 \rangle}$. Якщо ж ця умова не виконується, то $n_p \sim \log b^2! \sim b^2 \log b$.

4.6.7 Теоретичні оцінки універсальності маркерів

Як критерій оцінки такого показника якості, як універсальність, запропоновано (див. п. 2.4) використовувати кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера. Як було показано (див. пп. 4.1–4.5), жоден запропонований алгоритм не використовує додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера.

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка середньої кількості додаткових параметрів $n_u = 0$.

4.7 Оцінки реалізації методів по часу виконання та складності

4.7.1 Оцінки для методів побудови мозаїчних стохастичних маркерів

Усі алгоритми, що використовуються для реалізації методів побудови мозаїчних стохастичних AR-маркерів мають поліноміальну (не гірше ніж квадратичну) складність $\sim O(N^2)$, окрім алгоритму побудови перестановки, складність якого є $\sim O(N \log N)$, оскільки він суттєвим чином використовує сортування випадкових послідовностей [75].

4.7.2 Оцінки для методів виявлення мозаїчних стохастичних маркерів

Усі алгоритми, що використовуються для реалізації методів виявлення мозаїчних стохастичних AR-маркерів мають поліноміальну (не гірше ніж квадратичну) складність $\sim O(N^2)$ [78].

4.7.3 Оцінки для методу знаходження параметрів проєціювання без використання додаткової апріорної інформації

Реалізація методу, що використовується для знаходження параметрів проєціювання без використання додаткової апріорної інформації мають поліноміальну складність $\sim O(N^4)$, оскільки використовує прямий перебір по сусідах 4 точок [76].

4.7.4 Оцінки для методів декодування мозаїчних стохастичних маркерів

Усі алгоритми, що використовуються для реалізації методів декодування мозаїчних стохастичних AR-маркерів мають поліноміальну (не гірше ніж квадратичну) складність $\sim O(N^2)$, окрім алгоритму побудови перестановки, складність якого є $\sim O(N \log N)$, оскільки він суттєвим чином використовує сортування випадкових послідовностей [79].

4.7.5 Оцінки для методів проєціювання віртуальних об'єктів на площину мозаїчних стохастичних маркерів

Усі алгоритми, що використовуються для реалізації методів проєціювання віртуальних об'єктів на площину мозаїчних стохастичних AR-маркерів мають поліноміальну (не гірше ніж квадратичну) складність $\sim O(N^2)$, окрім алгоритмів калібрування, складність якого є $\sim O(N^3)$, оскільки він суттєвим чином використовує алгоритм SVD (Singular Value Decomposition) для знаходження псевдообертання матриці методом Мура-Пенроуза [82].

4.7.6 Оцінки для методів рендерингу відео-потoku в області мозаїчних стохастичних маркерів

Усі алгоритми, що використовуються для реалізації методів рендерингу відео-потoku в області мозаїчних стохастичних AR-маркерів мають поліноміальну (не гірше ніж квадратичну) складність $\sim O(N^2)$, окрім алгоритмів калібрування, складність якого є $\sim O(N^3)$, оскільки він суттєвим чином використовує алгоритм SVD для знаходження псевдообертання матриці методом Мура-Пенроуза [82].

4.7.7 Оцінки для методу пошуку інверсних псевдовипадкових блочних перестановок

Як було показано у п. 4.6.6, генетичні алгоритми, що використовуються для реалізації методу пошуку інверсних псевдовипадкових блочних перестановок при відсутності додаткової апріорної інформації мають складність $\sim O(N^2!)$, у випадку, коли розмір

блоку перестановки більший за пермутаційний радіус $b > r_p = \frac{D(f)}{\frac{1}{4} \langle |\nabla f|^2 \rangle}$;

якщо ж ця умова не виконується, то складність $\sim O(\log(N^2!)) \sim O(N^2 \log N)$ [103].

Висновки до розділу 4

1. Реалізовано методи побудови мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, при цьому запропоновано в якості зображення-повідомлення брати зображення QR-коду, що створюється стандартними генераторами QR-коду; для реалізації процедури перемішування даних, яка необхідна для забезпечення псевдогологографічного кодування, запропоновано використовувати псевдовипадкову перестановку; реалізації процедури створення біт-контейнера запропоновано розділювати клітинки рамкою з проміжним сірим кольором.

2. Реалізовано методи виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, при цьому запропоновано для знаходження області маркера розраховувати по зображенню локальне стандартне відхилення ковзаючим вікном; використовувати для бінаризації отриманого

зображення його сегментацію методом К-середніх на $K=3$ класи; отримане бінарне зображення очищати від шуму за допомогою морфологічних операцій. Для точного визначення маски AR-маркера запропоновано в отриманому бінарному зображенні вибирати найбільшу по площі 4-зв'язну область. Маски біт-контейнерів запропоновано знаходити, використовуючи сегментацію зображення по масці, і застосуванню до отриманого бінарного зображення операцій морфологічної і статистичної фільтрації.

3. Реалізовано метод знаходження параметрів проєціювання без врахування апріорної інформації, що суттєвим чином використовує властивість мозаїчності побудованого візуального AR-маркера – на його вхід подається об'єднання масок біт-контейнерів, яка складається окремих масок для кожної клітинки. Запропоновано знаходити чотири опорні точки, ітеративно максимізуючи цільову функцію (3.31), що введено у п. 3.3.3.

4. Реалізовано метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, при цьому запропоновано для знаходження кількості рядків і стовпців розраховувати для трансформованої маски біт-контейнера суми по стовпця/рядках відповідно, методами математичної морфології рахувати огинаючі цих сум, визначати пороги як середні між огинаючими, тоді визначати кількість рядків/стовпців як кількість перетинів відповідних порогів. Запропоновано заповнювати матрицю біт-контейнера, після знаходити зсув у повній матриці біт-контейнера, знаходячи мінімум цільової функція (3.52), що була введена у п. 3.4.3, яка рахується для інверсно-перматованої повної матриці біт-контейнера. До отриманого зображення запропоновано застосовувати фільтрування по кожній клітинці шляхом заміни результуючого кольору клітинки його модою – значенням, що найчастіше зустрічається.

5. Реалізовано метод використання мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, при цьому запропоновано калібрування камери

проводити по самому зображенню AR-маркера, використовувати знайдені параметри внутрішнього калібрування для знаходження параметрів корекції радіальних спотворень, застосовувати до зображення корекцію радіальних спотворень, використовувати параметри зовнішнього калібрування для знаходження розташування камери і проводити перетворення координат віртуальних 3d-об'єктів для їх коректного проєціювання на площину AR-маркера. Також запропоновано спрощений метод, який не потребує зовнішнього калібрування і використано його для спрощеного методу проєціювання віртуальних 3d-об'єктів на площину AR-маркера, а також рендерингу відео-потoku в область AR-маркера, при цьому url-адреса відео береться з повідомлення, що закодовано в AR-маркері.

4. Сформульовано теоретичні оцінки якості стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, а саме:

– теоретична оцінка середнього часу у секундах виявлення тестового AR-маркера $\tau_D \leq 0,03$ сек;

– теоретична оцінка кількості градацій сірого, що необхідні для побудови маркера, $n_c = 3$;

– теоретична оцінка середньої ентропії повідомлення у бітах/піксель, що закодовано у маркері $e_m = \frac{1}{k^2}$ біт/піксель, при значення коефіцієнта дублювання $k^2 = 9$, отримуємо, що $e_m = 1/9$;

– теоретична оцінка можливості визначення положення камери по наявному зображенню маркера – так;

– теоретична оцінка кількості помилково декодованих бітів повідомлення $n_e < 1$ при імовірності втрати бітів повідомлення $q \leq 1/2$ (значення коефіцієнта дублювання $k^2 = 9$);

– теоретична оцінка середньої кількості спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової

апріорної інформації є $n_p = b^2!$, якщо розмір блоку перестановки більший

за пермутаційний радіус $b > r_p = \frac{D(f)}{\frac{1}{4}\langle |\nabla f|^2 \rangle}$; якщо ж ця умова не виконується,

то $n_p \sim \log b^2! \sim b^2 \log b$;

– теоретична оцінка середньої кількості додаткових параметрів $n_u = 0$.

6. Отримано оцінки реалізації розроблюваних методів по часу виконання та складності, зазначено, що всі алгоритми, що використовуються для побудови, виявлення і використання мозаїчних стохастичних AR-маркерів мають поліноміальну (не гірше ніж квадратичну) складність $\sim O(N^2)$, окрім алгоритму побудови перестановки, складність якого є $\sim O(N \log N)$, алгоритмів калібрування, складність яких є $\sim O(N^3)$, оскільки вони суттєвим чином використовуює алгоритм SVD для знаходження псевдообертання матриці методом Мура-Пенроуза; алгоритму, що використовуються для знаходження параметрів проєціювання без використання додаткової апріорної інформації, який має поліноміальну складність $\sim O(N^4)$, оскільки використовує прямий перебір по сусідах 4 точок. Зауважено, що генетичні алгоритми, які використовуються для пошуку інверсних псевдовипадкових блочних перестановок при відсутності додаткової апріорної інформації, мають складність $\sim O(N^2!)$, у випадку, коли розмір блоку перестановки більший

за пермутаційний радіус $b > r_p = \frac{D(f)}{\frac{1}{4}\langle |\nabla f|^2 \rangle}$; якщо ж ця умова не виконується,

то складність $\sim O(\log(N^2!)) \sim O(N^2 \log N)$.

Список використаних джерел у розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [18], [75]–[79], [82], [85]–[86], [90]–[91], [93]–[94], [101], [117], [118], [222], [233]–[237].

5 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ І ВИКОРИСТАННЯ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

У даному розділі удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності. Наведено основні результати експериментальних досліджень мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, оцінки впливу шуму на точність декодування, проведено порівняння теоретично розрахованих та експериментальних розподілів імовірності правильного декодування, експериментально доведено можливості знаходження блочних інверсних перестановок, при розмірі блоку, що менший за пермутаційний радіус; наведено порівняльні оцінки показників якості для різних типів маркерів.

Матеріали розділу викладені в роботах [74]–[79], [82]–[86], [90]–[91], [101].

5.1 Структура інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності

Інформаційна технологія побудови та використання стійких візуальних мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності побудована на основі інформаційної технології побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка була

описана у розділі 2, шляхом конкретної імплементації моделі і методів стійких візуальних мозаїчних стохастичних AR-маркерів.

5.1.1 Основний процес побудови мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

В IDEF0-нотації основний процес побудови мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності на вході має текстове повідомлення (зазвичай представляє собою url-посилання на інформаційний ресурс); управління представляє собою вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності; механізмами є сам користувач, генератор QR-кодів (або інший кодер, що перетворює повідомлення у зображення), система програмування MATLAB, що використовується для прототипування функцій і процедур методу, а також спеціалізовані модулі MATLAB, такі як Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox; на виході маємо зображення мозаїчного стохастичного AR-маркера [74]–[76].

Основний процес побудови мозаїчного стохастичного AR-маркера наведено на рис. 5.1, декомпозиція основного процесу – на рис. 5.2.

Декомпозиція основного процесу проводиться на 4 підпроцеси:

1) *закодувати повідомлення у QR-код*:

- вхід – повідомлення;
- вихід – зображення-повідомлення (QR-код у даному випадку);
- управління – вимоги інформативності та робастності;
- механізми – користувач і генератор QR-кодів;

2) *збільшити зображення*:

- вхід – зображення-повідомлення;

- вихід – збільшене зображення;
- управління – вимога робастності;
- механізми – система програмування MATLAB, спеціалізований модуль Image Processing Toolbox;



Рисунок 5.1 – Основний процес методу формування маркера

3) *стохастично перевпорядкувати елементи зображення:*

- вхід – збільшене зображення;
- вихід – перевпорядковане зображення;
- управління – вимоги робастності та криптостійкості;
- механізми – система програмування MATLAB, спеціалізований модуль Statistics and Machine Learning Toolbox;

4) *додати мозаїчний біт-контейнер:*

- вхід – перевпорядковане зображення;
- вихід – зображення мозаїчного стохастичного AR-маркера;

– управління – вимоги помітності, простоти, орієнтованості, робастності та універсальності;

– механізми – система програмування MATLAB, спеціалізовані модулі Image Processing Toolbox та Computer Vision Toolbox.

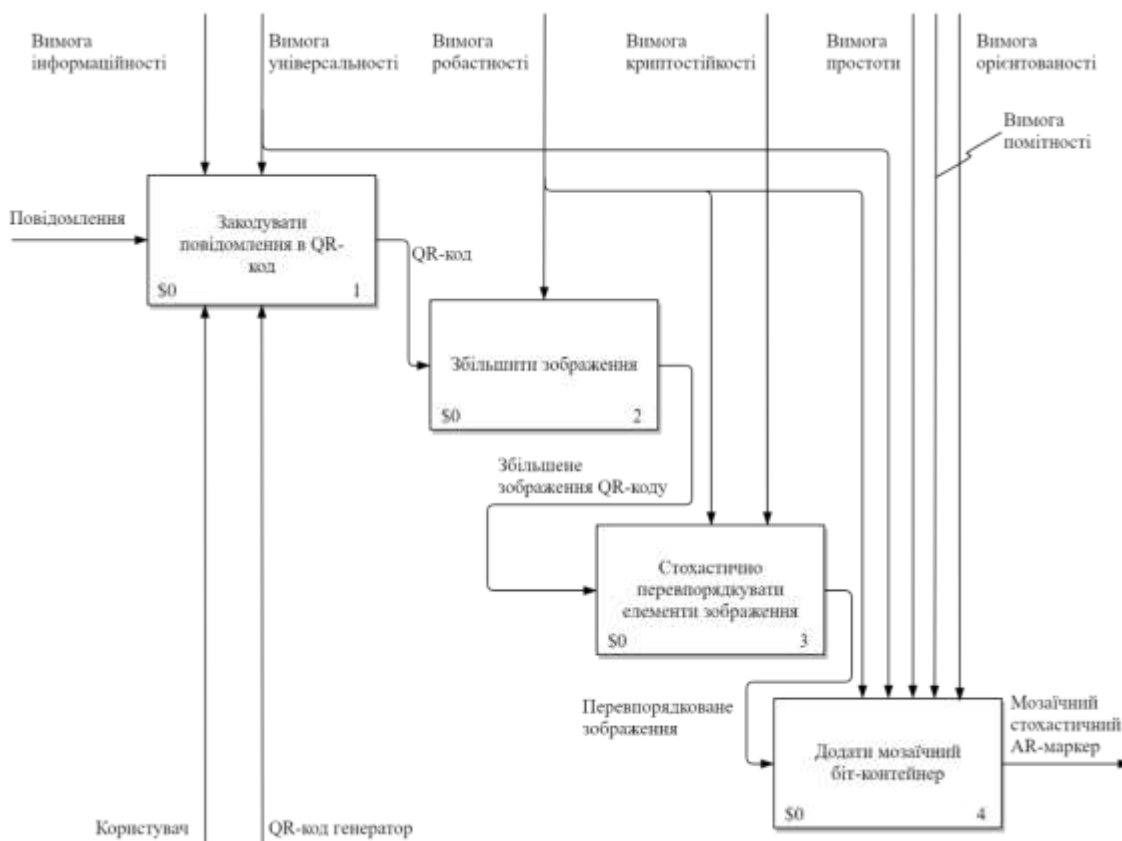


Рисунок 5.2 – Декомпозиція основного процесу методу формування маркера

5.1.2 Основний процес застосування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

Розглянемо в IDEF0-нотації основний процес застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності (рис. 5.3) [74]–[77].



Рисунок 5.3 – Основний процес використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

Вхід процесу – сцена доповненої реальності, що представляє собою область реального світу, де знаходиться користувач. Сцена містить в області прямої видимості мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності.

Управління представляє собою набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності); специфікації смартфона; математичні і чисельні методи (методи дискретної математики, методи оптимізації, описативна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи

сегментації).

Механізмами є сам користувач, смартфон, система програмування MATLAB, що використовується для прототипування процесів, а також спеціалізовані модулі MATLAB, такі як Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Optimization Toolbox.

На *виході* маємо декодоване повідомлення, віртуальний 3d об'єкт, що проеціюється на площину AR-маркера, процес рендерингу відео-потoku в області AR-маркера.

Декомпозиція *основного процесу* проводиться на 2 підпроцеси 1 рівня (рис. 5.4):

1) *сфотографувати AR-маркер*:

- вхід – AR-сцена;
- вихід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
- управління – набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності); специфікації смартфона;
- механізми – користувач, смартфон;

2) *використати AR-маркер*:

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
- вихід – декодоване повідомлення, віртуальний 3d об'єкт, що проеціюється на площину AR-маркера, процес рендерингу відео-потoku в області AR-маркера;
- управління – набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності); специфікації смартфона; математичні і чисельні методи (методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації);

– механізми – система програмування MATLAB, що використовується для прототипування, спеціалізовані модулі MATLAB (Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Optimization Toolbox).

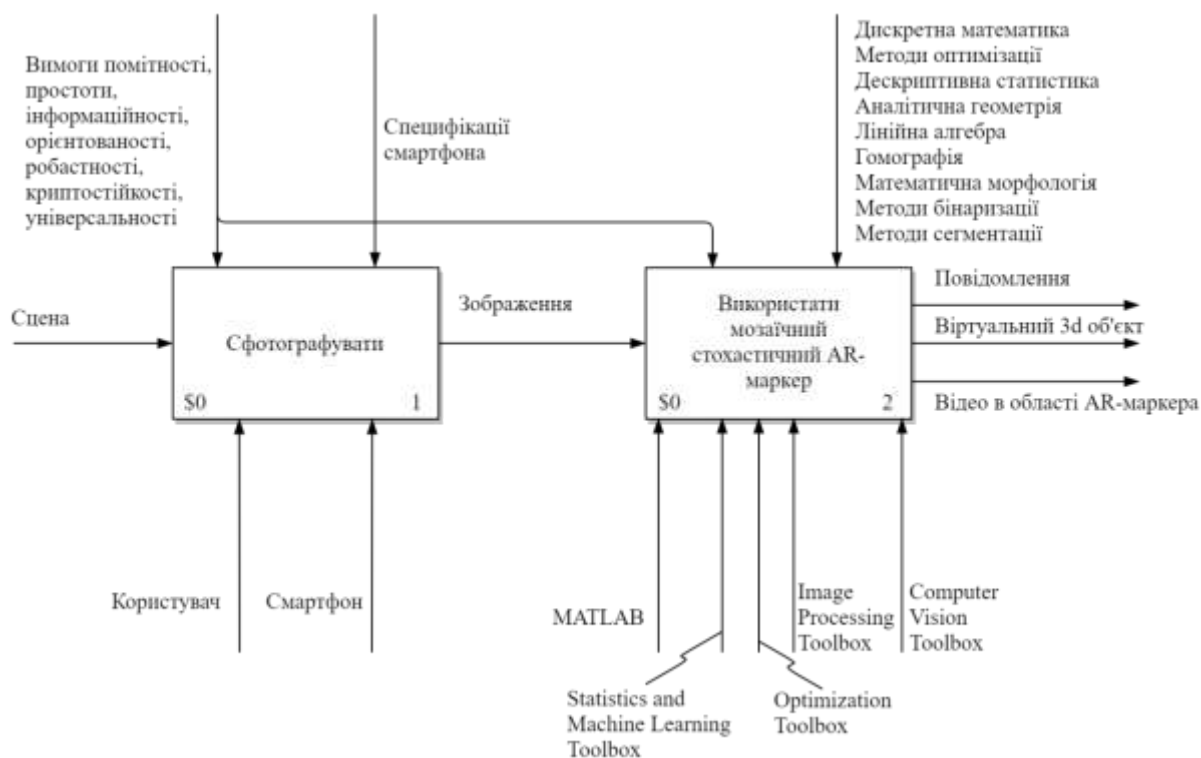


Рисунок 5.4 – Декомпозиція основного процесу застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

5.1.3 Декомпозиція підпроцесів застосування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності

Декомпозиція *підпроцесу використання* мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності проводиться на 3 підпроцеси 2 рівня (рис. 5.5):

1) *декодувати повідомлення:*

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
- вихід – повідомлення;
- управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, робастності, універсальності; методи бінаризації, методи сегментації, методи оптимізації, дискретна математика, математична морфологія;
- механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

2) *побудувати віртуальний 3d об'єкт:*

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
- вихід – зображення віртуального 3d об'єкта;
- управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації;
- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

3) *вивести відео-потік в області AR-маркера:*

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
- вихід – процес рендерингу вж2ідео-потіку в області AR-маркера;
- управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності; методи дискретної математики, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації;
- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox.

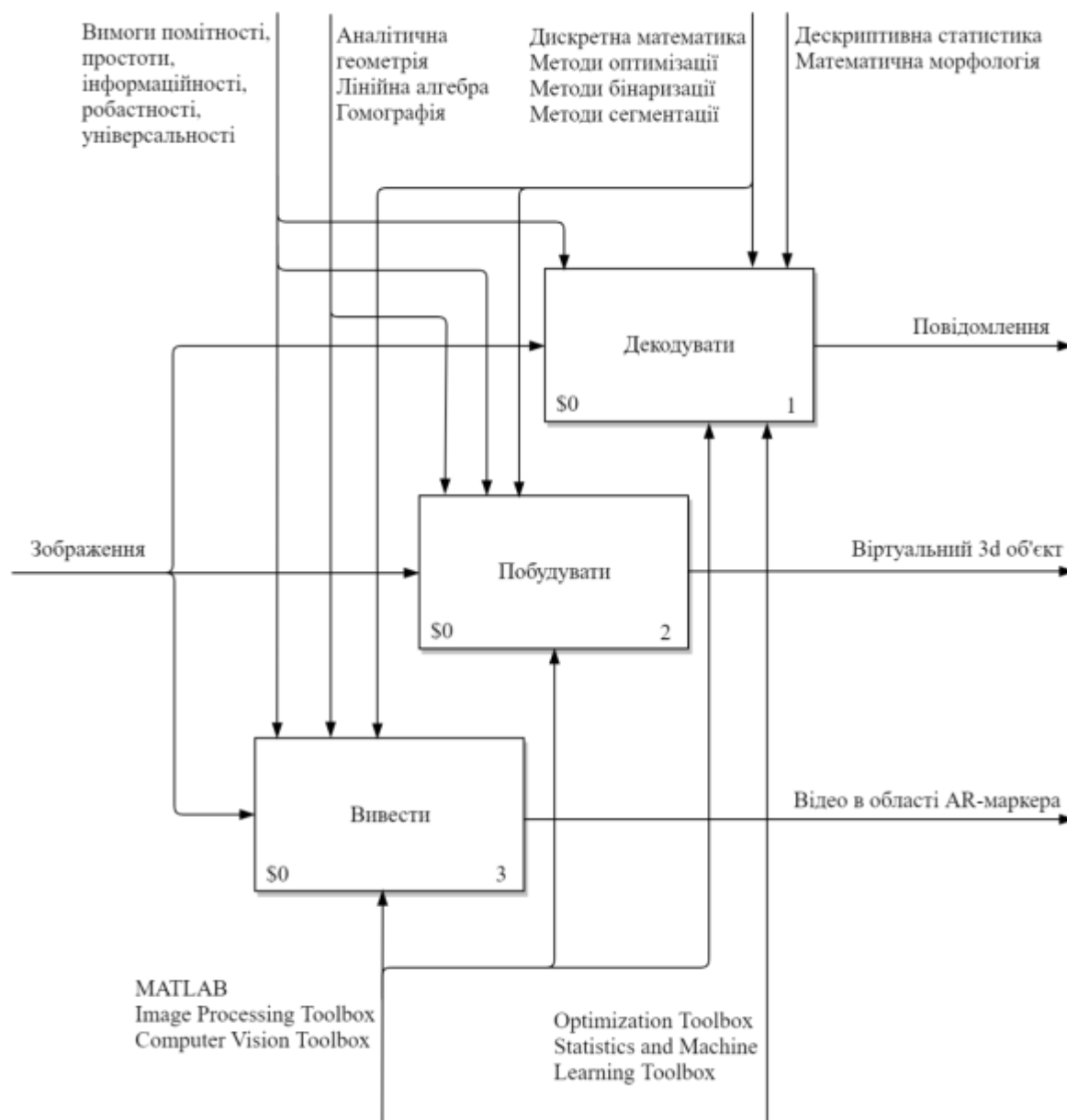


Рисунок 5.5 – Декомпозиція підпроцесу використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

Декомпозиція *підпроцесу декодування* мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності проводиться на 3 підпроцеси 3 рівня (рис. 5.6):

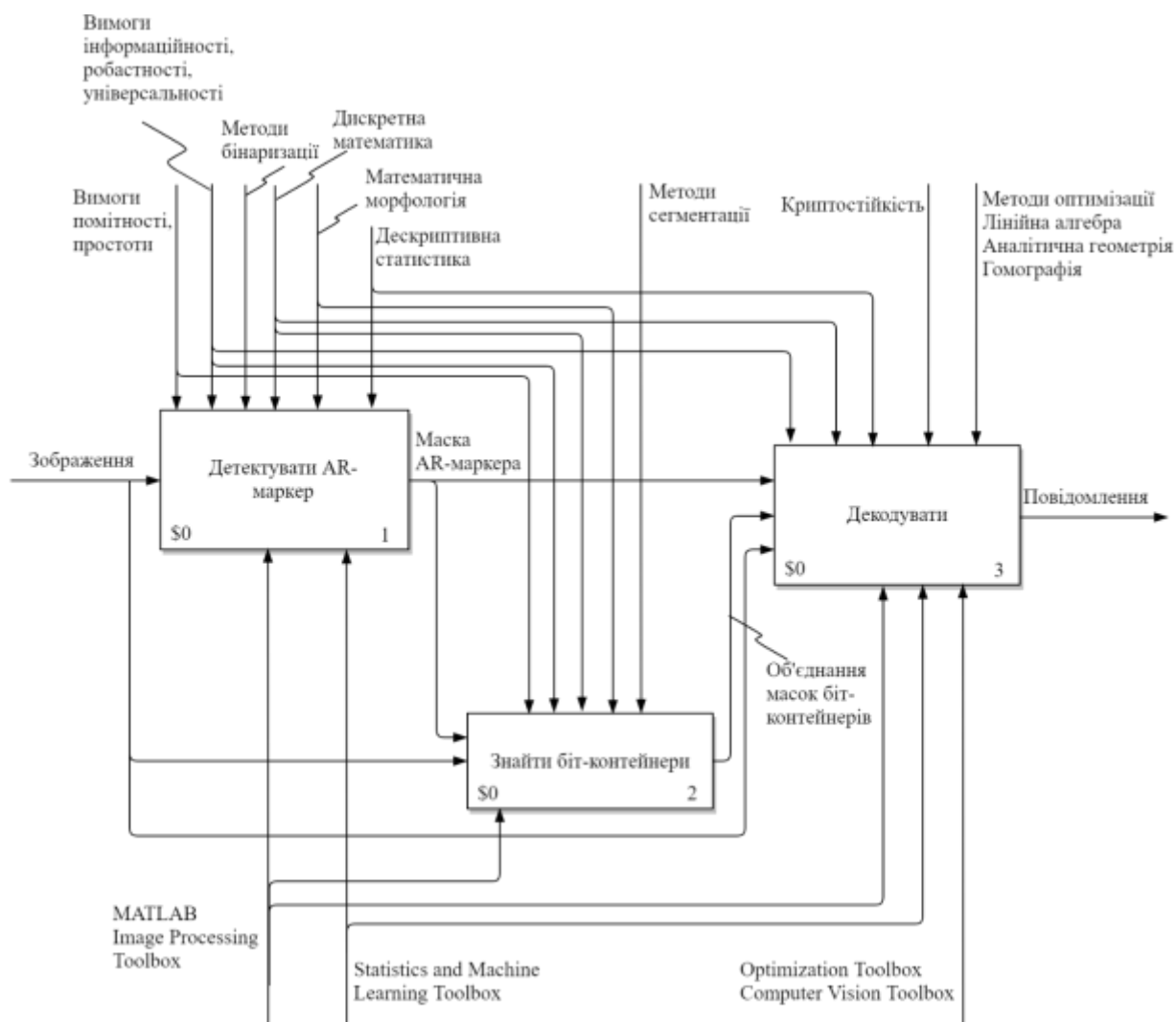


Рисунок 5.6 – Декомпозиція підпроцесу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

1) *детектувати AR-маркер:*

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
- вихід – маска AR-маркера;
- управління – вимоги помітності, простоти, робастності, універсальності; методи дискретної математики, дескриптивна статистика, математична морфологія, методи бінаризації;
- механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

2) *знайти біт-контейнери:*

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

- вихід – об'єднання масок біт-контейнерів;
- управління – вимоги помітності, простоти, робастності, універсальності; методи дискретної математики, математична морфологія, методи сегментації;

- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

3) декодувати повідомлення:

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера, маски біт-контейнерів, об'єднання масок біт-контейнерів;

- вихід – повідомлення;

- управління – вимоги інформативності, робастності, криптостійкості та універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія;

- механізми – MATLAB; Optimization Toolbox, Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox.

Декомпозиція *підпроцесу детектування* мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності проводиться на 3 підпроцеси 4 рівня (рис. 5.7):

1) застосувати *std-фільтр*:

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

- вихід – відфільтроване зображення;

- управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, дескриптивна статистика, математична морфологія;

- механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

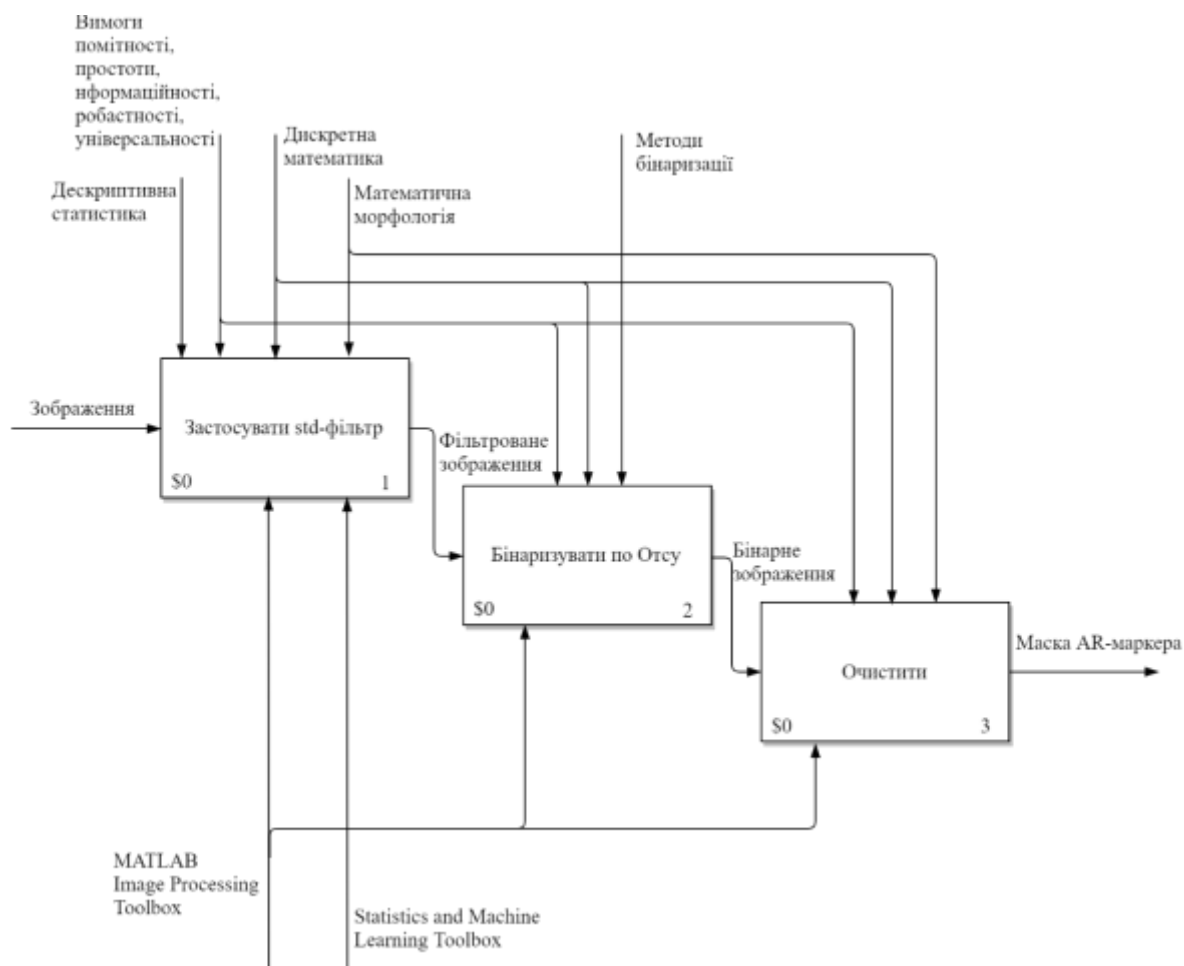


Рисунок 5.7 – Декомпозиція підпроцесу детектування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

2) *бінаризувати по Отсу:*

- вхід – відфільтроване зображення;
- вихід – бінарне зображення;
- управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, методи бінаризації;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

3) *очистити зображення від шуму:*

- вхід – бінарне зображення;
- вихід – маска AR-маркера;
- управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, методи математичної морфології;
- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox.

Декомпозиція *підпроцесу знаходження біт-контейнерів* мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності проводиться на 2 підпроцеси 4 рівня (рис. 5.8) [82]–[86] :

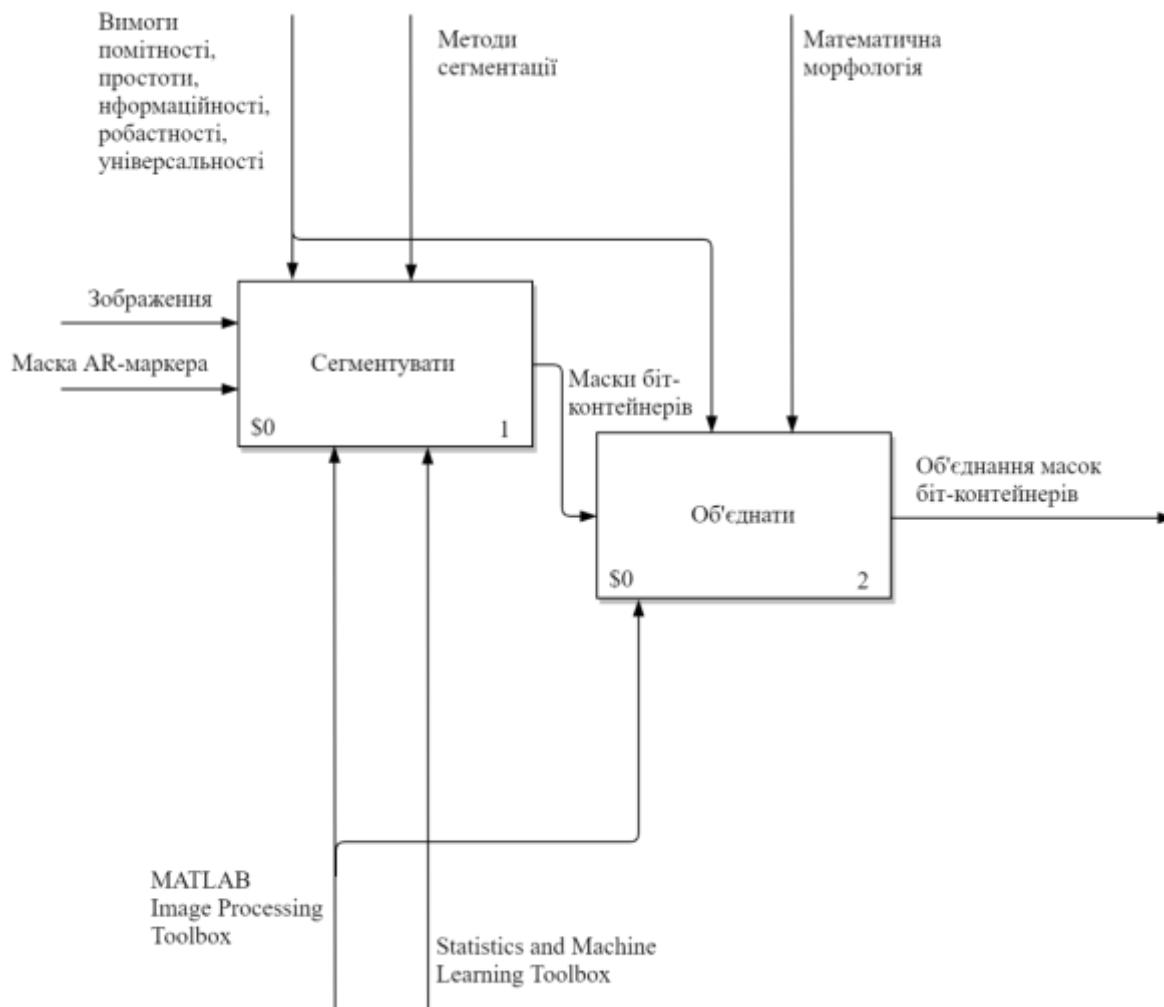


Рисунок 5.8 – Декомпозиція *підпроцесу знаходження біт-контейнерів* мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

1) *сегментувати зображення*:

- вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера, маска AR-маркера;
- вихід – маски біт-контейнерів;
- управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи методи сегментації;
- механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox,

Image Processing Toolbox;

2) *об'єднати маски:*

- вхід – маски біт-контейнерів;
- вихід – об'єднання масок біт-контейнерів;
- управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи математики, методи математичної морфології;
- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox.

Декомпозиція *підпроцесу декодування повідомлення* мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності проводиться на 9 підпроцесів 4 рівня (рис. 5.9):

1) *знайти параметри проєктивного перетворення:*

- вхід – об'єднання масок біт-контейнерів;
- вихід – матриця гомографії;
- управління – вимоги робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія;
- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

2) *застосувати проєктивне перетворення:*

- вхід – зображення AR-маркера, маски біт-контейнерів, об'єднання масок біт-контейнерів, матриця гомографії;
- вихід – перетворене зображення AR-маркера; перетворені маски біт-контейнерів, перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;
- управління – вимоги робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія;
- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

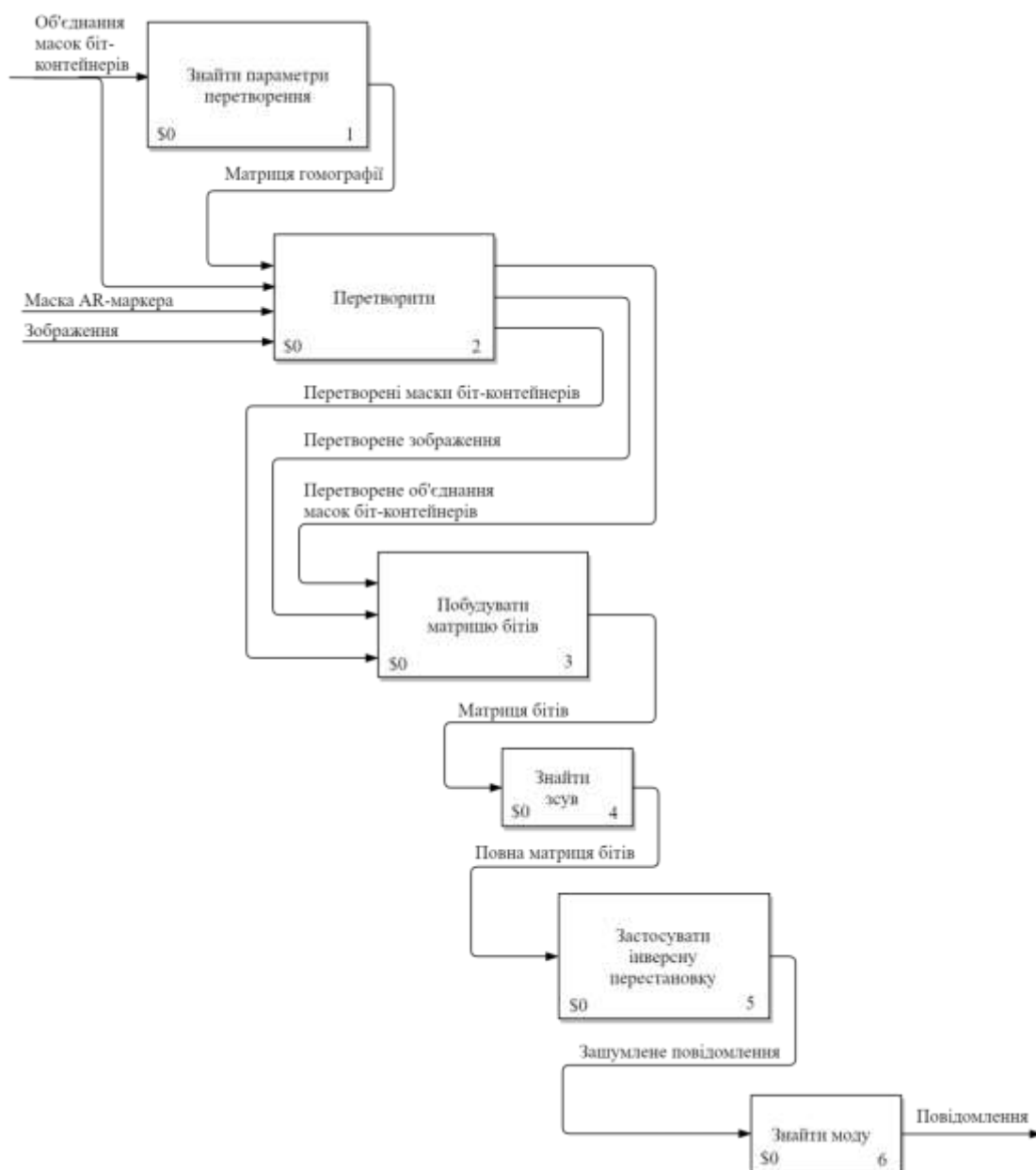


Рисунок 5.9 – Декомпозиція підпроцесу декодування повідомлення мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

3) *порахувати середні:*

– вхід – перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;

– вихід – середні по рядках/стовпцях;

– управління – вимога універсальності; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

4) *порахувати порогови:*

- вхід – перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;
- вихід – пороги;
- управління – вимога універсальності; методи дискретної математики, методи математичної морфології;

- механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

5) *порахувати кількість перетинів:*

- вхід – середні по рядках/стовпцях, пороги;
- вихід – кількість стовпців/рядків;
- управління – вимога універсальності, робастності; методи дискретної математики;

- механізми – MATLAB;

6) *побудувати матрицю бітів:*

- вхід – перетворене зображення, перетворені маски біт-контейнерів, кількість стовпців/рядків;

- вихід – матриця бітів;

- управління – вимога універсальності, робастності; методи дискретної математики;

- механізми – MATLAB;

7) *знайти зсув:*

- вхід – матриця бітів;

- вихід – повна матриця бітів;

- управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики, методи оптимізації;

- механізми – MATLAB; Optimization Toolbox;

8) *застосувати інверсну перестановку:*

- вхід – повна матриця бітів;

- вихід – зашумлене повідомлення;

- управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

9) *знайти моду*:

– вхід – зашумлене повідомлення;

– вихід – повідомлення;

– управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики, декриптивна статистика;

– механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox.

Таким чином, удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

5.2 Опис експериментів, що проводилися в роботі

5.2.1 Основні припущення та обмеження

При виконанні дисертаційної роботи використовувались такі припущення і обмеження [78]–[79]:

1) розглядаються тільки оптико-електронні зображення;

2) фізичний розмір маркера:

– мінімальний фізичний розмір AR-маркера 21×21 мм (AR-маркер розміром 63×63 клітинки, розмір клітинки 8×8 , віддруковано на принтері з роздільною здатністю 600 dpi);

3) умови зйомки і розташування маркера:

– при зйомці AR-маркер займає приблизно $1/9$ загальної площі

зображення і знаходиться у його центрі;

- мінімальна роздільна здатність камери 8МП (при цьому 1 пікселю надрукованого зображення буде відповідати $\sqrt{1/9 \cdot 8 \cdot 10^6} / (63 \cdot 8) \sim 2$ пікселя сфотографованого зображення, що гарантує розділюваність клітинок);

- кут повороту AR-маркера відносно камери не більше $\pm 45^\circ$ (інакше буде порушено орієнтованість маркера – результатом роботи алгоритмів декодування буде транспонована бітова матриця, що не дасть можливості правильно застосувати інверсну перестановку; в принципі цю проблему можна вирішити послідовним перебором всіх орієнтацій матриці $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ з вибором правильної за критерієм мінімуму цільової функції від інверсно-перматованого зображення, але в рамках цієї роботи було прийнято, що маркер є правильно орієнтованим);

- зйомка проводиться у звичайних умовах освітлення (як денного, так і штучного);

- зображення знаходиться у фокусі і рух камери незначний, що дозволяє не враховувати змаз;

- кут між площинами маркера і камери не більше $\pm 30^\circ$;

4) характер завад:

- завадами закрито не більше $1/2$ площі маркера;

- завада повинна бути такою, щоб маска маркера була однозв'язною (якщо маска маркера розпадається на декілька незв'язних областей, то запропоновані алгоритми визначення кількості рядків/стовпців будуть повертати некоректне значення).

5.2.2 Створення мозаїчних стохастичних маркерів

Для експериментів було використано декілька AR-маркерів. Для

опису алгоритмів з ілюстративною метою для зображення-повідомлення використано QR-код, в якому закодовано текстовий рядок ‘Hello, world!’ довжиною 13 символів (рис. 5.10а). Для демонстрації технології використання AR-маркерів для зображення-повідомлення взято QR-код, де закодовано ідентифікатор відео на YouTube ‘FpyrF_Ci2TQ’ довжиною 11 символів, з якого однозначно отримується повне посилання на дане відео [236] (рис. 5.10б) [75], [77].

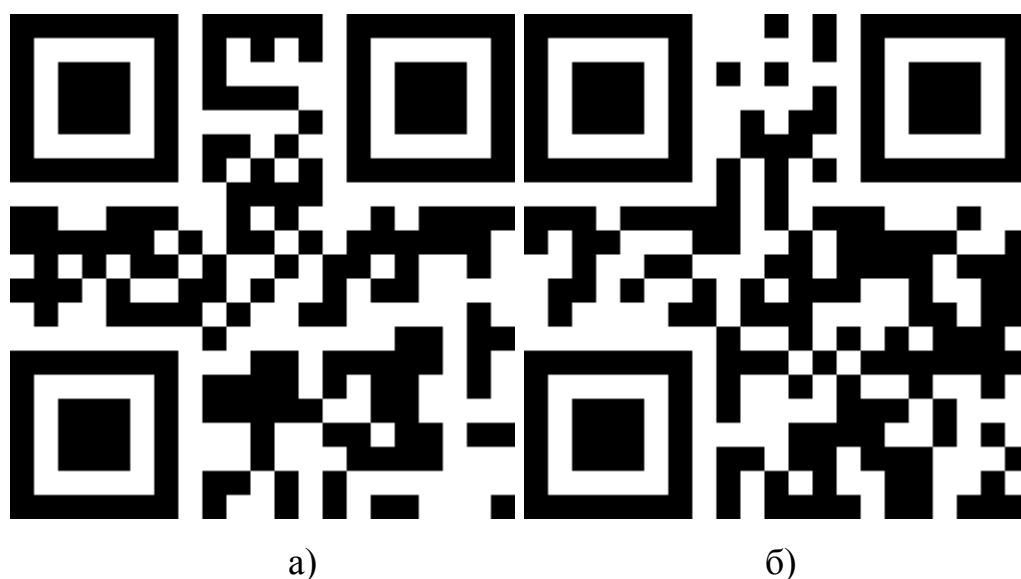


Рисунок 5.10 – Зображення-повідомлення (QR-код): а) ‘Hello, world!’, б) ‘FpyrF_Ci2TQ’

Розмір матриці кожного згенерованого QR-кода є 21×21 елементів, масштабний фактор $k=3$, таким чином розмір зображення є 63×63 піксела. QR-коди генерувались за допомогою online-сервісу “QR Code Generator from the ZXing Project” [238], параметри наведено у табл. 5.1.

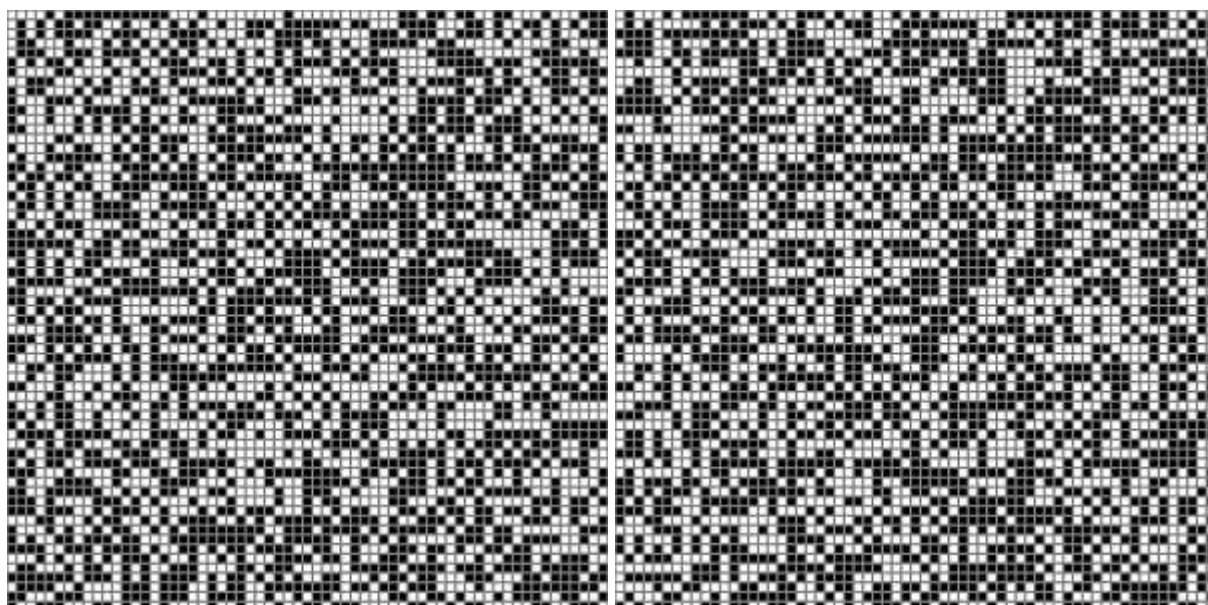
З використанням алгоритмів, описаних у пп. 4.1, було створено зображення-контейнери, які містить дані зображення-повідомлення (рис. 5.11). Параметри зображення-контейнера:

- розмір клітинки біт-контейнера: 8 пікселів;
- товщина сітки: 1 піксель;

– використані кольори: чорний (0), білий (1) для кодування бітів, сірий (0.5) для сітки.

Таблиця 5.1 – Параметри генерації QR-кодів

Параметр	Значення	
Contents	Text	
Text content	‘Hello, world!’	‘FpyrF_Ci2TQ’
Barcode size	Large	
Error correction	L	
Character encoding	UTF-8	



а)

б)

Рисунок 5.11 – Зображення AR-маркера: а) ‘Hello, world!’; б) ‘FpyrF_Ci2TQ’

Згенеровані зображення було збережено у TIFF форматі з роздільною здатністю 600 dpi і роздруковано на чорно-білому лазерному принтері (HP LaserJet Pro MFP M225dn, роздільна здатність 600 dpi).

5.2.3 Опис умов експериментів

Опис умов експериментів, що проводилися, наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Детальний опис умов експериментів

Повідомлення	Фон, освітлення	Ракурс зйомки	Розмір маркера	Завади	Рис.
‘Hello, world!’	однорідний фон, природнє освітлення	незначні проєктивні спотворення, здалеку, без повороту	повне зображення	без завад	5.12а
‘Hello, world!’	однорідний фон, природнє освітлення	незначні проєктивні спотворення, зблизька, без повороту	повне зображення	без завад	5.12б
‘Hello, world!’	однорідний фон, природнє освітлення	проєктивні спотворення, зблизька, без повороту	повне зображення	завада у центрі (приблизно 1/4 площі зображення)	5.12в
‘Hello, world!’	однорідний фон, природнє освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, без повороту	повне зображення	завада у центрі (приблизно 1/4 площі зображення)	5.12г
‘Hello, world!’	однорідний фон, природнє освітлення	незначні проєктивні спотворення, зблизька, без повороту	ліва частина зображення (приблизно 1/2 площі)	без завад	5.12д
‘Hello, world!’	однорідний фон, природнє освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, без повороту	права частина зображення (приблизно 1/2 площі)	без завад	5.12е
‘Hello, world!’	складний фон, штучне освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, без повороту	центральна частина зображення (приблизно 2/3 площі)	без завад	5.12ж

‘Hello, world!’	складний фон, штучне освітлення	проективні спотворення, зблизька, без повороту	центральна частина зображення (приблизно 2/3 площі)	без завад	5.12з
‘FpyrF_C i2TQ’	складний фон, штучне освітлення	проективні спотворення, здалеку, повороту приблизно 45°	повне зображення	без завад	5.12i
‘FpyrF_C i2TQ’	складний фон, штучне освітлення	проективні спотворення, зблизька, кут повороту приблизно 45°	повне зображення	без завад	5.12й
‘FpyrF_C i2TQ’	складний фон, штучне освітлення	проективні спотворення, здалеку, кут повороту приблизно 30°	повне зображення	без завад	5.12к
‘FpyrF_C i2TQ’	складний фон, штучне освітлення	проективні спотворення, здалеку, кут повороту приблизно 30°	повне зображення	завада знизу (більше 1/2 площі зображенн я)	5.12л

5.2.4 Вхідні зображення, що використовувалися в проведенні експериментів

Отримані роздруки сфотографовані смартфоном Nokia 6.1 Plus, роздільна здатність камери 12 МР, збережено у JPEG форматі, вихідні кольорові зображення наведено на рис. 5.12а–з (повідомлення ‘Hello, world!’); рис. 5.12i–л (повідомлення ‘FpyrF_Ci2TQ’).



а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)



з)

Рисунок 5.12 – Вихідні зображення, аркуш 1

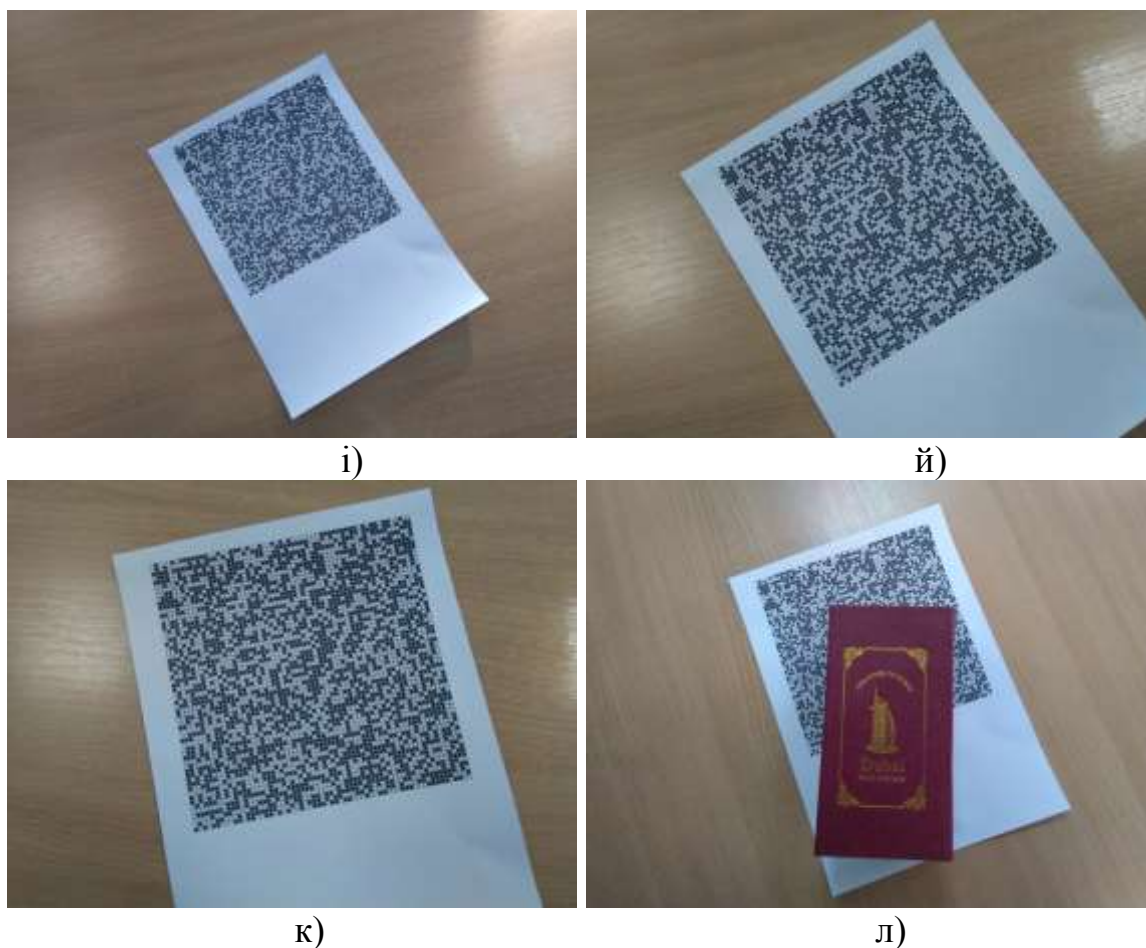


Рисунок 5.12, аркуш 2

5.3 Результати експериментів

5.3.1 Результати декодування повідомлення

Результати декодування візуалізовано на рис. 5.13 (з метою економії місця показані тільки ті зображення, що не повторюються) [79], [90]–[91], [101].

Всі 8 зображень AR-маркера (див. рис. 5.12а–5.12з), які було створені з використанням QR-коду, в якому закодовано повідомлення ‘Hello, world!’, декодовано абсолютно правильно, рівень помилок – 0.

Всі 4 зображення AR-маркера (рис. 5.12і–5.12л), які було створені з використанням QR-коду з повідомленням ‘FpyrF_Ci2TQ’, в основному

декодовано правильно: 2 зображення (рис. 5.12і–5.12й) мають рівень помилок – 0; 1 зображення (рис. 5.12к) – 1 помилка; 1 зображення (рис. 5.12л) – 6 помилок.

Зауважимо, що в останньому випадку площа завади більша за 50% зображення маркера, тим не менш QR-код декодується правильно, оскільки має власну надлишковість (використовуються коди Ріда-Соломона), додатковим фактором є те, що 3 помилки попали в область синхронізаційних маркерів, що не впливає на якість декодування.

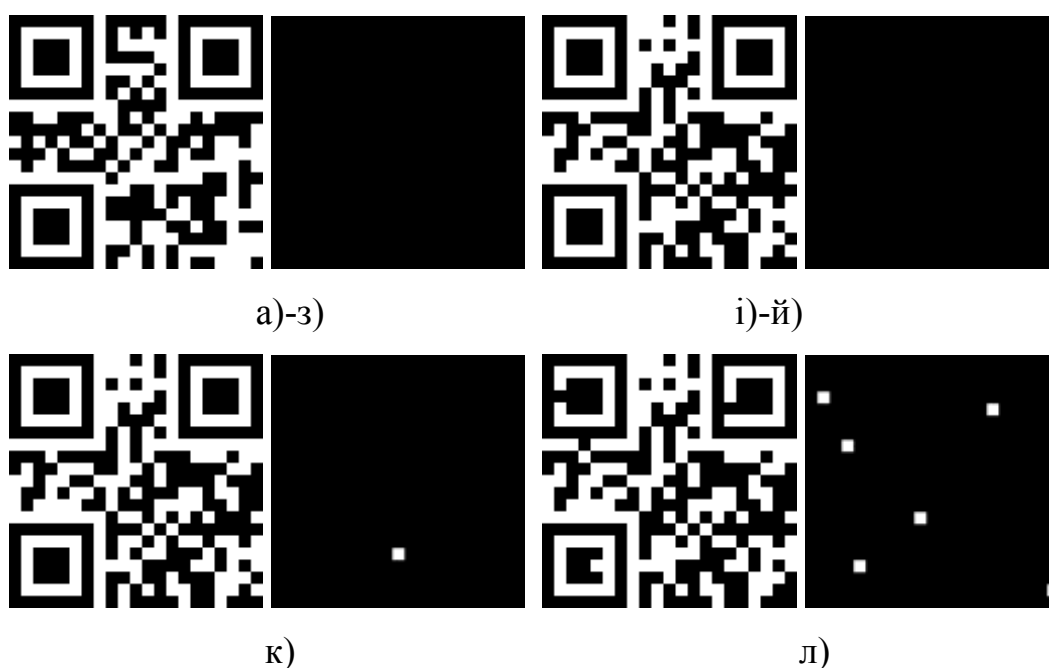


Рисунок 5.13 – Декодоване з AR-маркера зображення повідомлення (зліва)

і помилки декодування (справа): а–з) ‘Hello, world!’ помилок – 0; і–й)

‘FpyrF_Ci2TQ’, помилок – 0; к) ‘FpyrF_Ci2TQ’, помилок – 1

В результаті всі 12 QR-кодів декодовано абсолютно правильно.

5.3.2 Результати проєціювання віртуального 3d-об'єкта на площину маркера

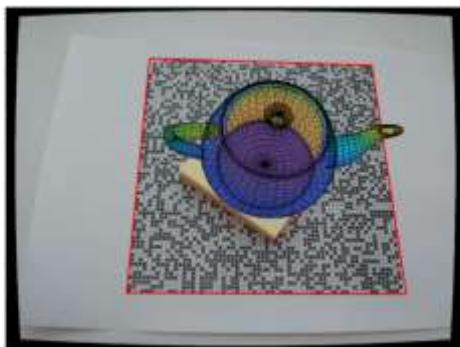
Результати проєціювання тестового 3d-об'єкта («чайник») на площину AR-маркера при використанні запропонованих у роботі точних методів калібрування і проєціювання показані на рис. 5.14а–з («Hello, world!») та рис. 5.14і–л («FryuF_Ci2TQ»). Для кожного зображення проведено автокалібрування камери по самому зображенню маркера і корекцію радіальних спотворень; червоною лінією візуалізовано границю області маркера (яку він би займав, якби не було завад); показано тестовий 3d-об'єкт.



а)



б)



в)

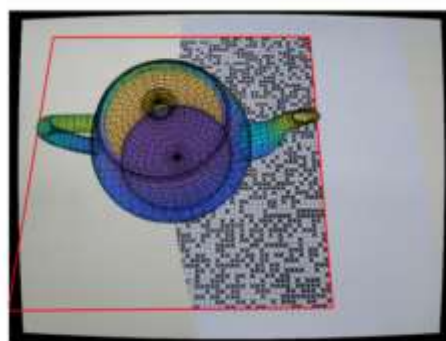


г)

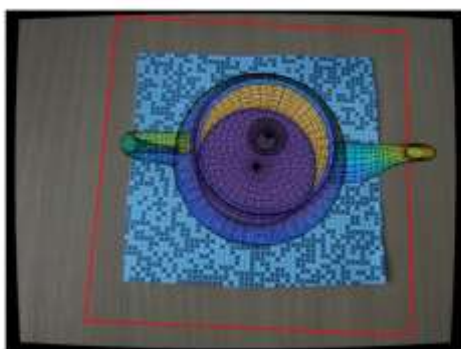
Рисунок 5.14 – Результати точного проєціювання тестового 3d-об'єкта,
аркуш 1



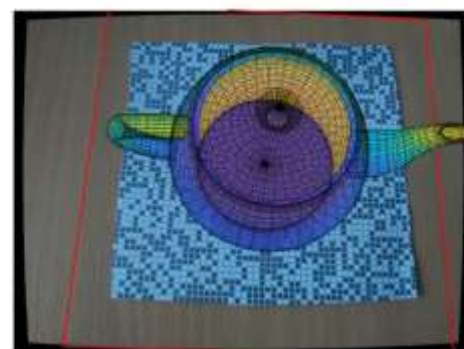
д)



е)



ж)



з)



и)



й)



к)



л)

Координати 3d-об'єкта перетворені таким чином, щоб зображення відповідало зображенню реального об'єкта з центру камери, масштаб об'єкта вибрано так, що максимальна відстань (від ручки до носика чайника) співпадає з фізичним розміром AR-маркера, орієнтація – носик чайника повернуто вправо (на 3 години). Як видно (рис. 5.14), всі 12 AR-маркерів незалежно від рівня завад і умов зйомки дозволяють правильно спроеціювати тестовий 3d-об'єкт («чайник») на площину AR-маркера. Результати проєціювання тестового 3d-об'єкта («чайник») на площину AR-маркера при використанні описаних у роботі спрощених методів проєціювання показані на рис. 5.15а–з ('Hello, world!') та рис. 5.15і–л ('FpyrF_Ci2TQ').

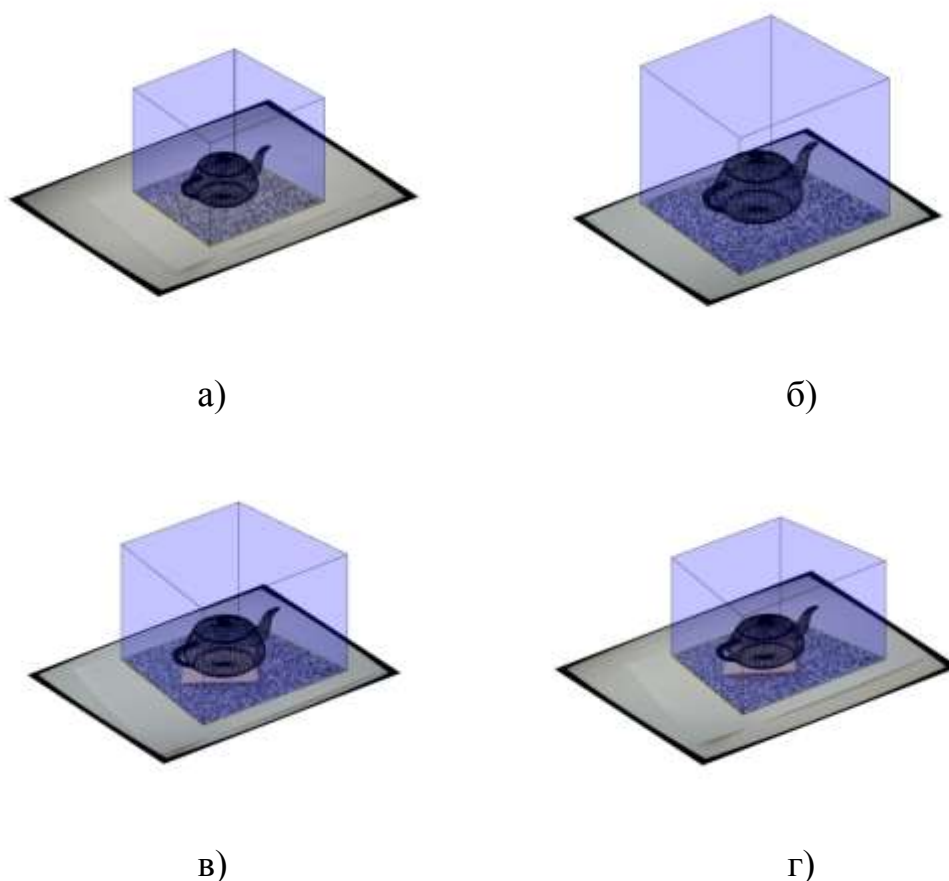
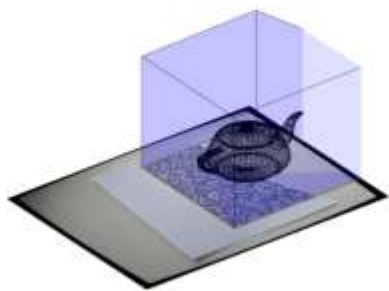
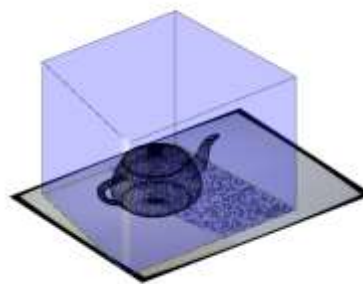


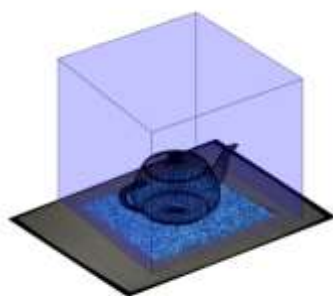
Рисунок 5.15 – Результати застосування спрощеного методу проєціювання,
аркуш 1



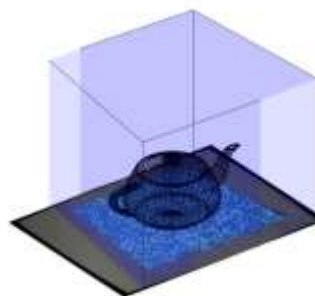
д)



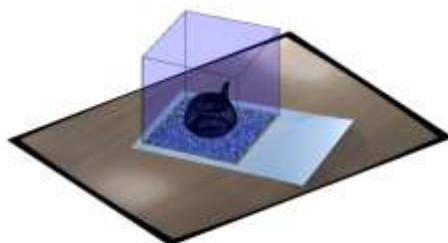
е)



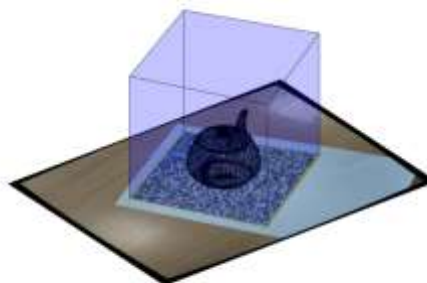
ж)



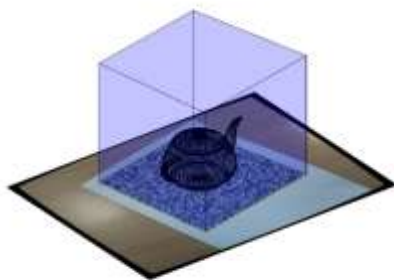
з)



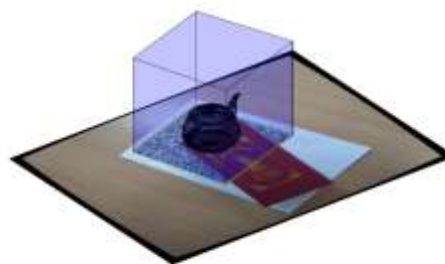
і)



й)



к)



л)

Рисунок 5.15, аркуш 2

Для кожного зображення проведено автокалібрування камери по самому зображенню маркера і корекцію радіальних спотворень. Зауважимо, що у даному випадку задача калібрування спрощується, оскільки необхідно знайти тільки параметри корекції радіальних спотворень

У вигляді напівпрозорого куба візуалізовано границю області маркера, довжина ребра куба співпадає з розміром AR-маркера.

Координати 3d-об'єкта перетворені таким чином, щоб зображення проєціювалося на центр маркера, масштаб об'єкта вибрано так, що максимальна відстань (від ручки до носика чайника) співпадає з фізичним розміром AR-маркера, орієнтація – носик чайника повернуто вправо (на 3 години).

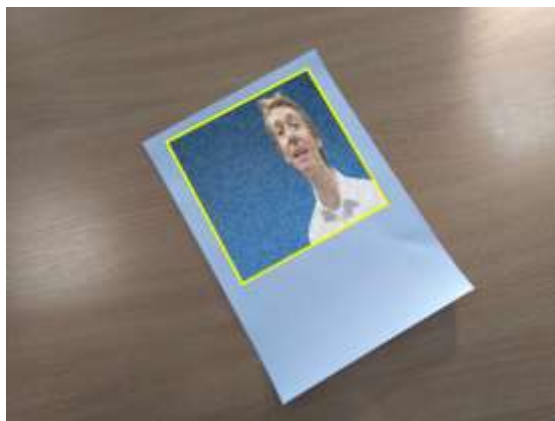
Оскільки спрощений метод проєціювання буде показувати 3d-об'єкт з напрямку, що перпендикулярний до площини маркера, то з метою покращення візуалізації, площина AR-маркера із віртуальним 3d-об'єктом і кубом повернута на деякий кут.

Як видно (див. рис. 5.15), всі 12 AR-маркерів незалежно від рівня завад і умов зйомки дозволяють правильно використовувати спрощений метод проєктування тестового 3d-об'єкта («чайник») на площину AR-маркера. Слід зауважити, що в більшості випадків (в тому числі і для даних зображень) умови зйомки відповідають умові використання спрощеного методу – кут між площиною камери і площиною AR-маркера є порівняно малим.

5.3.3 Результати рендерингу відео-потoku в області маркера

Результати рендерингу відео-потoku в області AR-маркера показані на рис. 5.16а–г (використовувались тільки AR-маркери, в яких закодовано

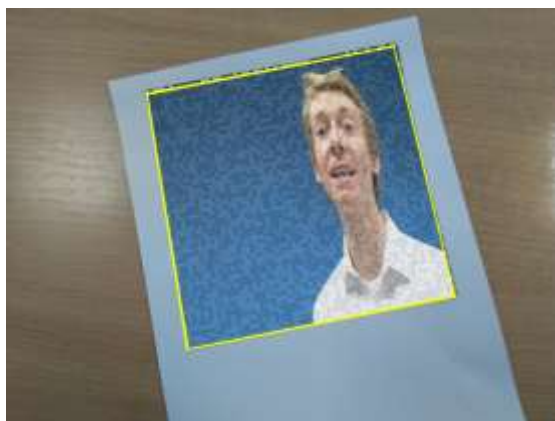
посилання на рельне відео у YouTube – ‘FpyrF_Ci2TQ’).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.16 – Результати рендерингу відео-потoku

Для кожного зображення жовтою лінією візуалізовано границю області маркера (яку він би займав, якби не було завад); показано трансформований перший кадр відео.

Як видно (див. рис. 5.16), всі 4 AR-маркерів незалежно від рівня завад і умов зйомки дозволяють:

- правильно декодувати url-адресу і відкрити відео-файл;
- правильно визначити параметри проєктивного перетворення і вивести кожен кадр в області AR-маркера.

5.4 Експериментальні оцінки

5.4.1 Вплив шуму різного типу на точність декодування візуальних маркерів

Типи маркерів, що використовувались для проведення експериментів (табл. 5.3–5.5):

- розроблений мозаїчний стохастичний AR-маркер (стовпець **AR-маркер**);

- модельні штрих-кодові AR-маркери, в якості яких використовувася QR-код (такий самий, як зображення-повідомлення) до якого з метою коректності порівняння результатів застосовувалися процедури додавання такого самого рівня надлишковості:

- а) масштабування у 3 рази, що співпадає з способом додавання надлишковості при створенні мозаїчного стохастичного AR-маркера (стовпець **QR-код (1x9)**);

- б) дублювання зображення QR-коду у вигляді матриці 3×3 (стовпець **QR-код (3x3)**).

Для експериментів використовувався шум 2 типів:

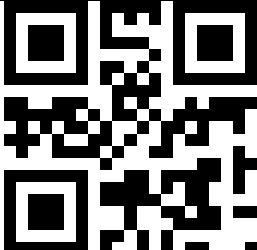
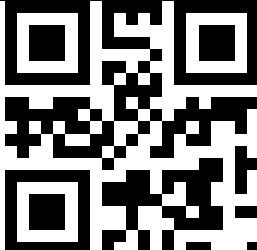
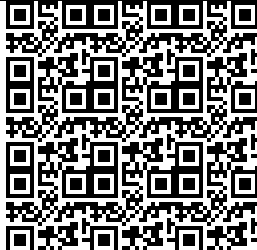
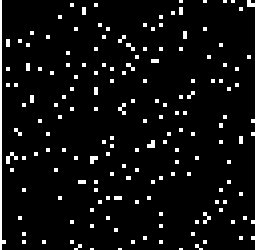
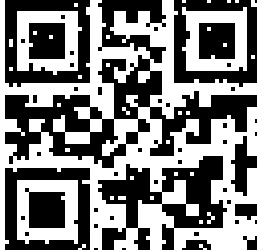
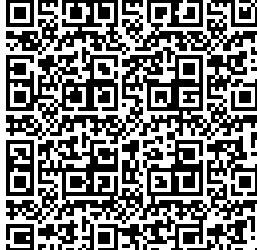
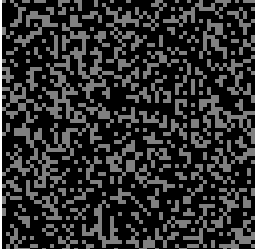
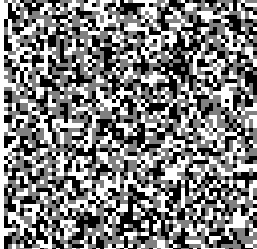
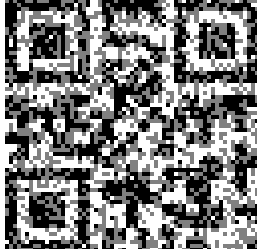
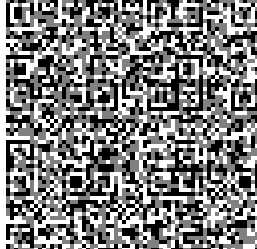
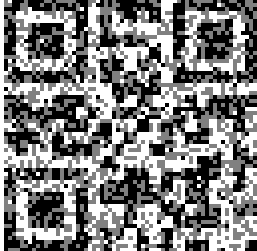
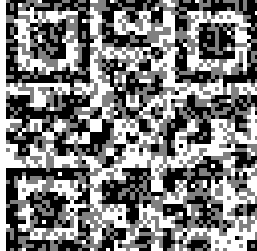
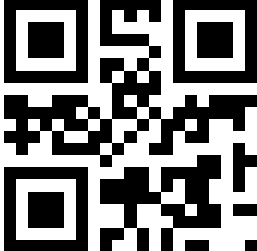
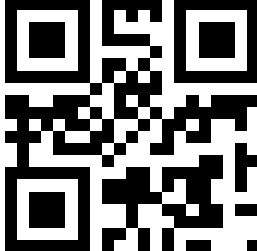
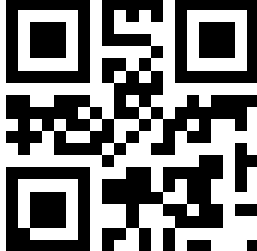
- 1) інверсія біту повідомлення, імовірність помилки 0,15; візуалізовано як **4 рядок** стовпця **Шум** у табл. 5.3–5.5, шумовий патерн однаковий для всіх типів експериментів;

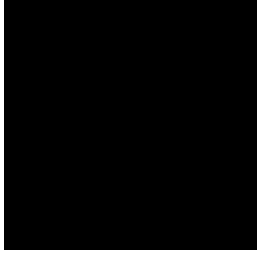
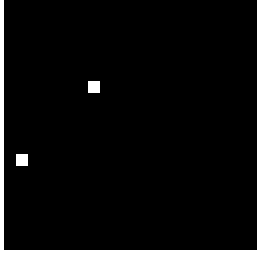
- 2) втрата бітів повідомлення, імовірність помилки 0,40; візуалізовано як **5 рядок** стовпця **Шум** у табл. 5.3–5.5, використано 3 типи завади:

- точкові завади у вигляді імпульсного шуму (табл. 5.3);
- протяжна завада, що локалізована в центрі зображення (табл. 5.4);
- протяжна завада, що локалізована внизу зображення (табл. 5.5).

Основні етапи експерименту наведено у табл. 5.3–5.5, кожному етапу відповідає рядок з тим самим номером у таблицях [81], [83], [92]:

Таблиця 5.3 – Вплив точкових завад на точність декодування AR-маркерів

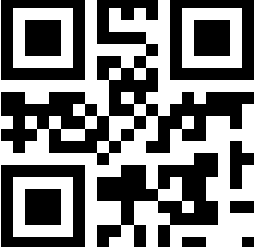
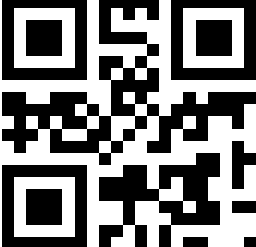
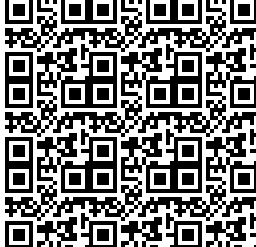
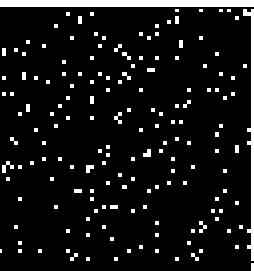
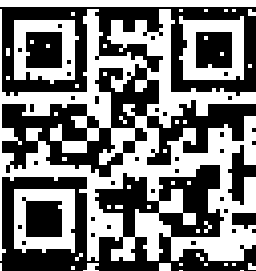
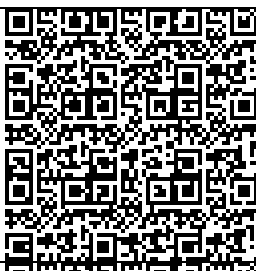
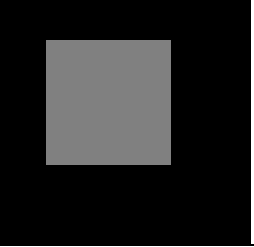
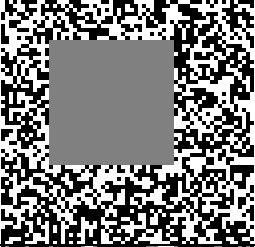
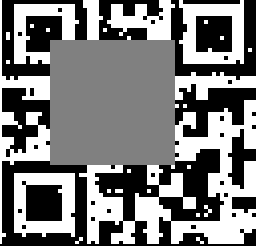
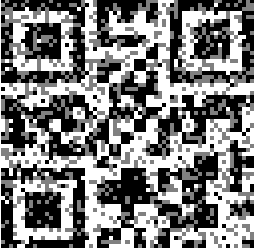
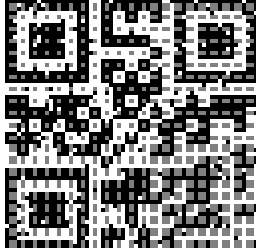
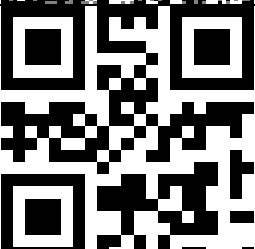
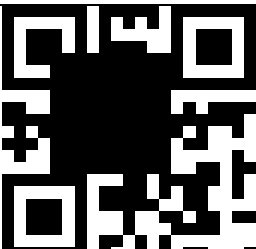
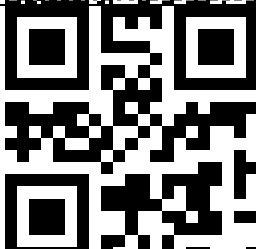
	Шум	AR-маркер	QR-код (1х9)	QR-код (3х3)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

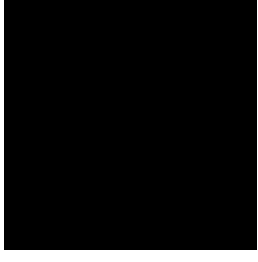
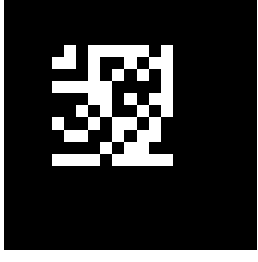
8				
---	--	---	--	---

- 1) ввід зображення-повідомлення;
- 2) введення надлишковості;
- 3) проведення псевдовипадкового перемішування даних (виконується тільки для мозаїчного стохастичного AR-маркера);
- 4) додавання шуму інверсії бітів, при цьому інверсуються біти у зображеннях AR-маркерів у позиціях, що показано на відповідному шумовому патерні;
- 5) додавання пропаданя бітів, при цьому біти у зображеннях AR-маркерів у позиціях, що показано на відповідному шумовому патерні, замінюються невизначеним значенням $1/2$;
- 6) застосування зворотної перестановки для мозаїчного стохастичного AR-маркера; при цьому з академічною метою (застосування цього способу для реальних зображень буде утруднено у зв'язку із методом синхронізації QR-кодів по власних синхронізаційних маркерах) зроблено перевпрядкування пікселів зображення до виду, коли можна буде застосовувати запропонований метод фільтрації шуму;
- 7) фільтрація шуму методом, що запропоновано у роботі;
- 8) візуалізація помилково декодованих бітів.

Як видно з табл. 5.3, при моделюванні впливу точкових завад запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер дає кількість помилок – 0; модельний AR-маркер QR-код (1x9) – 2 помилки; модельний AR-маркер QR-код (3x3) – 1 помилку.

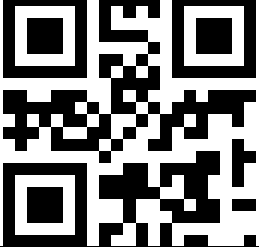
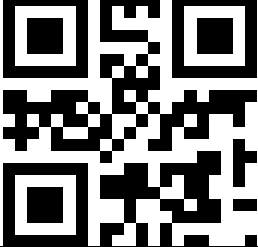
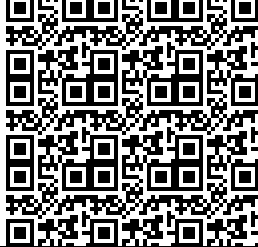
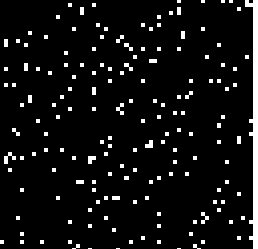
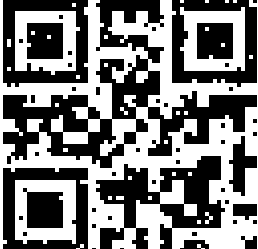
Таблиця 5.4 – Вплив протяжної завади, що локалізована в центрі зображення, на точність декодування AR-маркерів

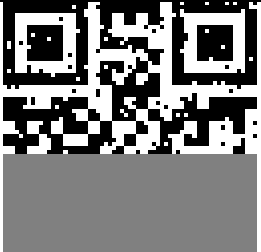
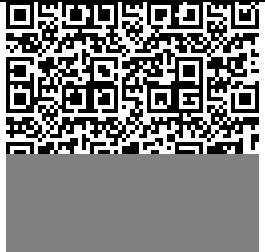
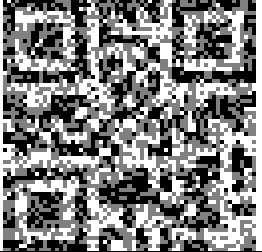
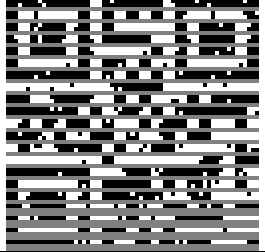
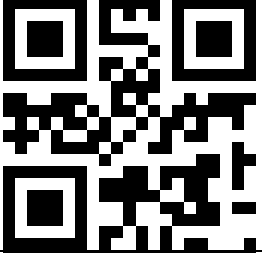
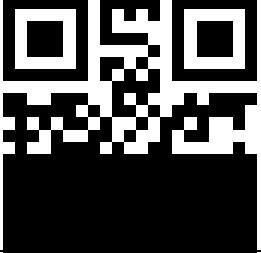
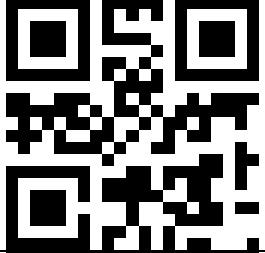
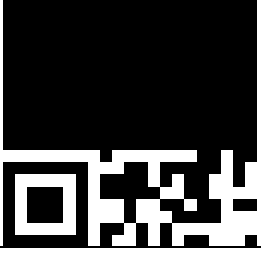
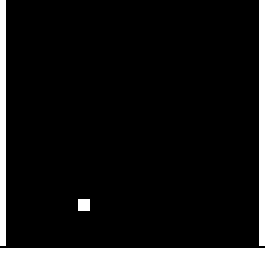
	Шум	AR-маркер	QR-код (1x9)	QR-код (3x3)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

8				
---	--	---	--	---

Як видно з табл. 5.4, при моделюванні впливу завади, що локалізована в центрі зображення, запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер дає кількість помилок – 0; модельний AR-маркер QR-код (1x9) – кількість помилок співпадає з розміром завади; модельний AR-маркер QR-код (3x3) – 0 помилок.

Таблиця 5.5 – Вплив протяжної завади, що локалізована внизу зображення, на точність декодування AR-маркерів

		AR-маркер	QR-код (1x9)	QR-код (3x3)
1				
2				
3				
4				

5				
6				
7				
8				

Як видно з табл. 5.5, при моделюванні впливу завади, що локалізована внизу зображення, запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер дає кількість помилок – 0; модельний AR-маркер QR-код (1x9) – кількість помилок співпадає з розміром завади; модельний AR-маркер QR-код (3x3) – 1 помилок.

Таким чином, запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер завжди дає найкращі результати; модельний AR-маркер QR-код (1x9) для протяжних завад дає кількість помилок, що співпадає з розміром завади; модельний AR-маркер QR-код (3x3) за умови спеціального типу обробки (що має лише академічний інтерес у зв'язку із складністю його реалізації) дає 1-2 помилки для всіх типів завад.

Отже властивість стохастичності є суттєвою для робастності AR-

маркерів, оскільки будь-який тип завад зводиться до завад типу імпульсних, що дозволяє ефективно і уніфіковано декодувати зображення.

Модельний AR-маркер QR-код (3x3) показує порівняно непогані результати тільки тому, що запропонований спосіб обробки наближає його до стохастичного кодування даних.

5.4.2 Порівняння теоретично розрахованих та експериментальних розподілів імовірності правильного декодування в залежності від імовірності помилки і пропуску даних

Для отримання експериментальних розподілів імовірності правильного декодування в залежності від імовірності помилки і пропуску даних було згнеровано ансамбль AR-маркерів, після чого до кожного з них застосовано операції додавання помилок (інверсії бітів) і пропуску даних (заповнення невизначеним значенням 1/2). Імовірність правильного декодування оцінювалась як відношення правильно декодованих бітів до загальної довжини повідомлення (у даному випадку площі зображення-повідомлення).

Результати зведено у табл. 5.6, при цьому використано такі позначення: q – імовірність помилки; p_1^{exp} – для емпірично оціненої імовірності декодування при інверсії бітів, p_2^{exp} – для оціненої імовірності декодування при пропуску бітів; теоретичні імовірності $p_{1,2}^{\text{theor}}$ розраховувались за виразами (4.8)–(4.9) відповідно; $\Delta p_{1,2} = p_{1,2}^{\text{theor}} - p_{1,2}^{\text{exp}}$ – різниці.

Таблиця 5.6 – Результати теоретичної та емпірично оцінених імовірностей декодування в залежності від імовірності помилки і пропуску даних

q	p_1^{theor}	p_1^{exp}	Δp_1	p_2^{theor}	p_2^{exp}	Δp_2
0,0098	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
0,0197	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
0,0295	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
0,0393	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
0,0491	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
0,0590	0,9999	1,0000	-0,0001	1,0000	1,0000	0,0000
0,0688	0,9998	1,0000	-0,0002	1,0000	1,0000	0,0000
0,0786	0,9997	1,0000	-0,0003	1,0000	1,0000	0,0000
0,0884	0,9995	1,0000	-0,0005	1,0000	1,0000	0,0000
0,0983	0,9992	1,0000	-0,0008	1,0000	1,0000	0,0000
0,1081	0,9987	1,0000	-0,0013	1,0000	1,0000	0,0000
0,1179	0,9981	1,0000	-0,0019	1,0000	1,0000	0,0000
0,1277	0,9973	0,9932	0,0041	1,0000	1,0000	0,0000
0,1376	0,9962	0,9977	-0,0016	1,0000	1,0000	0,0000
0,1474	0,9948	0,9841	0,0107	1,0000	1,0000	0,0000
0,1572	0,9931	0,9955	-0,0024	1,0000	1,0000	0,0000
0,1670	0,9910	0,9977	-0,0068	1,0000	1,0000	0,0000
0,1769	0,9884	0,9864	0,0020	1,0000	1,0000	0,0000
0,1867	0,9854	0,9887	-0,0033	1,0000	1,0000	0,0000
0,1965	0,9818	0,9841	-0,0023	1,0000	1,0000	0,0000
0,2063	0,9777	0,9819	-0,0042	1,0000	1,0000	0,0000
0,2162	0,9729	0,9546	0,0182	1,0000	1,0000	0,0000
0,2260	0,9674	0,9796	-0,0121	1,0000	1,0000	0,0000
0,2358	0,9613	0,9637	-0,0024	1,0000	1,0000	0,0000
0,2457	0,9544	0,9478	0,0065	1,0000	1,0000	0,0000
0,2555	0,9467	0,9524	-0,0057	1,0000	1,0000	0,0000
0,2653	0,9382	0,9592	-0,0210	1,0000	1,0000	0,0000
0,2751	0,9288	0,9274	0,0014	1,0000	1,0000	0,0000
0,2850	0,9186	0,9274	-0,0089	1,0000	1,0000	0,0000
0,2948	0,9075	0,9161	-0,0086	1,0000	1,0000	0,0000
0,3046	0,8954	0,8912	0,0043	1,0000	1,0000	0,0000
0,3144	0,8825	0,8821	0,0004	1,0000	1,0000	0,0000
0,3243	0,8687	0,8662	0,0025	1,0000	1,0000	0,0000
0,3341	0,8540	0,8662	-0,0122	0,9999	1,0000	-0,0001
0,3439	0,8384	0,8209	0,0175	0,9999	1,0000	-0,0001
0,3537	0,8219	0,8322	-0,0103	0,9999	1,0000	-0,0001
0,3636	0,8046	0,7982	0,0064	0,9999	1,0000	-0,0001
0,3734	0,7864	0,7823	0,0041	0,9999	0,9977	0,0021
0,3832	0,7675	0,7664	0,0010	0,9998	1,0000	-0,0002
0,3930	0,7478	0,7596	-0,0118	0,9998	1,0000	-0,0002

Продовження табл. 5.6

0,4029	0,7274	0,7347	-0,0073	0,9997	1,0000	-0,0003
0,4127	0,7063	0,6939	0,0125	0,9997	0,9955	0,0042
0,4225	0,6847	0,6803	0,0044	0,9996	0,9955	0,0041
0,4324	0,6625	0,6735	-0,0110	0,9995	1,0000	-0,0005
0,4422	0,6398	0,6463	-0,0065	0,9994	1,0000	-0,0006
0,4520	0,6167	0,6168	-0,0001	0,9992	1,0000	-0,0008
0,4618	0,5932	0,5850	0,0082	0,9990	0,9977	0,0013
0,4717	0,5695	0,5488	0,0207	0,9988	0,9955	0,0034
0,4815	0,5455	0,5510	-0,0055	0,9986	1,0000	-0,0014
0,4913	0,5214	0,5193	0,0021	0,9983	0,9977	0,0006
0,5011	0,4972	0,4830	0,0142	0,9980	0,9977	0,0003
0,5110	0,4730	0,4762	-0,0031	0,9976	1,0000	-0,0024
0,5208	0,4490	0,4853	-0,0363	0,9972	0,9955	0,0017
0,5306	0,4250	0,4150	0,0101	0,9967	0,9977	-0,0011
0,5404	0,4013	0,4059	-0,0045	0,9961	0,9909	0,0051
0,5503	0,3780	0,3741	0,0038	0,9954	0,9932	0,0022
0,5601	0,3549	0,3878	-0,0328	0,9946	0,9909	0,0036
0,5699	0,3323	0,3424	-0,0101	0,9937	0,9932	0,0005
0,5797	0,3103	0,3220	-0,0117	0,9926	0,9932	-0,0006
0,5896	0,2887	0,3016	-0,0128	0,9914	0,9909	0,0005
0,5994	0,2678	0,2426	0,0252	0,9900	0,9796	0,0104
0,6092	0,2476	0,2585	-0,0109	0,9884	0,9887	-0,0002
0,6190	0,2281	0,2313	-0,0032	0,9866	0,9796	0,0071
0,6289	0,2093	0,2222	-0,0129	0,9846	0,9773	0,0073
0,6387	0,1914	0,1905	0,0009	0,9823	0,9660	0,0163
0,6485	0,1742	0,1655	0,0087	0,9797	0,9728	0,0069
0,6584	0,1579	0,1587	-0,0008	0,9768	0,9683	0,0085
0,6682	0,1425	0,1451	-0,0026	0,9735	0,9841	-0,0107
0,6780	0,1280	0,1406	-0,0126	0,9697	0,9728	-0,0031
0,6878	0,1144	0,1111	0,0033	0,9655	0,9705	-0,0050
0,6977	0,1017	0,1179	-0,0162	0,9608	0,9637	-0,0029
0,7075	0,0899	0,0998	-0,0099	0,9556	0,9592	-0,0036
0,7173	0,0790	0,0975	-0,0185	0,9497	0,9342	0,0155
0,7271	0,0690	0,0703	-0,0013	0,9432	0,9184	0,0248
0,7370	0,0598	0,0612	-0,0014	0,9359	0,9342	0,0016
0,7468	0,0515	0,0567	-0,0052	0,9278	0,9342	-0,0065
0,7566	0,0440	0,0567	-0,0127	0,9187	0,9116	0,0072
0,7664	0,0372	0,0385	-0,0013	0,9087	0,8889	0,0198
0,7763	0,0312	0,0159	0,0154	0,8976	0,8753	0,0224
0,7861	0,0259	0,0340	-0,0081	0,8854	0,8662	0,0192
0,7959	0,0213	0,0204	0,0009	0,8718	0,8707	0,0011
0,8057	0,0173	0,0045	0,0128	0,8569	0,8776	-0,0207
0,8156	0,0139	0,0091	0,0048	0,8404	0,8299	0,0104
0,8254	0,0110	0,0136	-0,0026	0,8222	0,8458	-0,0236
0,8352	0,0085	0,0091	-0,0006	0,8022	0,7846	0,0176

0,8450	0,0065	0,0091	-0,0026	0,7802	0,7551	0,0251
0,8549	0,0049	0,0023	0,0026	0,7561	0,7415	0,0147
0,8647	0,0036	0,0045	-0,0010	0,7297	0,7460	-0,0163
0,8745	0,0025	0,0000	0,0025	0,7008	0,6893	0,0115
0,8844	0,0017	0,0023	-0,0005	0,6691	0,6485	0,0206
0,8942	0,0012	0,0045	-0,0034	0,6346	0,6667	-0,0321
0,9040	0,0007	0,0000	0,0007	0,5968	0,5873	0,0095
0,9138	0,0004	0,0000	0,0004	0,5556	0,5397	0,0159
0,9237	0,0003	0,0000	0,0003	0,5107	0,5193	-0,0086
0,9335	0,0001	0,0000	0,0001	0,4618	0,4512	0,0105
0,9433	0,0001	0,0000	0,0001	0,4086	0,4014	0,0072
0,9531	0,0000	0,0000	0,0000	0,3508	0,3583	-0,0075
0,9630	0,0000	0,0000	0,0000	0,2880	0,2880	0,0000
0,9728	0,0000	0,0000	0,0000	0,2199	0,2245	-0,0046
0,9826	0,0000	0,0000	0,0000	0,1460	0,1474	-0,0014
0,9924	0,0000	0,0000	0,0000	0,0660	0,0680	-0,0020

На рис. 5.17 наведено графіки теоретичного та емпіричного розподілу імовірності правильного декодування в залежності від імовірності помилки (інверсії даних), на рис. 5.18 – графіки теоретичного та емпіричного розподілу імовірності правильного декодування в залежності від імовірності пропуску даних, а на рис. 5.19 – порівняння теоретичного та емпіричного розподілу імовірності правильного декодування в залежності від імовірностей одночасної помилки (інверсії даних) і пропуску даних

Для кількісної оцінки відповідності теоретичних та емпіричних розподілів, переконаємося за допомогою теста Колмогорова-Смірнова [239], що генеральні сукупності різниць $\Delta p_{1,2} = p_{1,2}^{\text{theor}} - p_{1,2}^{\text{exp}}$ між порахованими теоретично імовірностями $p_{1,2}^{\text{theor}}$ та оцінками імовірностей $p_{1,2}^{\text{exp}}$, що отримані в результаті симуляції, підкоряються нормальному закону розподілу і розрахуємо довірчі інтервали для генеральних середніх (при невідомих генеральних дисперсіях).

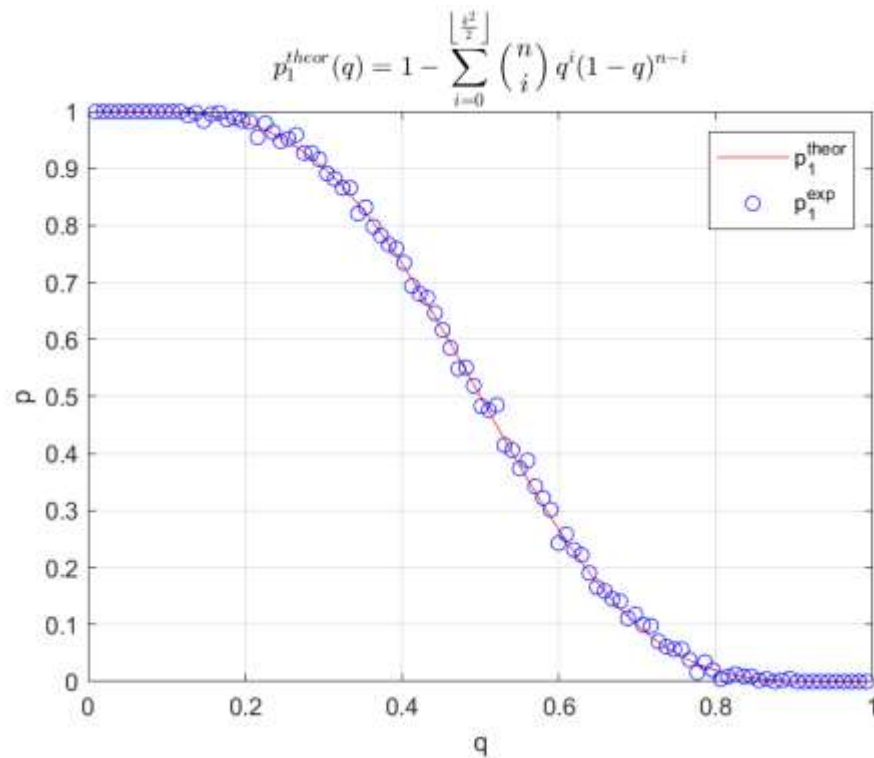


Рисунок 5.17 – Порівняння теоретичного та емпіричного розподілу імовірності правильного декодування в залежності від імовірності помилки (інверсії даних)

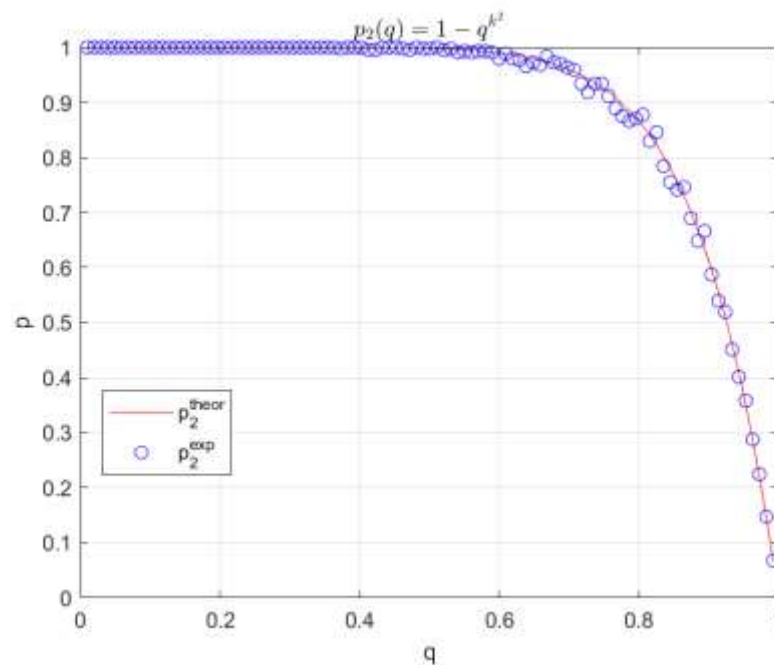


Рисунок 5.18 – Порівняння теоретичного та емпіричного розподілу імовірності правильного декодування в залежності від імовірності пропуску даних

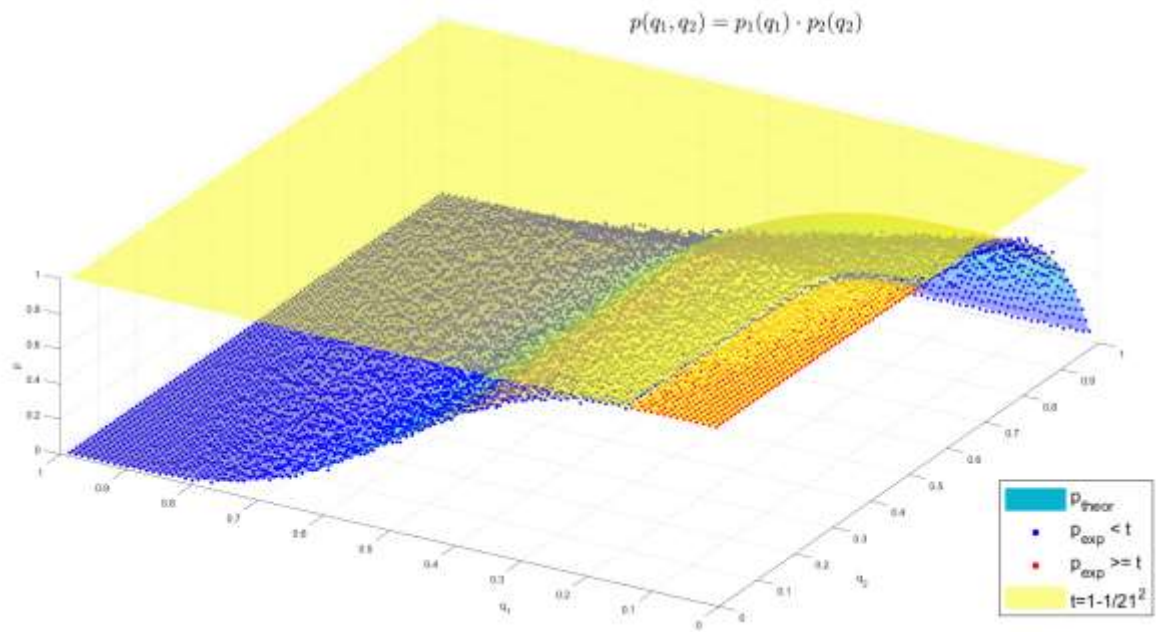


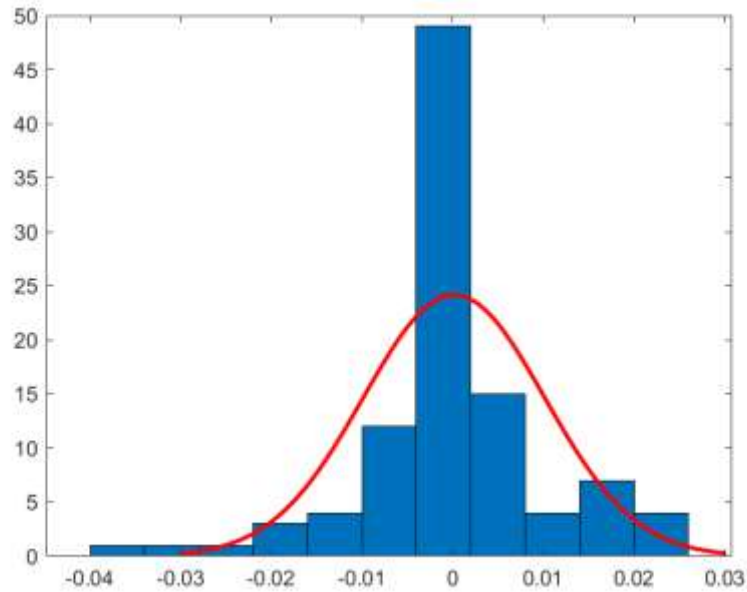
Рисунок 5.19 – Порівняння теоретичного та емпіричного розподілу імовірності правильного декодування в залежності від імовірностей помилки (інверсії даних) і пропуску

Результати застосування теста Колмогорова-Смірнова (для чого використовувалась функція MATLAB `kstest`) дозволяють для обох сукупностей $\Delta p_{1,2}$ прийняти 0-гіпотезу, що вони підкоряються нормальному закону розподілу (див. рис. 5.20). Таким чином, оскільки $\Delta p_{1,2}$ – генеральні сукупності, що підкоряються нормальному закону розподілу, генеральні дисперсії яких $\sigma_{1,2}^2$ невідомі; об'єми виборки в кожному випадку однакові – n ; $\overline{\Delta p}_{1,2}$ – вибіркові середні; $S_{1,2}$ – вибіркові середні квадратичні відхилення, то довірчі інтервали для генеральних середніх $\delta p_{1,2}$ із заданим рівнем надійності γ знаходяться за формулою [239]:

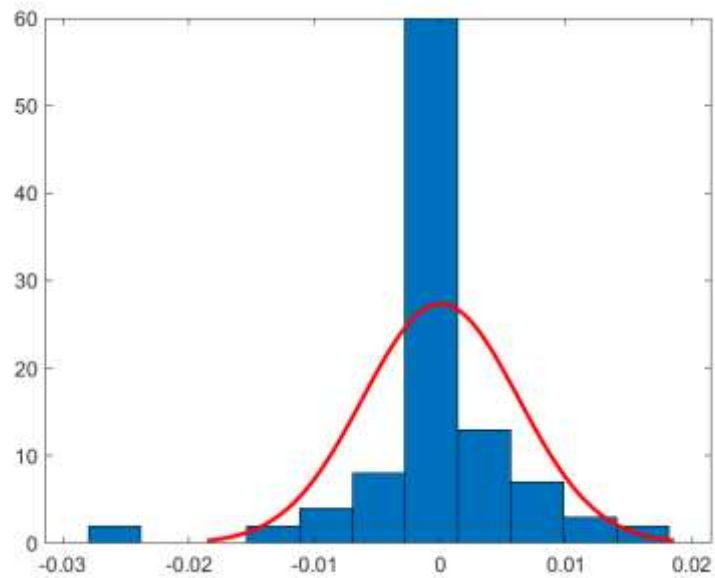
$$\overline{\Delta p}_{1,2} - t_{\frac{1-\gamma}{2}, n-1} \frac{S_{1,2}}{\sqrt{n-1}} < \delta p_{1,2} < \overline{\Delta p}_{1,2} + t_{\frac{1-\gamma}{2}, n-1} \frac{S_{1,2}}{\sqrt{n-1}}, \quad (5.1)$$

де значення $t_{\frac{1-\gamma}{2}, n-1}$ знаходиться з розподілу Стюдента. Величини

$t_{\frac{1-\gamma}{2}, n-1} \frac{S_{1,2}}{\sqrt{n-1}}$ є шириною відповідних довірчих інтервалів.



а)



б)

Рисунок 5.20 – Гістограми різниць теоретичних і емпіричних імовірностей правильного декодування: а) для помилки (інверсії даних); б) для пропуску даних

В нашому випадку об'єми виборок в кожному випадку $n=101$; для заданого рівня надійності $\gamma=0.95$ значення коефіцієнта Стюдента $t_{\frac{1-0.95}{2}, 101-1} = 1.9840$; вибіркові середні $\overline{\Delta p_1} = 0.00014$ і $\overline{\Delta p_2} = -0.00002$; відповідні вибіркові середні квадратичні відхилення $S_1 = 0.0093$ і $S_2 = 0.0062$; тому шукані довірчі інтервали визначаються як

$$-0.0018 < \delta p_1 < +0.0021, \quad (5.2)$$

$$-0.0012 < \delta p_2 < +0.0013. \quad (5.3)$$

Оскільки довірчі інтервали (5.2)–(5.3) для середніх відхілень між теоретичними та емпіричними імовірностями симметричні відносно нульового значення, то це означає що теоретичні та емпіричні дані добре узгоджуються між собою.

5.4.3 Експериментальне доведення можливості знаходження інверсних блочних перестановок

Покажемо, що у випадку, коли розмір блоку перестановки менший за пермутаційний радіус (4.53), що було введено у п. 4.6.6, то існує ефективний спосіб знаходження інверсних блочних перестановок без використання додаткової апіорної інформації за допомогою генетичних алгоритмів [85], [103].

Результати отримано за допомогою MATLAB 9.4.0.813654 (R2018a) з використанням Global Optimization Toolbox Version 3.4.4 [240].

Параметри ГА (якщо їх значення відрізняються від значень по замовчуванню), що використовувались для моделювання, наведено у

табл. 5.7. Всі експерименти проводилися з однаковим набором параметрів.

Таблиця 5.7 – Параметри ГА, що використовувалися для моделювання

Параметр ГА	Значення	Примітка
'PopulationSize'	10000	Розмір популяції
'EliteCount'	5000	Додатне ціле число, яке визначає, скільки індивідів у поточному поколінні гарантовано виживе до наступного покоління
'Generations'	50000	Максимальна кількість ітерацій перед тим, як алгоритм зупиниться
'StallGenLimit'	1000	Алгоритм зупиняється, якщо стільки ітерацій середня відносна зміна найкращого значення цільової функції менше або дорівнює значенню FunctionTolerance
'StallTimeLimit'	50000	Алгоритм зупиняється, якщо немає покращення цільової функції протягом MaxStallTime секунд
'TolFun'	0	Відносна зміна найкращого значення цільової функції
'CreationFcn'	@gacreationuniform	Функція, що створює початкову популяцію
'CrossoverFcn'	@crossoverscattered	Функція, що алгоритм використовує для створення кросоверів нащадків
'CrossoverFraction'	0.8	Частка популяції у наступному поколінні, не рахуючи елітних нащадків, що створює функція кросовера
'MutationFcn'	{@mutationuniform, 0.8}	Функція, що використовується для мутації нащадків
'FitnessLimit'	0	Якщо цільова функція досягає цього значення, то алгоритм зупиняється

Для того, щоб алгоритм автоматично зупинявся, коли знайдена правильна перестановка, цільова функція для кожного виду зображень (що

задається виразом (4.53), була зменшена на значення цільової функції вихідного зображення, таким чином її мінімальним значенням буде 0, що і є умовою зупинки алгоритму (задається значенням параметра 'FitnessLimit' рівним 0, див. табл. 5.7).

Зауважимо, що від цієї умови можна відмовитися (в дусі чисто «сліпого» підходу), замінивши її більш жорсткою умовою на кількість ітерацій, при яких цільова функція не міняється (параметр 'StallGenLimit').

Для експериментів було використано такі модельні зображення (рис. 5.21):

- ‘Cameraman’ [241];
- ‘Текст’ (скріншот з програми Adobe Acrobat Reader DC [242] під час перегляду англomовної статті).

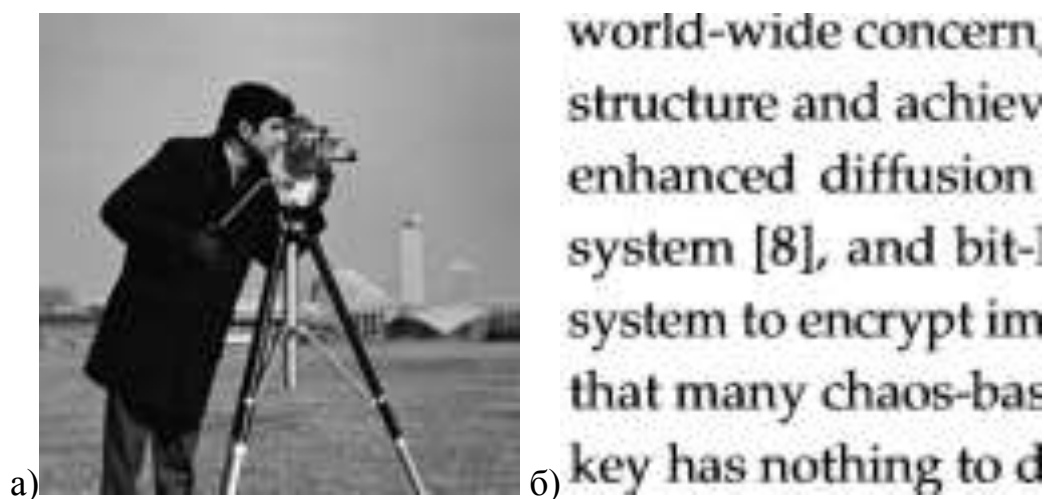


Рисунок 5.21 – Модельні зображення: а) ‘Cameraman’; б) ‘Текст’.

Всі зображення були перемасштабовані до розміру (120x120), представлені у градаціях сірого і динамічний діапазон яскравості нормовано на 1.

Результати обробки зображення ‘Cameraman’. Експерименти проведено для різних значень розміру блоку $b=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$. При всіх цих значеннях ГА знаходив правильну перестановку (рис. 5.22).

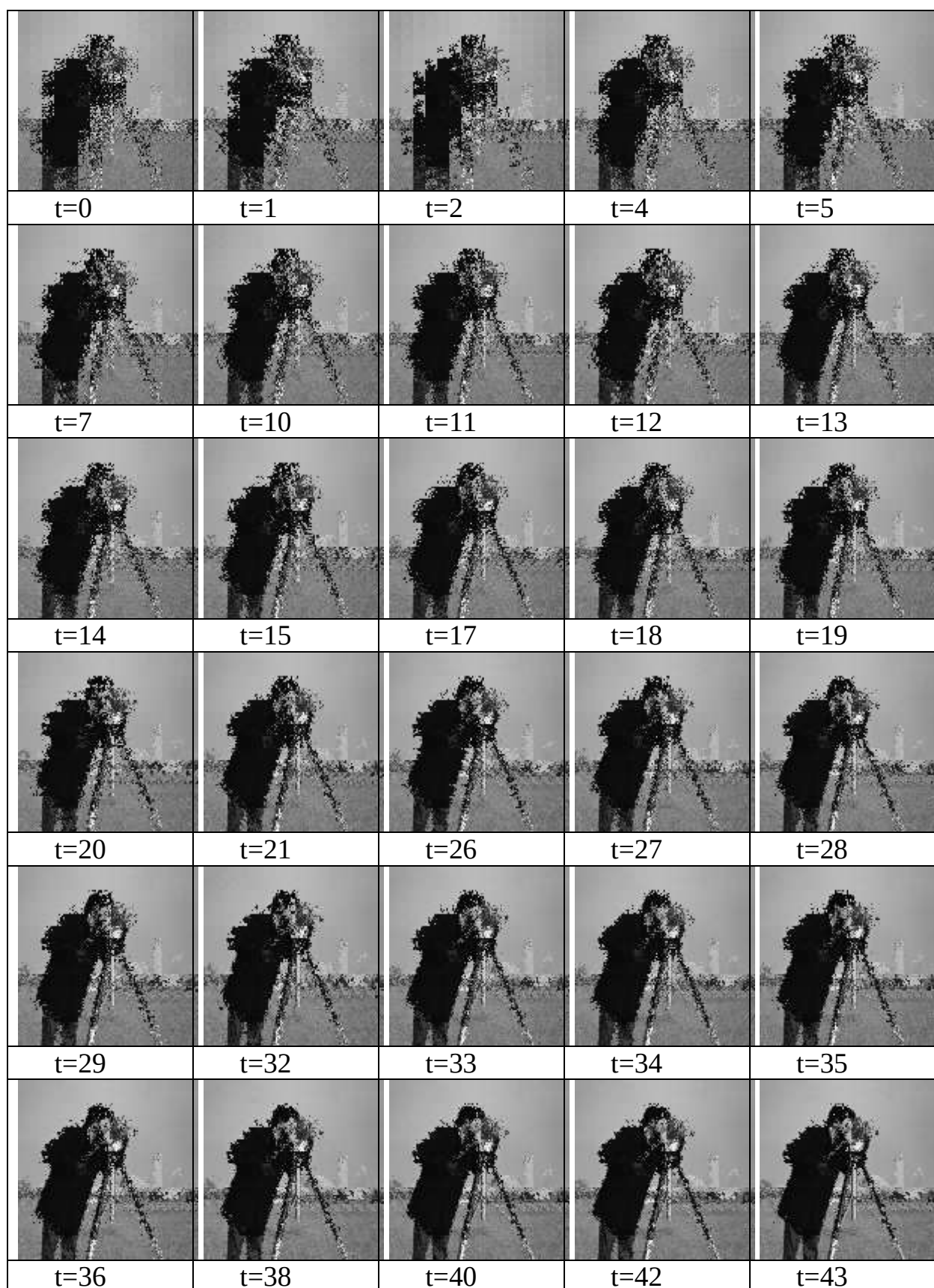


Рисунок 5.22– Результати обробки зображення ‘Cameman’, розмір блоку $b=8$, показано тільки ті результати ітерацій, при яких мінялося значення цільової функції, аркуш 1

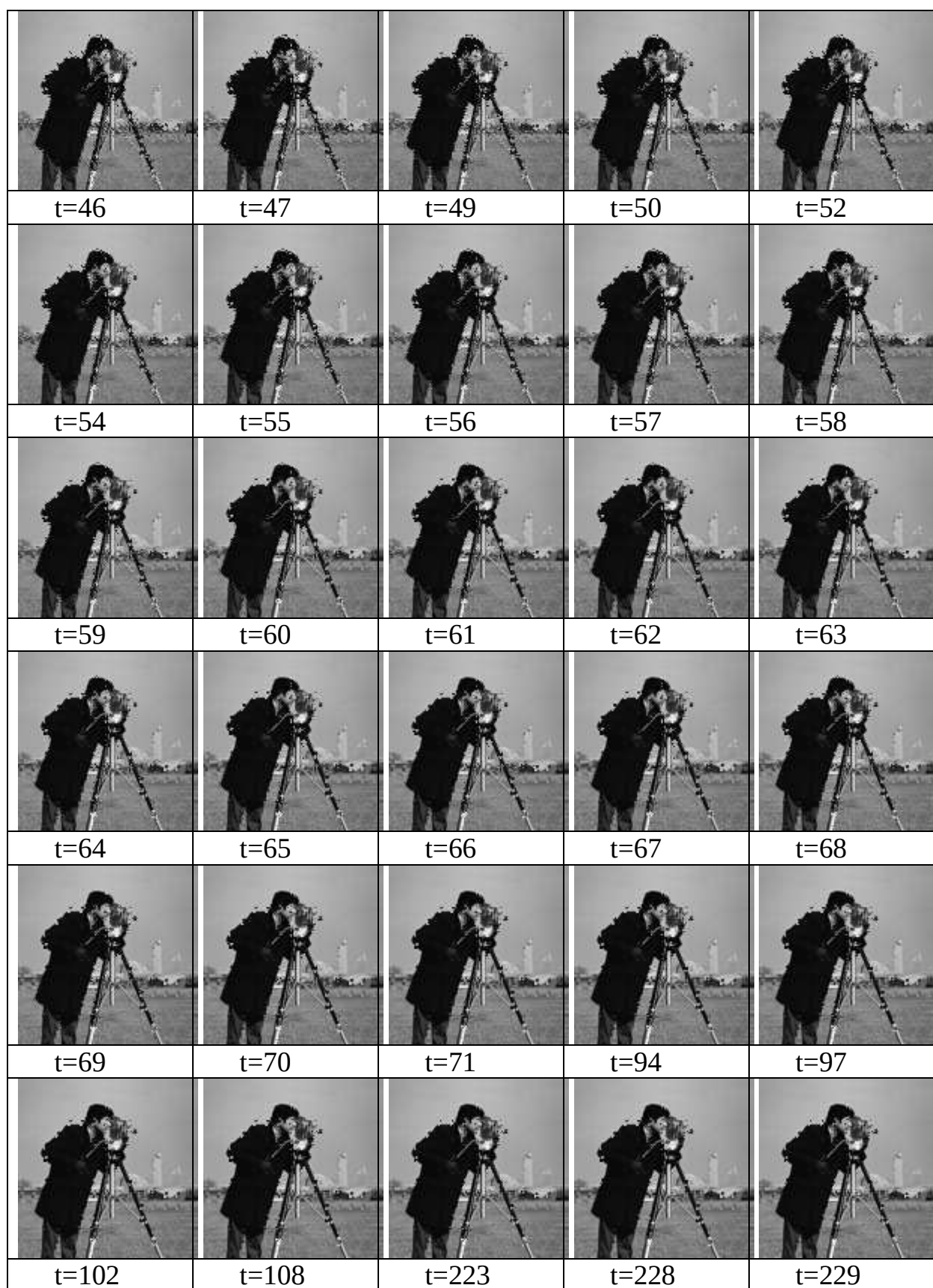


Рисунок 5.22, аркуш 2

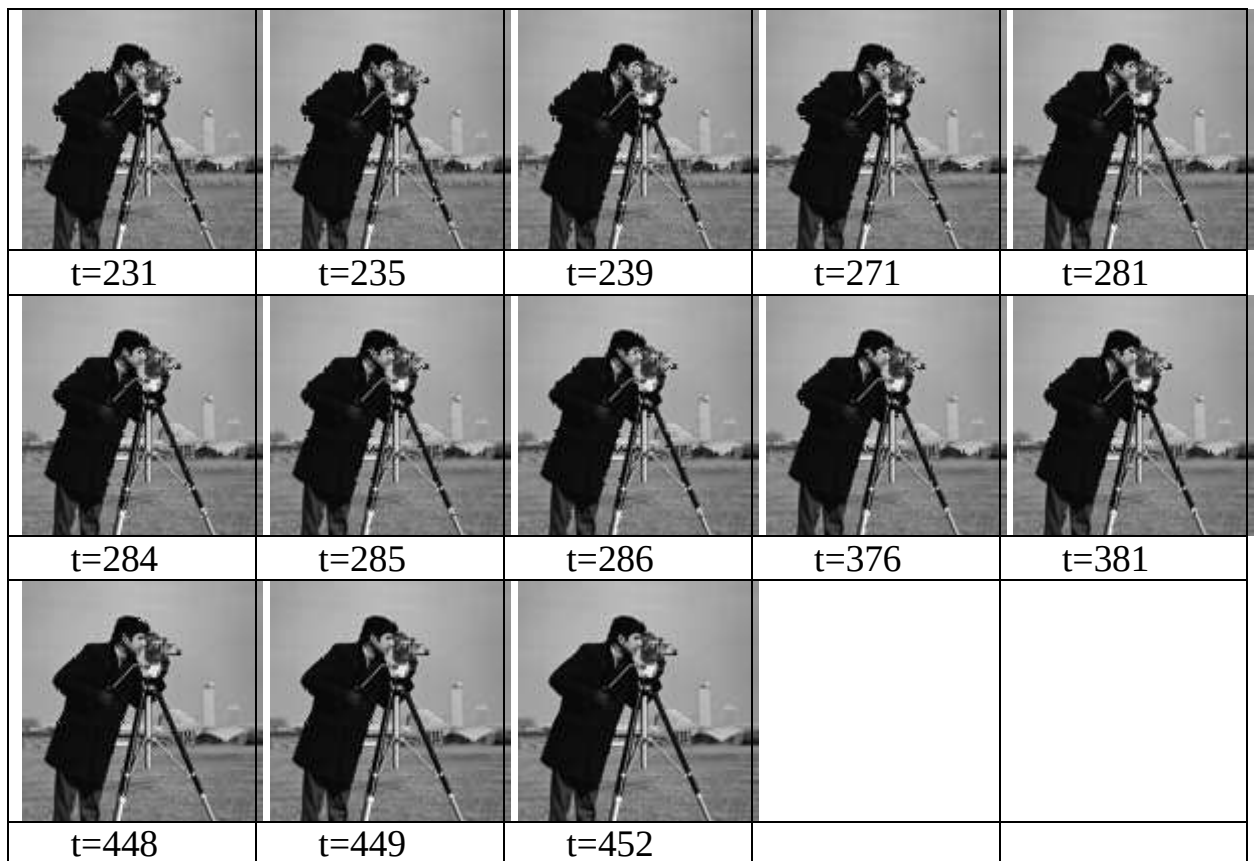


Рисунок 5.22, аркуш 3

Результати обробки зображення ‘Текст’. Було проведено експерименти для різних значень розміру блоку $b=2, 3, 4, 5, 6$ (рис. 5.23). Графіки зміни цільової функції наведено на рис. 5.24.

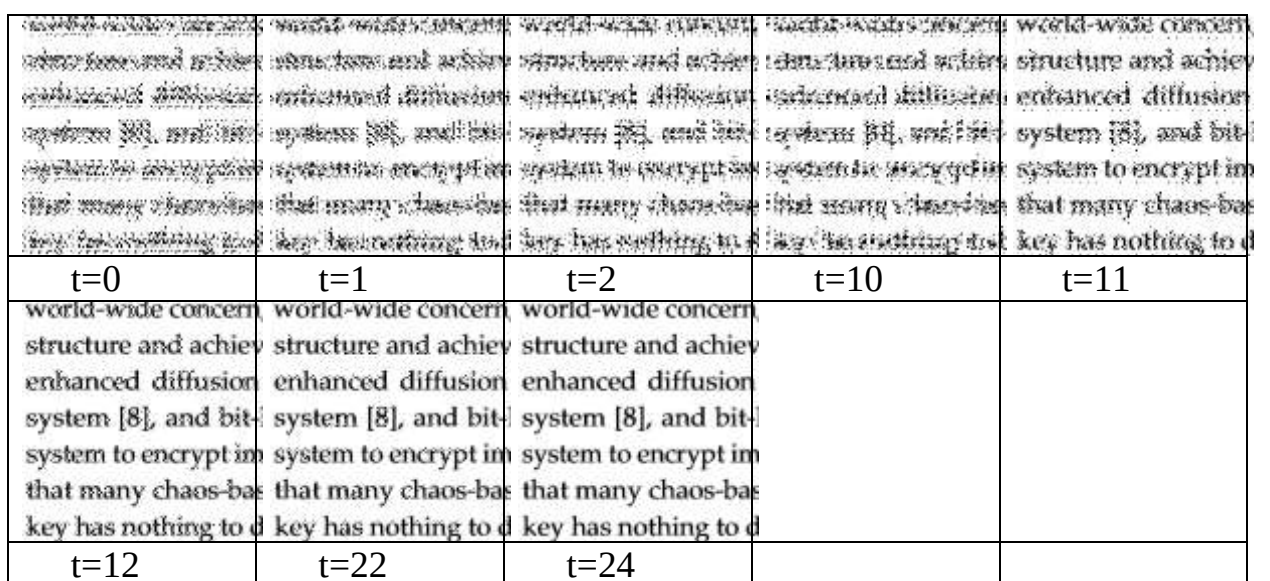
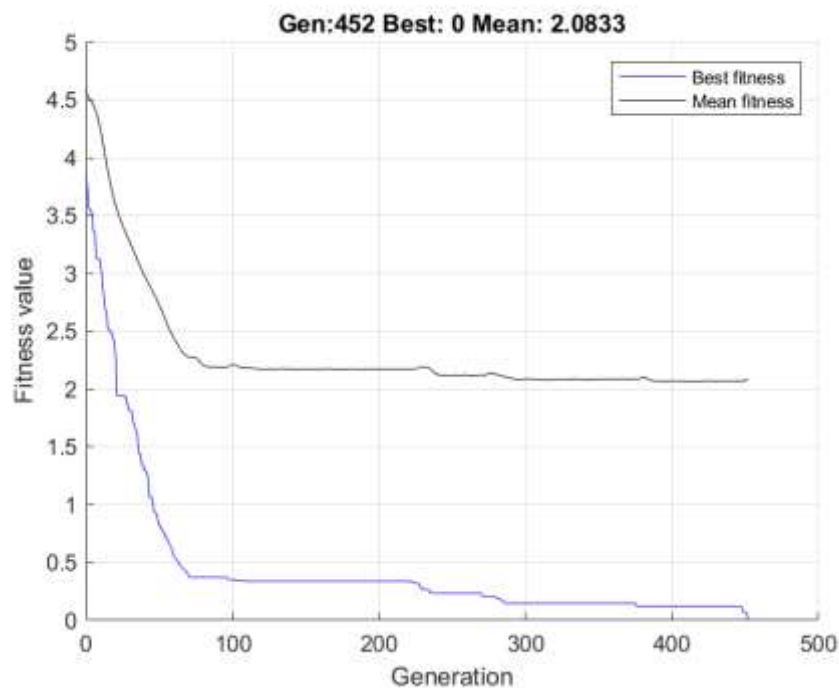
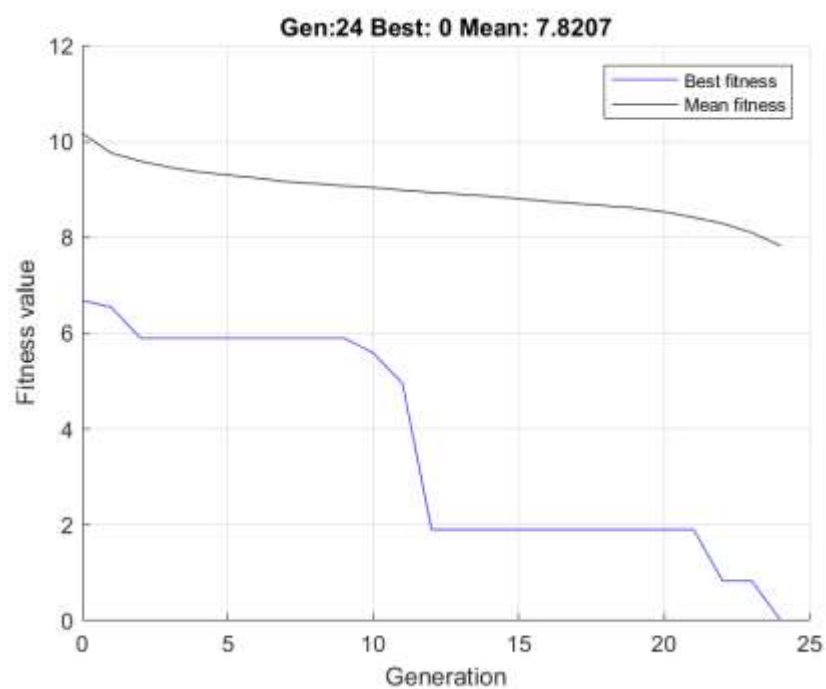


Рисунок 5.23 – Результати обробки зображення ‘Text’, розмір блоку $b=4$, показано результати ітерацій, при яких мінялося значення цільової функції



a)



б)

Рисунок 5.24 – Графіки зміни цільової функції (найкращого і середнього значення по популяції): а) ‘Cameraman’ (розмір блоку $b=8$), ГА збігається за 452 ітерації; б) ‘Текст’ (розмір блоку $b=4$), ГА збігається за 24 ітерації

Значення пермутаційного радіусу та радіусу кореляції, що пораховані для вихідних зображень наведено у табл. 5.8.

Таблиця 5.8 Пораховані значення пермутаційного радіусу та радіусу кореляції

Зображення	Пермутаційний радіус, за виразом (4.53)	Радіус кореляції, за виразом [243, 5.47]	Максимальне значення розміру блоку
‘Cameraman’	24.0368	47.1123	$b = 8$
‘Текст’	4.1073	43.6819	$b = 4$

На рис. 5.25 зображено автокореляційні функції (АКФ) для вихідних і пермутованих зображень, зауважимо, що ці АКФ є суттєво анізотропними.

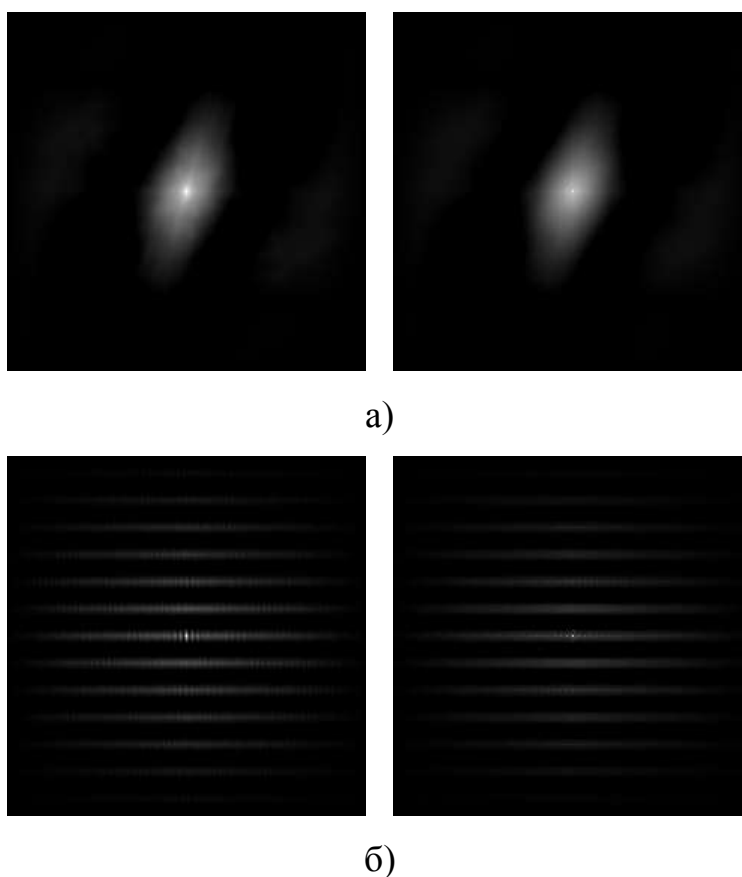


Рисунок 5.25 – Зображення автокореляційних функцій для вихідних (зліва) і пермутованих (справа) зображень: а) ‘Cameraman’, розмір блоку $b=8$; б) ‘Текст’ розмір блоку $b=4$

5.4.4 Порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних маркерів доповненої реальності

Порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних AR-маркерів – розробленого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, а також шаблонного, колового, штрих-кодowego (QR-код) маркерів і маркера-зображення [244]–[247], зведено у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Порівняльні оцінки показників якості

Показник	Теоретична оцінка	Експериментальна оцінка				
		мозаїчний стохастичний AR-маркер	шаблонний AR-маркер	коловий AR-маркер	QR-код	AR-маркер-зображення
Помітність (час у секундах τ_D виявлення тестового AR-маркера)	$<1/30$	$<1/30$	$<1/30$	$<1/30$	$<3/30$	$<5/30$
Простота (кількість кольорів n_c , що необхідні для побудови маркера)	3 (бінарне зображення з проміжним кольором)	3 (бінарне зображення з проміжним кольором)	2 (бінарне зображення)	2 (бінарне зображення)	2 (бінарне зображення)	3x256 (кольорове зображення)
Інформативність (середня ентропія повідомлення e_m у бітах/піксел)	$1/k^2$	1/9	0	~ 0	$\sim 1/2$	0
Орієнтованість (можливість визначення положення камери по зображенню маркера)	+	+	+	+	+	+
Робастність (кількість помилково декодованих бітів повідомлення n_e при $q \leq 1/2$)	$n_e < 1$	~ 0	-	-	$\sim 2-3$	-

Закінчення табл. 5.9

Криптостійкість (середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації)	$n_p = (b^2)!$	$n_p \sim 64!$	-	-	-	-
Універсальність (кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR- маркера)	~ 1	~ 1	~ 1	~ 1	~ 10	~ 100

Примітка 1. Оцінка помітності (як середній час детектування тестових AR-маркерів в однакових умовах спостереження, сек) знаходилася для смартфона Nokia 6 Plus (операційна система Android 9), при створенні тестової аплікації використовувалась бібліотека обробки зображень OpenCV 4.1.1 [247]; час вимірювався у кадрах при задані частоті кадрів 30 Гц.

Примітка 2. Оцінка інформативності QR-коду залежить від заданого рівня надлишковості, що використовується при його створенні і площі синхронізаційних областей, які не використовуються при кодуванні повідомлення.

Примітка 3. Всі оцінки інформативності і робастності розраховувались для значення коефіцієнта масштабування $k=3$, при якому, як показано у п. 4.6.5, для мозаїчних стохастичних AR-маркерів повідомлення гарантовано відновлюється при втраті до 1/2 площі маркера.

Примітка 4. Оцінка криптостійкості для розміру блоку пермутації b буде $n_p = (b^2)!$, якщо виконується умова (4.49). Якщо умова (4.49) не виконується, то $n_p \sim \log(b^2!)$. Для типових бінарних зображень значення значення пермутаційного радіусу $r_p \sim 1$, а процедура масштабування

методом найближчого сусіда збільшує пермутаційний радіус у k разів (див. [103]), отже $r_p \sim k$. Для значення $k=3$ і типового значення розміру блоку пермутації $b=8$ умова (4.49) очевидно виконується.

Висновки до розділу 5

1. Удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

2. При виконанні дисертаційної роботи використовувались такі припущення і обмеження:

1) розглядаються тільки оптико-електронні зображення;

2) фізичний розмір маркера:

– мінімальний фізичний розмір AR-маркера 21×21 мм (AR-маркер розміром 63×63 клітинки, розмір клітинки 8×8 , віддруковано на принтері з роздільною здатністю 600 dpi);

3) умови зйомки і розташування маркера:

– при зйомці AR-маркер займає приблизно $1/9$ загальної площі зображенні і знаходиться у його центрі;

– мінімальна роздільна здатність камери 8МП (при цьому 1 пікселю надрукованого зображення буде відповідати $\sqrt{1/9 \cdot 8 \cdot 10^6} / (63 \cdot 8) \sim 2$ пікселя сфотографованого зображення, що гарантує розділюваність клітинок);

– кут повороту AR-маркера відносно камери не більше $\pm 45^\circ$ (інакше буде порушено орієнтованість маркера – результатом роботи алгоритмів декодування буде транспонована бітова матриця, що не дасть можливості правильно застосувати інверсну перестановку; в принципі цю проблему можна вирішити послідовним перебором всіх орієнтацій матриці $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ з вибором правильної за критерієм мінімуму цільової функції від інверсно-перматованого зображення, але в рамках цієї роботи було прийнято, що маркер є правильно орієнтованим);

– зйомка проводиться у звичайних умовах освітлення (як денного, так і штучного);

– зображення знаходиться у фокусі і рух камери незначний, що дозволяє не враховувати змаз;

– кут між площинами маркера і камери не більше $\pm 30^\circ$;

4) характер завад:

– завадами закрито не більше $1/2$ площі маркера;

– завада повинна бути такою, щоб маска маркера була однозв'язною (якщо маска маркера розпадається на декілька незв'язних областей, то запропоновані алгоритми визначення кількості рядків/стовпців будуть повертати некоректне значення).

3. Наведено умови створення та опис умов основних експериментів по використанню стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, показано набір 12 вихідних зображень, що використовувались для експериментів.

4. Наведено результати декодування повідомлення, показано, що всі 8 зображень AR-маркера, де закодовано повідомлення 'Hello, world!', декодовано абсолютно правильно, рівень помилок – 0.

Вказано, що всі 4 зображення AR-маркера де закодовано повідомлення 'FpyrF_Ci2TQ', в основному декодовано правильно: 2 зображення мають рівень помилок – 0; 1 зображення – 1 помилка; 1 зображення – 6 помилок.

Зауважено, що в останньому випадку площа завади більша за 50% зображення маркера, тим не менш QR-код декодується правильно, оскільки має власну надлишковість (використовуються коди Ріда-Соломона), додатковим фактором є те, що 3 помилки попали в область синхронізаційних маркерів, що не впливає на якість декодування.

Константовано, що в результаті всі 12 QR-кодів декодовано абсолютно правильно.

5. Розраховано для заданого рівня надійності $\gamma = 0.95$ довірчі інтервали для середніх різниць між порахованими теоретично імовірностями та оцінками імовірностей, що отримані в результаті симуляції. Вказано, що оскільки довірчі інтервали (5.2)–(5.3) для середніх відхілень між теоретичними та емпіричними імовірностями симетричні відносно нульового значення, то це означає що теоретичні та емпіричні дані добре узгоджуються між собою..

6. Наведено результати проєціювання тестового 3d-об'єкта ("чайник") на площину AR-маркера при використанні запропонованих у роботі точних методів калібрування і проєціювання; вказано, що всі 12 AR-маркерів незалежно від рівня завад і умов зйомки дозволяють правильно використовувати спрощений метод проєціювання тестового 3d-об'єкта ("чайник") на площину AR-маркера.

Зауважено, що в більшості випадків умови зйомки відповідають умові використання спрощеного методу – кут між площиною камери і площиною AR-маркера є порівняно малим.

6. Наведено результати рендерингу відео-потoku в області AR-маркера; вказано, що 4 всі AR-маркери (в яких закодовано адресу відео) незалежно від рівня завад і умов зйомки дозволяють:

- правильно декодувати url-адресу і відкрити відео-файл;
- правильно визначити параметри проєктивного перетворення і вивести кожен кадр в області AR-маркера.

7. Досліджено вплив шуму різного типу на точність декодування

повідомлення, показано, що запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер завжди дає найкращі результати; модельний AR-маркер QR-код (1x9) для протяжних завад дає кількість помилок, що співпадає з розміром завади; модельний AR-маркер QR-код (3x3) за умови спеціального типу обробки (що має лише академічний інтерес у зв'язку із складністю його реалізації) дає 1-2 помилки для всіх типів завад.

Підкреслено, що властивість стохастичності є суттєвою для робастності AR-маркерів, оскільки будь-який тип завад зводиться до завад типу імпульсних, що дозволяє ефективно і уніфіковано декодувати зображення.

8. Проведено порівняння результатів теоретичних розрахунків та експериментального дослідження розподілів імовірності правильного декодування в залежності від імовірності помилки і пропуску даних; показано добре співпадіння теоретичних і експериментальних даних (довірча імовірність складає $\approx 0,98$).

9. Експериментально доведено для двох модельних зображень, що у випадку, коли розмір блоку перестановки менший за пермутаційний радіус, то існує ефективний спосіб знаходження інверсних блочних перестановок без використання додаткової апріорної інформації за допомогою генетичних алгоритмів.

10. Наведено порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних AR-маркерів – розробленого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, а також шаблонного, колового, штрих-кодового маркерів і маркера-зображення.

Встановлено, що розроблений мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності має такі показники якості:

- час виявлення $\tau_D < 1/30$ сек, що в 3 рази менше, ніж час виявлення QR-кодів і приблизно у 5 разів менше ніж для маркерів-зображень;
- кількість кольорів, що необхідні для побудови маркера, $n_c = 3$ – бінарне зображення і додатковий проміжний колір;

– середня ентропія повідомлення що закодована в ньому, за побудовою складає $e_m = 1/9$ біт/піксел, що приблизно у 4,5 разів менше за інформативність QR-кодів і приблизно у 50 разів більше ніж у колових маркерів, у решта маркерів інформативність – 0;

– кількість помилково декодованих бітів повідомлення $p_e < 1$ при $q \leq 1/2$, для QR-кодів $p_e > 1$, для решта маркерів робастність – 0;

– існує можливість визначення положення камери по зображенню маркера;

– середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації, $p_p = 63^2$! при розмірі блоку рівним розміру зображення, для решта маркерів криптостійкість 0;

кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера ~ 1 , в той час, як для QR-кодів ~ 10 , для маркерів-зображень ~ 100 .

Список використаних джерел у розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами роботах [74]–[79], [82]–[86], [90]–[91], [101], [236], [238]–[247].

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота має теоретичне значення та містить нові науково-обґрунтовані результати, які розв'язують актуальну наукову проблему розробки теоретичних основ створення моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації, що має істотне значення в галузі технічних наук.

В результаті проведення дослідження отримано такі наукові і практичні результати.

1. Проведено критичний аналіз існуючих моделей, методів та інформаційних технологій доповненої реальності, визначено основні галузі їх застосування; встановлено, що найбільш перспективними з точки зору застосування є маркерні системи доповненої реальності. Встановлено основні особливості застосування та сформульовано основні вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності.

2. Отримали подальший розвиток теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, які, на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного формування, перетворення та декодування візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем доповненої реальності.

3. Удосконалено модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

4. Вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних

маркерів доповненої реальності та метод їх формування, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності.

5. Вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення.

6. Вперше розроблено метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера.

7. Вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію перматованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації.

8. Отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по

наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потоків в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення.

9. Удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

10. Впровадження розроблених у дисертаційній роботі моделей і методів в модернізацію існуючих і розробку перспективних систем доповненої реальності дозволить забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій та систем доповненої реальності шляхом побудови та використання мозаїчних стохастичних маркерів.

11. Наведено порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних AR-маркерів – розробленого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, а також шаблонного, колового, штрих-кодового маркерів і маркера-зображення.

Встановлено, що розроблений мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності має такі показники якості:

- час виявлення $\tau_D < 1/30$ сек, що в 3 рази менше, ніж час виявлення QR-кодів і приблизно у 5 разів менше ніж для маркерів-зображень;
- кількість кольорів, що необхідні для побудови маркера, $n_c = 3$ – бінарне зображення і додатковий проміжний колір;
- середня ентропія повідомлення що закодована в ньому, за побудовою складає $e_m = 1/9$ біт/піксел, що приблизно у 4,5 разів менше за інформативність QR-кодів і приблизно у 50 разів більше ніж у колових маркерів, у решта маркерів інформативність – 0;

- кількість помилково декодованих бітів повідомлення $p_e < 1$ при $q \leq 1/2$, для QR-кодів $p_e > 1$, для решта маркерів робастність – 0;
- існує можливість визначення положення камери по зображенню маркера;
- середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації, $p_p = 63^2$! при розмірі блоку рівним розміру зображення, для решта маркерів криптостійкість 0;
- кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера ~ 1 , в той час, як для QR-кодів ~ 10 , для маркерів-зображень ~ 100 .

12. Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у розробці інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності, автоматизації процесу побудови візуальних об'єктів в існуючих та перспективних інформаційних системах доповненої реальності. Практичні результати, що отримано, підтверджені актами реалізації та впровадження та доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи, високу якість розроблених моделей та методів. Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані:

- у військовій частині А2667, м. Київ;
- в приватному акціонерному товаристві "Авікос", м. Львів;
- в Державному підприємстві "Центр державного земельного кадастру" Державного агентства земельних ресурсів України, м. Київ;
- в Національному центрі управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, м. Київ;
- в освітньому процесі Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків.

13. На користь обґрунтованості до достовірності наукових

результатів дисертаційної роботи свідчать такі фактори:

– використання в роботі теоретично-обґрунтованих та апробованих на практиці математичних методів порівняння зображень, методів цифрової обробки зображень, комп'ютерного зору, методів теорії категорій, методів теорії ймовірності, комбінаторики, математичного моделювання, математичної логіки, створення інформаційних технологій, методів теорії оптимізації, методів теорії матриць, аналітичної геометрії, методів теорії груп, кластеризації даних;

– добре співпадіння (довірча імовірність 0,95) теоретичних розрахунків та експериментальних результатів, отриманих при побудові та використанні мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– залучення широкої наукової громадськості до апробації наукових результатів на представницьких наукових форумах, їх публікація у визнаних фахових наукових виданнях.

14. Наукове значення роботи полягає у подальшому розвитку теорії обробки цифрових зображень та комп'ютерного зору у напрямку забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності шляхом побудови та використання мозаїчних стохастичних маркерів.

15. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати можуть бути використані: в організаціях, що є замовниками науково-технічної продукції, в науково-дослідних організаціях при обґрунтуванні технічних вимог до перспективних систем обробки зображень та комп'ютерного зору; в науково-виробничих організаціях промисловості при проектуванні та розробці нових систем і комплексів обробки зображень та комп'ютерного зору; у вищих навчальних закладах, що займаються підготовкою фахівців з обробки зображень та комп'ютерного зору.

16. Подальші дослідження рекомендовано продовжити у напрямку узагальнення розроблених моделей і методів побудови і використання візуальних інформаційних структур для вирішення завдань стеганографії, цифрових "водяних знаків" та матричних кодів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Доповнена реальність або AR-технології [Електронний ресурс]. URL: <http://thefuture.news/lessons/ua/ar>. (Дата звернення: 20.12.2019).
2. Иванова А. В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения. *Стратегические решения и риск-менеджмент*. 2018. № 3 (106). С. 88–107.
3. Kaiser R., Schatsky D. For more companies, new ways of seeing. Momentum is building for augmented and virtual reality in the enterprise. Deloitte University Press. [Electronic resource]. URL: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3768_Signals-for-Strategists_Apr2017/DUP_Signals-for-Strategists_Apr-2017.pdf. (Дата звернення: 12.11.2019).
4. 3D Global Estimation and Augmented Reality Visualization of Intra-operative X-ray Dose on YouTube [Electronic resource]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pINE2gaOVOY>. (Дата звернення: 13.10.2019).
5. Augmented Reality and Virtual Reality Market by Offering (Hardware & Software), Device Type (HMD, HUD, Handheld Device, Gesture Tracking), Application (Enterprise, Consumer, Commercial, Healthcare, Automotive), and Geography – Global Forecast to 2023. *Markets and Markets*. 2018. [Electronic resource]. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/augmented-reality-virtual-reality-market-1185.html>. (Дата звернення: 11.12.2018).
6. Мировой рынок AR/VR в 2018 году вырастет до 18 млрд долл. *Computerworld Россия*. № 19. 2017. [Electronic resource]. URL: <https://www.osp.ru/cw/2017/19/13053468>. (Дата звернення: 01.10.2018).
7. Augmented Reality Trends to Watch in 2020: The Future Is Here.

[Електронний ресурс]. URL: <https://mobidev.biz/blog/augmented-reality-future-trends-2018-2020>. (Дата звернення: 05.12.2019).

8. Освіта, медицина та суд: 6 неочікуваних сфер для використання VR-технології [Електронний ресурс]. URL: <https://impactlab.media/2019/04/10/vikoristannya-vr-tehnologiyi/>. (Дата звернення: 18.10.2019).

9. Thomas D. J. Augmented reality in surgery: The Computer-Aided Medicine revolution. *International Journal of Surgery*. 2016. Vol. 36 (A). 25 p. doi:10.1016/j.ijssu.2016.10.003.

10. Cui N., Kharel P., Gruev V. Augmented reality with Microsoft Holo Lens holograms for near infrared fluorescence based image guided surgery. *Molecular-Guided Surgery: Molecules, Devices, and Applications III. International Society for Optics and Photonics*. 2017. Vol. 10049. P. 100490I. doi:10.1117/12.2251625.

11. Barsom E.Z., Graafland M., Schijven M.P. Systematic review on the effectiveness of augmented reality applications in medical training. *Surgical Endoscopy*. 2016. № 30. P. 4174–4183.

12. Magee D., Zhu Y., Ratnalingam R., Gardner P., Kessel D. An augmented reality simulator for ultrasound guided needle placement training. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2007. № 45. P. 957–967.

13. Akçayır M., Akçayır G. Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*. 2017. № 20. P. 1–11. doi:10.1016/j.edurev.2016.11.002.

14. HealthiAR [Electronic resource]. URL: <https://healthiar.com/>. (Дата звернення: 28.12.2019).

15. Kapanu A. G. [Electronic resource]. URL: <https://ethz.ch/en/industry-and-society/entrepreneurship/spin-offs/exits/kapanu.html>. (Дата звернення: 13.11.2019).

16. Shape and Ivoclar Vivadent take orthodontic treatment simulation and

smile design to the next level with AR technology [Electronic resource]. URL: <https://www.3shape.com/en/press/2019/3shape-and-ivoclar-vivadent-take-orthodontic-treatment-simulation-and-smile-design>. (Дата звернення: 01.12.2019).

17. Marr B. The 5 Biggest Virtual And Augmented Reality Trends In 2020 Everyone Should Know About. [Electronic resource]. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2020/01/24/the-5-biggest-virtual-and-augmented-reality-trends-in-2020-everyone-should-know-about/#4fa9bc1e24a8>. (Дата звернення: 25.01.2020).

18. Goldman Sachs. Global Investment Research [Electronic resource]. URL: <https://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research/>. (Дата звернення: 10.12.2019).

19. Adobe Blog. The 10 VR Trends We'll See in 2018 [Electronic resource]. URL: <https://theblog.adobe.com/10-vrtrends-well-see-2018/>. (Дата звернення: 23.06.2018).

20. Facebook Research. AR/VR-Facebook Research [Electronic resource]. URL: <https://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

21. Mobile Augmented Reality in 2019 [Electronic resource]. URL: https://medium.com/@the_manifest/mobile-augmented-reality-in-2019-6a4f687f900. (Дата звернення: 06.11.2019).

22. Жулин А.Г., Манжикова С.Ц. Структура и алгоритмы систем дополненной реальности на основе маркера. *Вестник КPCУ*. 2018. Т. 18. № 4. С. 58–62.

23. QR Code features. Denso-Wave. [Electronic resource]. URL: <https://www.qrcode.com>. (Дата звернення: 23.10.2019).

24. Caudell T.P., Mizell D.W. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, 1992. Vol. 2. P. 659–

669.

25. Best Augmented Reality apps & VR Games on Android [Electronic resource]. URL: <http://getandroidstuff.com/best-augmented-reality-apps-vr-games-android/>. (Дата звернення: 17.11.2019).

26. What is markerless Augmented Reality? [Electronic resource]. URL: <https://www.marxentlabs.com/what-is-markerless-augmented-reality-dead-reckoning/>. (Дата звернення: 29.12.2019).

27. Siltanen S. Theory and applications of marker-based augmented reality. Espoo 2012. VTT Science 3. 198 p. + app. 43 p.

28. Zhang X., Fronz S., Navab N. Visual Marker Detection and Decoding in AR Systems: A Comparative Study. *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 2002. P. 1–7.

29. Otsuka K. QR Code reader example [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71090-qr-code-reader-example>. (Дата звернення: 23.01.2020).

30. Object Detection in a Cluttered Scene Using Point Feature Matching [Electronic resource].

URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/examples/object-detection-in-a-cluttered-scene-using-point-feature-matching.html>. (Дата звернення: 29.01.2020).

31. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Москва: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.

32. Canny J.F. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. № 8. P. 679–698.

33. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. Пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 336 с.

34. Методы компьютерной обработки изображений: Сойфер В.А. (ред.). Москва: Физматлит, 2003. 784 с.

35. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2005. 1072 с.
36. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. Москва: Радио и связь, 1987. 296 с.
37. Новейшие методы обработки изображений / [А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман] под ред. А.А. Потапова. Москва: Физматлит, 2008. 456 с.
38. Л. Шапиро, Дж. Стокман. Компьютерное зрение. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
39. Дэвид Форсайт, Жан Понс. Компьютерное зрение. Современный подход. Москва: Вильямс, 2004. 928 с.
40. Лукьяница А.А., Шишкин А.Г. Цифровая обработка видеоизображений. Москва: Ай-Эс-Эс Пресс, 2009. 518 с.
41. Желтов С.Ю. и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. Москва: Физматкнига, 2010. 672 с.
42. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd ed.). UK: Cambridge University Press, 2003. 670 p.
43. Bruckstein A.M. Holographic image representations: the subsampling method. *IEEE International Conference on Image Processing*. 1997. № 1. P. 177–180.
44. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. Holographic representation of images. *IEEE Transactions on Image Processing*. 1998. № 7. P. 1583–1587.
45. Марковский А.В. О квазиголографическом кодировании цифровых изображений. *Автоматика и телемеханика*. 2001. № 10. С. 163–173.
46. Кузнецов О.П., Марковский А.В. Квазиголографический подход к кодированию графической информации. *Искусственный интеллект*. 2002. № 2. С. 474–482.

47. Dovgard R. Holographic image representation with reduced aliasing and noise effects. *Image Processing, IEEE Transactions*. 2004. № 13 (7). P. 867–872.

48. Урывская Д.А. Разработка и применение псевдоголографических разверток цифровых изображений: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева. Самара, 2016, 16 с.

49. Milgram P., Kishino A.F. Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 1994. E77-D(12). P. 1321–1329.

50. Azuma R. A. Survey of Augmented Reality. *In Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997. № 4. P. 355–385.

51. B. Jacobs. Categorical Logic and Type Theory, Studies in Logic and the Foundations of Mathematics 141, North Holland, Elsevier, 1999. ISBN 0-444-50170-3

52. Ковалёв С. П. Теория категорий как математическая прагматика модельно-ориентированной системной инженерии. *Информатика и её применения*. 2018. Т. 12. Вып. 1. С. 95–104

53. Субботин С.А., Олейник Ан.А., Гофман Е.А., Зайцев С.А., Олейник Ал.А. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов: монография. Харьков: ООО "Компания Смит", 2012. 317 с.

54. Суботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375 с.

55. Махно Т.А. Автоматизированная система обработки ультразвуковых изображений сонных артерий на основе эволюционных алгоритмов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 18 (94). С. 92–99.

56. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. Москва: Физматлит, 2012. 260 с.

57. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Муравьиные алгоритмы для решения транспортных задач. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2010. № 1. С. 32–45.

58. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Концепция эволюционных вычислений инспирированных природными вычислениями. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009. № 4 (93). С. 16–24.

59. Пантелеев А. В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. Москва: МАИ, 2009. 160 с.

60. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А. Методы глобальной оптимизации: метаэвристические стратегии и алгоритмы. Москва: Вузовская книга, 2013. 244 с.

61. Рубан И.В. Научно-методические основы создания информационной технологии целенаправленного поиска объектов и обработки изображений: дис. ... д-ра техн. наук / Харьковский университет Воздушных сил им. Ивана Кожедуба. Харьков, 2008. 395 с.

62. Ruban I.V. An approach to cyber security support. *Системи обробки інформації*. 2015. № 11. С. 6–8.

63. Bolohova N., Ruban I. Image processing models and methods research and ways of improving marker recognition technologies in added reality systems. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 1. С. 25–33.

64. Смеляков К.С. Модели и методы сегментации изображений объектов нерегулярного вида для автономных систем технического зрения: дис. ... д-ра техн. наук / Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна. Харків, 2012. 306 с.

65. Mashtalir S., Mashtalir V. Sequential temporal video segmentation via

spatial image partitions. *IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. 2016. P. 239–242.

66. Mashtalir S., Mashtalir V., Stolbovyi M. Representative Based Clustering of Long Multivariate Sequences with Different Lengths. *IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. 2018. P. 545–548.

67. Машталир С.В. Модели и методы темпоральной обработки видео для информационного поиска: дис. ... д-ра техн. наук / Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2016. 341 с.

68. Putyatin Y.P., Lyashenko V.V., Ahmad M.A., Lyubchenko V.A., Ahmad N.A. A Theoretical Interpretation for the Study of Images Processing. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*. 2015. № 3 (9). P. 17–31.

69. Гороховатський В. О. Структурно-ієрархічні методи аналізу та розпізнавання зображень в умовах впливу просторових завад: дис. ... д-ра техн. наук / Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2010. 337 с.

70. Богучарский С. И. Методы и модели толерантной кластеризации в коллекциях изображений: дис. ... канд. техн. наук / Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2016. 149 с.

71. Філатов В. О. Мультиагентні технології інтеграції гетерогенних інформаційних систем і розподілених баз даних: автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2004. 32 с.

72. Ткачук М. В. Моделі, методи та інформаційні технології адаптивної розробки та реінжинірингу інформаційно-управляючих систем: автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". Харків, 2006. 36 с.

73. Худов В. Г. Методи тематичного сегментування зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження на основі мурашиних алгоритмів: дис. ... канд. техн. наук / Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2019. 331 с.

74. Маковейчук О. М. Інформаційна технологія побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 4 (10). С. 55–68.

75. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. № 3 (3). С. 43–48.

76. Маковейчук О. М. Метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера без врахування додаткової апіорної інформації. *Системи обробки інформації*. 2019. № 6 (3). С. 43–48.

77. Маковейчук О. М. Науково-прикладні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 6 (44). С. 133–137.

78. Маковейчук О. М. Метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. № 4 (4). С. 43–48.

79. Маковейчук О. М. Метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 6 (44). С. 133–137.

80. Бутко І. М., Маковейчук О. М. Визначення джерел лісових пожеж за супутниковими знімками. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.3. С. 80–84.

81. Маковейчук А. Н., Бутко І. Н., Жуйков Д. Б., Худов Г. В. Аналіз показателів оцінки якості обробки зображень фрактальним методом при впливі протяжених маскувальних перешкод. *Системи обробки*

інформації. 2012. № 7 (105). С. 104–108.

82. Пелешко Д., Маковейчук О., Ковальчук А., Клювак А. Усунення динамічних часткових спотворень для відтворення зображень на основі інтегрально-диференціального підходу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 751. С. 320–332.

83. Павлій В. О., Маковейчук О. М., Худов Г. В. Показники ефективності відновлення дефокусованих оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені змазом. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*. 2013. № 3 (66). С. 106–113.

84. Худов В. Г., Маковейчук О. М. Генетичні алгоритми для сегментування зображень систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 2 (23). С. 142–145.

85. Худов В. Г., Кучук Г. А., Маковейчук О. М., Крижний А. В. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи обробки інформації*. 2016. № 9 (146). С. 77–80.

86. Клювак А., Пелешко Д., Маковейчук О., Ізонін І. Двоетапне сегментування зображення із складним фоном на основі методу Отсу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2016. № 843. С. 335–341.

87. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості еволюційного методу сегментування зображення, що отримано з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 4 (44). С. 133–137.

88. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості сегментування оптико-електронного зображення шляхом оцінки комплексних

показників та відстані Кульбака-Лейблера. *Системи обробки інформації*. 2017. № 4 (150). С. 27–30.

89. Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109904>.

90. Ruban I.V., Khudov V.G., Khizhnyak I.A., Makoveichuk O.M. Segmentation of multiple image sequences, which obtained from optoelectronic observations of the aircraft. *News of Science and Education*. 2017. № 5 (53). P. 103–110.

91. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Рубан І.В., Худов Г.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 1 (47). С. 146–152.

92. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г., Подліпаєв В.О., Горбань Г.В., Худов Г.В. Метод ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (АВС)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 2 (48). С. 91–96.

93. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Інформаційна ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 3 (49). С. 26–32.

94. Хижняк І.А., Худов Г.В., Рубан І.В., Маковейчук О.М., Соломоненко Ю.С., Худов В.Г. Метод тематичного сегментування кольорового зображення бортової системи оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 5 (51). С. 13–19.

95. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Худов Р.Г. Цільова функція методу тематичного сегментування зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 4 (33). С. 36–42.

96. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод визначення об'єктів міської забудови на зображеннях бортових систем оптико-електронного спостереження з використанням перетворення Хафа. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 6 (52). С. 20–24.

97. Худов Г.В., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Ройовий метод тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу. *Екологічні науки*. 2018. № 4 (23). С. 24–28.

98. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Khudov V., Podlipaiev V., Shumeiko V., Atrasevych O., Nikitin A., Khudov R. Segmentation of optical-electronic images from on-board systems of remote sensing of the Earth by the artificial bee colony method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/9 (98). P. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161860>.

99. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Березіна С.І., Соломоненко Ю.С. Метод багатомасштабного оброблення зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження для визначення елементів міської інфраструктури. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 3 (55). С. 3–7.

100. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Lukova-Chuiko N., Pevtsov G., Sheviakov Y., Yuzova I., Drob Y., Tytarenko O. Method for determining elements of urban infrastructure objects based on the results from air monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/9 (100). P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174576>.

101. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56). С. 72–81.

102. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Chomik M., Khudov V., Khizhnyak I., Podlipaiev V., Sheviakov Y., Baranik O., Irkha A. Construction of methods for determining the contours of objects of tonal aerospace images based on the ant algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9 (101). P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.177817>.

103. Khudov H., Ruban I., Makoveichuk O., Pevtsov H., Khudov V., Khizhnyak I., Fryz S., Podlipaiev V., Polonskyi Y, Khudov R. Development of methods for determining the contours of objects for a complex structured color image based on the ant colony optimization algorithm. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. № 1, P. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001108>.

104. Павлий В. А., Маковейчук А. Н., Худов Г. В. Функция размытия точки оптико-электронных изображений при смазе и дефокусировке, обусловленных неоднородностью атмосферы. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2013. № 4 (37). С. 75–78.

105. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Жуйков Д.Б. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах впливу маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 8 наук. конф. (Харків, 18–19 квіт. 2012). Харків: ХУПС, 2012. С. 315.

106. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Бутко І.М., Жуйков Д.Б. Методи захисту зображень технічних систем розвідки і спостереження від дії маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 9 наук. конф. (Харків, 17–18 квіт. 2013). Харків: ХУПС, 2013. С. 325.

107. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Павлій В.О., Подліпаєв В.О. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазу. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 11 наук. конф. (Харків, 08–09 квіт. 2015). Харків: ХУПС, 2015. С. 363.

108. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Кухарський І.А., Худов Р.Г. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 14 наук. конф. (Харків, 11–12 квіт. 2018). Харків: ХНУПС, 2018. С. 469–470.

109. Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Худов Г.В. Двоетапний метод визначення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях з використанням перетворення Хафа. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 15 Міжнар. наук. конф. (Харків, 10–11 квіт. 2019). Харків: ХНУПС, 2019. С. 525.

110. Izonin I., Malets I., Makoveichuk O., Peleshko D., Ivanov Y., Batyuk D., Lotoshunkska N. Adaptive Moving Object Segmentation Algorithms in Cluttered Environments. *Proceeding in 13 International scient.-pract. confer Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. 2015. P. 97–99. DOI: 10.1109/CADSM.2015.7230806.

111. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Сердюк О.В. Мультиагентний метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО*: Тези допов. IX наук.-практ. конф. (Київ, 25 листопада 2016). Київ: ВІТІ, 2016. С. 194.

112. Хижняк І.А., Сердюк О.В., Маковейчук О.М. Ройовий метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-

електронного спостереження. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах*: Тези допов. 17 наук.-техн. конф. (Чернігів, 7-8 вересня 2017). Чернігів: ДНДІ ОВТ, 2017. С. 369–370.

113. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Хижняк І.А. Удосконалений еволюційний метод сегментування багатомасштабної послідовності зображень, отриманих з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи*: Тези допов. четвертої Всеукр. наук.-практ. конф. (Одеса 7–8 вересня 2017). Одеса: Військова академія, НА ДПС України, 2017. С. 172–173.

114. Бутко І., Маковейчук О., Медвецька Т. Використання даних дистанційного зондування для контролю за станом земель запасу та резервного фонду. *Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law*: Збірник міжнар. наук. праць (Словаччина-Чехія-Чернігів, 24-28 квітня 2018). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 131–134.

115. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Тематичне сегментування оптико-електронного зображення методом ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії (АВС)). *Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції*: Тези допов. XXII Всеукр. наук.-практ. конф. (Житомир, 26–27 квітня 2018). Житомир: ЖВІ, 2018. С. 251–252.

116. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Сердюк О.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 17-18 травня 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 241.

117. Рубан І.В., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Генетичні методи

обробки зображень в системах доповненої реальності військового призначення. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 16-17 травня 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 256.

118. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Подліпаєв В.О. Інформаційна технологія тематичного сегментування тонових та кольорових зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. восьмої Міжнар. наук.-техн. конф. (Полтава, Баку, Харків, Жиліна, 26–27 квітня 2018). Полтава: ПНТУ; Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2018. С. 58.

119. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Двоетапний метод виявлення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. дев'ятої Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку, Харків, Жиліна, 11–12 квітня 2019). Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2019. С. 12.

120. Ruban I., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I. A swarm method for segmentation of images obtained from on-board optoelectronic surveillance systems. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 5th International scientific-practical conference (Kharkiv, October, 9–12, 2018). Kharkiv: IEEE, 2018. P. 613–618. DOI: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632045>.

121. Ruban I., Makoveichuk O., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I., Yuzova I., Drob Y. The Method for Selecting the Urban Infrastructure Objects Contours. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of

6th International scientific-practical conference (Kiev, October, 8–11, 2019). Kiev: IEEE, 2019. P. 689–693. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061267.

122. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В., Худов Р.Г., Сердюк О.В. Метод тематичного сегментування оптико-електронних зображень. *Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів: Тези допов. XXII Всеукр.наук.-практ.конф. (Житомир, 1–2 лист. 2018). ЖВІ, 2018. С. 164–168.*

123. Худов Г.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М. Метод обробки багатомасштабної послідовності зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 15 листопада 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 159.*

124. Худов Г.В., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г. Застосування алгоритмів ройового інтелекту для вирішення задачі сегментування аерокосмічних зображень. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 14-15 листопада 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 209–210.*

125. Худов Г.В., Хижняк І.А., Подліпаєв В.О., Худов Р.Г. Удосконалений метод обробки багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: Thesis of International scientific and practical conference (Wloclawek, Republic of Poland, December, 21-22, 2018). Wloclawek: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2018. P. 29–32.*

126. Khudov H., Pavlii V, Khizhnyak I., Makoveichuk O., Khudov R. Image segmentation method for onboard environmental monitoring systems. *Science, Research, Development # 14. Technics and Technology: Thesis of International scientific and practical conference (London, February, 27-28, 2019). London, 2019.*

Р. 23–25.

127. Рубан І.В., Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод визначення контурів елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях бортових систем. *Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: Тези допов. третьої Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 23-24 квітня 2019)*. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 20–21.

128. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод виявлення об'єктів міської інфраструктури на багатомасштабній послідовності зображень з бортових систем дистанційного зондування Землі. *Наукоємні технології в інфокомунікаціях (НІСТ'2019): Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, Кам'янець-Подільський, 23-25 травня 2019)*. Харків: ХНУПС, ХНУРЕ; Кам'янець-Подільський: Кам.-Поділ. нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2019. С. 93–94.

129. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Рубан І.В. Метод визначення інверсних псевдовипадкових блочних перестановок на основі генетичних алгоритмів. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: Тези допов. VII наук.-техн. конф. (Київ, 09-10 жовтня 2019)*. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2019. С. 413–414.

130. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод виявлення об'єктів інтересу на зображеннях з безпілотних літальних апаратів в інтересах охорони державного кордону. *Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Хмельницький, 22 листопада 2019)*. Хмельницький: Нац. академія держ. прикор. служби ім. Б. Хмельницького, 2019. С. 828–829.

131. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Новий тип маркерів

доповненої реальності. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил*: Тези допов. XII наук.-практ. конф. (Київ, 14-15 листопада 2019). Київ: ВІТІ, Київ, 2019. С. 189–190.

132. Маковейчук О.М. Знаходження інверсних блочних перестановок в задачах комп'ютерного зору. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики АРАМС-2019*: Тези допов. XXV Всеукр. наук. конф. (Львів, 24–27 вересня 2019). Львів: Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2019. С. 102–105.

133. Ruban I., Khudov H., Makoveychuk O., Khizhnyak I., Khudov V., and Lishchenko V. The model and the method for forming a mosaic sustainable marker of augmented reality. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET)*: Thesis of 2020 IEEE 15th International Conference (Slavske, February 25–29, 2020). Slavske: IEEE, 2020. P. 402–406. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235463>.

134. Методи, системи і засоби криптографічного захисту інформації з гарантованим рівнем стійкості та підвищеною швидкістю: Звіт про НДР (№ ДР 0115U002431) (остаточний). Харків: ХНУРЕ, 2017. 473 с.

135. Створення програмного модуля обробки різнорідних і різночасових даних, отриманих від оптико-електронних засобів безпілотних літальних апаратів та супутникових систем: Звіт про НДР "Мозаїка-ПС" (№ ДР 0101U002020) (проміжний). Харків: ХНУПС, 2016. 190 с.

136. Створення програмного модуля обробки різнорідних і різночасових даних, отриманих від оптико-електронних засобів безпілотних літальних апаратів та супутникових систем: Звіт про НДР "Мозаїка-ПС" (№ ДР 0101U002020) (остаточний). Харків: ХНУПС, 2017. 177 с.

137. Розробка моделей, механізмів, методів та засобів симетричного шифрування та гешування, методи оцінювання їх стійкості: Звіт про НДР "Стійкість" (№ ДР 0118U003807) (остаточний). Харків: ХНУРЕ, 2018. 129 с.

138. The Lengthy History of Augmented Reality. Huffington Post. 15 May 2016.138.

139. Schueffel P. The Concise Fintech Compendium. Fribourg: School of Management Fribourg, Switzerland, 2017. 43 p.

140. Ткачук М. В. Алгоритмічна модель адаптивного управління ресурсами мобільної системи доповненої реальності / М. В. Ткачук, О. В. Векшин, Д. М. Місюта // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 12. – С. 151-155. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_12_37.

141. GSMArena.com – mobile phone reviews, news, specifications [Electronic resource]. URL: <https://www.gsmarena.com/compare.php3?idPhone1=9535&idPhone2=9848> (Дата звернення: 01.09.2020).

142. Pokemon GO [Electronic resource]. URL: <https://www.pokemongo.com/en-us/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

143. Titans of Space [Electronic resource]. URL: <http://www.titansofspacevr.com>. (Дата звернення: 19.01.2020).

144. Crayola Color Alive [Electronic resource]. URL: <https://www.crayola.com/splash/products/coloralive>. (Дата звернення: 19.01.2020).

145. Ingress Prime [Electronic resource]. URL: <https://www.ingress.com>. (Дата звернення: 19.01.2020).

146. SpecTrek [Electronic resource]. URL: <https://www.appbrain.com/app/com.spectrekking.full>. (Дата звернення: 19.01.2020).

147. Best AR Apps for iOS [Electronic resource]. URL: <https://www.tomsguide.com/us/pictures-story/1263-best-apple-arkit-apps->

demos.html. (Дата звернення: 19.01.2020).

148. Introducing Live View, the new augmented reality feature in Google Maps [Electronic resource]. URL: <https://support.google.com/maps/thread/11554255?hl=en>. (Дата звернення: 19.01.2020).

149. Civilizations AR [Electronic resource]. URL: <https://apps.apple.com/us/app/civilisations-ar/id1350792208>. (Дата звернення: 19.01.2020).

150. Big Bang AR app – Background information [Electronic resource]. URL: <https://home.cern/resources/document/physics/big-bang-ar-app-background-information>. (Дата звернення: 19.01.2020).

151. Mondly [Electronic resource]. URL: <https://www.mondly.com/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

152. Dance Reality [Electronic resource]. URL: <https://www.dancerealityapp.com/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

153. Mobile operating system [Electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_operating_system. (Дата звернення: 19.01.2020).

154. Gartner Says Worldwide Sales of Smartphones Returned to Growth in First Quarter of 2018 [Electronic resource]. URL: <https://web.archive.org/web/20180829072934/https://www.gartner.com/newsroom/id/3876865>. (Дата звернення: 19.01.2020).

155. Healthcare planning, practice and education [Electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality#Healthcare_planning,_practice_and_education. (Дата звернення: 19.01.2020).

156. Miyake R.K., et al. Vein imaging: a new method of near infrared imaging, where a processed image is projected onto the skin for the enhancement of vein treatment. *Dermatologic Surgery*. 2006. Vol. 32 (8): P. 1031–1038.

doi:10.1111/j.1524-4725.2006.32226.x.

157. Mountney P., Giannarou S., Elson D., Yang Guang-Zhong. Optical Biopsy Mapping for Minimally Invasive Cancer Screening. *12th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 2009)*. Proc. of 2009 International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (London, September, 20–24, 2009). London: MICCAI, 2009. P. 483–490. doi:10.1007/978-3-642-04268-3_60.

158. Loy Rodas N., Padoy N. 3D Global Estimation and Augmented Reality Visualization of Intra-operative X-ray Dose. *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2014*. MICCAI 2014. Lecture Notes in Computer Science. 2014. Vol. 8673. P. 415–422. doi:10.1007/978-3-319-10404-1_52.

159. 3D Global Estimation and Augmented Reality Visualization of Intra-operative X-ray Dose on YouTube [Electronic resource]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pINE2gaOVOY>. (Дата звернення: 19.01.2020).

160. UNC Ultrasound/Medical Augmented Reality Research [Electronic resource]. URL: <http://www.cs.unc.edu/Research/us/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

161. Mountney P., Fallert J., Nicolau S., Soler L., Mewes P. W. An Augmented Reality Framework for Soft Tissue Surgery. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2014. Lecture Notes in Computer Science*. 2014. Vol. 8673. P. 423–431. doi:10.1007/978-3-319-10404-1_53.

162. Augmented Reality Revolutionizing Medicine. Health Tech Event [Електронний ресурс]. URL: <https://www.plugandplaytechcenter.com/resources/augmented-reality-healthcare/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

163. 3Shape and Ivoclar Vivadent take orthodontic treatment simulation and

smile design to the next level with AR technology [Electronic resource]. URL: <https://www.3shape.com/en/press/2019/3shape-and-ivoclar-vivadent-take-orthodontic-treatment-simulation-and-smile-design>. (Дата звернення: 19.01.2020).

164. Слюсар В.И. Персональный хаб как элемент экипировки. *Озброєння та військова техніка*. 2018. № 1 (17). С. 79–84.

165. Слюсар В.І. Концепція стандартизації тактичних засобів доповненої реальності. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 17-18 травня 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 63–64.

166. Слюсар В.І. Федеративна мережа місій як середовище поширення даних доповненої реальності. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 16-17 травня 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 174.

167. Slyusar V. Augmented reality in the interests of ESMRM and munitions safety. Preprint. 2019 [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/334573271_Augmented_reality_in_the_interests_of_ESMRM_and_munitions_safety. (Дата звернення: 19.01.2020).

168. Доповнена реальність. Матеріал з Вікіпедії [Electronic resource]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C#%D0%92%D1%96%D0%B9%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0. (Дата звернення: 19.01.2020).

169. Best AR SDK for development for iOS and Android in 2019 [Electronic resource]. URL: <https://thinkmobiles.com/blog/best-ar-sdk-review/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

170. ARKit – Apple Developer [Electronic resource]. URL:

<https://developer.apple.com/arkit/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

171. ARCore – Google Developer [Electronic resource]. URL: <https://developers.google.com/ar/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

172. Vuforia: Market–Leading Enterprise AR [Electronic resource]. URL: <https://www.vuforia.com/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

173. Wikitude Augmented Reality: the World’s Leading Cross-Platform AR SDK [Electronic resource]. URL: <https://www.wikitude.com/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

174. MAXST Developer – The Right Choice for Your AR SDK [Electronic resource]. URL: <https://developer.maxst.com>. (Дата звернення: 19.01.2020).

175. DeepAR ~ Snapchat Face Filters and Lenses Augmented Reality SDK [Electronic resource]. URL: <https://deepar.ai/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

176. EasyAR-Best engine for developing Augmented Reality [Electronic resource]. URL: <https://www.easyar.com/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

177. ARToolKit Home Page [Electronic resource]. URL: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

178. Xzimg: Images, Intelligence [Electronic resource]. URL: <https://www.xzimg.com>. (Дата звернення: 19.01.2020).

179. Creating Virtual Reality (VR) Apps [Electronic resource]. URL: <https://www.edx.org/course/creating-virtual-realityvr-apps>. (Дата звернення: 19.01.2020).

180. Unity for all [Electronic resource]. URL: <https://unity.com/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

181. ARToolKit: Computer Vision Algorithm [Electronic resource]. URL: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/vision.htm>. (Дата звернення: 19.01.2020).

182. Stokes M., Anderson M., Chandrasekar S., Motta R. A Standard Default Color Space for the Internet – sRGB. 1996 [Electronic resource]. URL:

<https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>. (Дата звернення: 19.01.2020).

183. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. № 9 (1). P. 62–66.

184. Richeson D.S. Euler's Gem: The Polyhedron Formula and the Birth of Topology. Princeton University Press, 2008. 336 p.

185. Serra J., Soille P. Mathematical Morphology and its Applications to Image Processing. *Proceedings of the 2nd international symposium on mathematical morphology (ISMM'94). Brazil*. 1994.

186. Lin S., Costello Jr., Daniel J. Error Control Coding (Second Edition). Pearson; 2 edition, 2004. 1272 p.

187. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features. *Computer Vision: Thesis of 7th International conference (Greece, Septemder, 20–27, 1999)*. Greece: IEEE, 1999. P. 1150–1157.

188. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. Speeded Up Robust Features. *Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision – Volume Part I*. 2006. P. 404–417. doi: 10.1007/11744023_32.

189. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. *Proceeding of IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2011. Barcelona, Spain, November. 2011*. doi: 10.1109/ICCV.2011.6126544.

190. Deza M.M., Deza E. Encyclopedia of Distances. Springer, 2009. 583 p.

191. Robinson D.J.S. An Introduction to Abstract Algebra (de Gruyter Textbook). De Gruyter; 2nd edition edition, 2003. 282 p.

192. Колесов В.В., Залогин Н.Н., Воронцов Г.М. Метод псевдоголографического кодирования. *Институт радиотехники и электроники РАН*. 2002. С. 68–71.

193. Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А., Эль-Хатиб А.И. Сегментация изображений методом муравьиных колоний. *Вестник Херсонского Национального Технического Университета*. 2013. № 1 (46). С. 204–211.
194. Щербина О.А. Метаэвристические алгоритмы для задач комбинаторной оптимизации (обзор). *Таврійський вісник інформатики та математики*. 2014. № 1 (24). С. 56–72.
195. Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*. 1986. № 131. P. 533–549.
196. Glover F., Kochenberger G. Handbook of Metaheuristics. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 2002. 647 p.
197. Пантелеев А.В. Применение эволюционных методов глобальной оптимизации в задачах оптимального управления детерминированными системами. Москва: МАИ, 2013. 159 с.
198. Матренин П.В., Секаев В.Г. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта. *Программная инженерия*. 2013. № 12. С. 39–45.
199. Матренин П.В. Описание и реализация алгоритмов роевого интеллекта с использованием системного подхода / П. В. Матренин // [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/281065343_Opisanie_i_realizacia_algoritmov_roevogo_intellekta_s_ispolzovanie_m_sistemnogo_podhoda. (Дата звернення: 21.11.2018).
200. Худов В.Г., Хижняк І.А., Петров О.А. Ройовий метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 3 (43). С. 34–37.
201. Худов Г.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Новікова І.В. Оцінка відстані Кульбака-Лейблера при тематичному сегментуванні оптико-електронного зображення методом Канні. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2017. № 2 (29). С. 83–90.

202. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks* (Australia, 27 Nov.–1 Dec.). 1995. P. 1942–1948.

203. Пантелеев А.В., Алешина Е.В. Применение метода частиц в стае к задаче поиска оптимального управления непрерывными детерминированными системами. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2010. № 157. С. 26–33.

204. A computer science portal for geeks [Electronic resource]. URL: <https://towardsdatascience.com/introduction-to-genetic-algorithms-including-example-code-e396e98d8bf3>. (Дата звернения: 19.01.2020).

205. Genetic Algorithms [Electronic resource]. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/genetic-algorithms/>. (Дата звернения: 19.01.2020).

206. Растрьгин Л.Л. Системы экстремального управления. Москва: Мир, 1974. 630 с.

207. Mühlenbein H., Schomisch D., Born J. The Parallel Genetic Algorithm as Function Optimizer. *Parallel Computing*. 1991. № 17. P. 619–632.

208. How the Genetic Algorithm Works [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html>. (Дата звернения: 19.01.2020).

209. С. П. Ковалёв, Теоретико-категорный подход к проектированию программных систем, *Фундамент. и прикл. матем.*, 2014, том 19, выпуск 3, 111–170

210. Seely, R. A. G. (1984). "Locally cartesian closed categories and type theory". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 95 (1): 33–48. doi:10.1017/S0305004100061284

211. Цаленко М. С., Шульгейфер Е. Г. Основы теории категорий. — М.: Наука, 1974.

212. Adamek J., Herrlich H., Strecker G. *Abstract and Concrete Categories*.

— New York: Wiley and Sons, 1990.

213. Маклейн С. Категории для работающего математика. — М.: Физматлит, 2004.

214. Жожикашвили А.В. Категорная технология создания и развития интеллектуальных систем, основанных на знании. *Информационные процессы*. 2016. — № 4 (16). С. 312–332.

215. Bartosz Milewski. Category Theory for Programmers: The Preface. Post Date: October 28, 2014 [Electronic resource]. URL: <https://bartoszmilewski.com/2014/10/28/category-theory-for-programmers-the-preface/> (Дата звернення: 19.01.2020).

216. Cook, Roy T. "Intensional Definition". In A Dictionary of Philosophical Logic. Edinburgh: Edinburgh University Press, 2009. 155.

217. All About Monads [Electronic resource]. URL: https://wiki.haskell.org/All_About_Monads (Дата звернення: 19.01.2020).

218. Горбунов А.Л., Нечаев Е.Е. Теренци Г. Дополненная реальность в авиации. *Прикладная информатика*. 2012. № 4 (40). С. 67–80.

219. Tkachenko I. Generation and analysis of graphical codes using textured patterns for printed document authentication. D.Sc Thesis. Montpellier: Université de Montpellier, 2015 [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/297777160_Generation_and_analysis_of_graphical_codes_using_textured_patterns_for_printed_document_authentication. (Дата звернення: 19.01.2020).

220. Xu S.-C., Yu Y., Yuan Q.-S, Zhang Y.-C. The virtual composing system for museum based on augmented reality technology. *Proc. SPIE 10806, Tenth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2018), 108066D. China*. 2018. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2503037>.

221. Piekariski W., Thomas B.H. Using ARToolKit for 3D Hand Position Tracking in Mobile Outdoor Environments. *Proceeding of The First IEEE*

International Workshop Augmented Reality Toolkit. Germany. 2002.
doi:10.1109/ART.2002.1107003.

222. Материалы по троичной информатике [Electronic resource]. URL: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://ternarycomp.cs.msu.ru/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

223. Комп'ютерна схемотехніка. Конспект лекцій [Electronic resource]. URL: http://institut.cn.ua/uploads/files/m_14/Kompyuterna-shemotehnika-Konspekt-leksy.pdf. (Дата звернення: 19.01.2020).

224. Moore E. H. On the reciprocal of the general algebraic matrix. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1920. № 26. P. 394–395.

225. Penrose R. A generalized inverse for matrices. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1955. № 51. P. 406–413.

226. Penrose R. On best approximate solution of linear matrix equations. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1955. № 52 (1). P. 17–19.

227. Barata J.C.A., Hussein M.S. The Moore–Penrose Pseudoinverse: A Tutorial Review of the Theory. *Brazilian Journal of Physics*. 2012. № 42. P. 146–165.

228. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. MSR-TR-98-71. Microsoft Research. 1998. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration. (Дата звернення: 19.01.2020).

229. Mashtalir S., Mashtalir V., Stolbovyi M. Representative Based Clustering of Long Multivariate Sequences with Different Lengths. *IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. 2018. P. 545–548.

230. Computer Vision Toolbox [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/cameracalibrator-app.html>. (Дата

звернения: 19.01.2020).

231. Camera Calibration With OpenCV [Electronic resource]. URL: https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html. (Дата звернения: 19.01.2020).

232. Harris C., Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings of The Fourth Alvey Vision Conference* (Manchester, UK). 1988. P. 147–151.

233. Displaying Complex Three-Dimensional Objects [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/visualize/displaying-complex-three-dimensional-objects.html>. (Дата звернения: 19.01.2020).

234. Конушин А. Геометрические свойства нескольких изображений. *Компьютерная графика и мультимедиа*. 2006. № 4 (3) [Electronic resource]. URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/141>. (Дата звернения: 19.01.2020).

235. QR Code Generator [Electronic resource]. URL: <https://www.the-qrcode-generator.com/>. (Дата звернения: 19.01.2020).

236. Pi and the size of the Universe – Numberphile [Electronic resource]. URL: https://www.youtube.com/watch?v=FpyrF_Ci2TQ. (Дата звернения: 19.01.2020).

237. MATLAB Documentation [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/randperm.html>. (Дата звернения: 19.01.2020).

238. GitHub – zxing [Electronic resource]. URL: <https://github.com/zxing/zxing>. (Дата звернения: 19.01.2020).

239. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю. Н. Тюрина. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 510 с. — ISBN 5-279-00245-3.

240. Global Optimization Toolbox [Electronic resource]. URL:

<https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html>. (Дата звернення: 19.01.2020).

241. Where to download the example image [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/263183-where-to-download-the-example-image>. (Дата звернення: 19.01.2020).

242. Adobe Acrobat Reader DC [Electronic resource]. URL: <https://get.adobe.com/ua/reader/>. (Дата звернення: 19.01.2020).

243. Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. (ред.). Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. Москва: Физматлит, 2009. 556 с.

244. Generate Random Numbers That Are Repeatable [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/generate-random-numbers-that-are-repeatable.html>. (Дата звернення: 19.01.2020).

245. Лекція методологія структурного аналізу й проектування системи й моделі [Electronic resource]. URL: <http://dmee.ru/docs/100/index-2138.html>. (Дата звернення: 19.01.2020).

246. Camera – definition – GSMArena [Electronic resource]. URL: <https://www.gsmarena.com/glossary.php3?term=camera>. (Дата звернення: 19.01.2020).

247. OpenCV 2.4.13.7 documentation [Electronic resource]. URL: <https://docs.opencv.org/2.4/index.html> (Дата звернення: 19.01.2020).

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

А.1 Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Маковейчук О. М. Інформаційна технологія побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 4 (10). С. 55–68.

2. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Том 3, № 3. С. 43–48.

3. Маковейчук О. М. Метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера без врахування додаткової апріорної інформації. *Системи обробки інформації*. 2019. Вип. 4 (159). С. 36–43.

4. Маковейчук О. М. Науково-прикладні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 5 (57). С. 59–66.

5. Маковейчук О. М. Метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Том 3, № 4. С. 80–86.

6. Маковейчук О. М. Метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 6 (58). С. 54–57.

7. Бутко І. М., Маковейчук О. М. Визначення джерел лісових пожеж за супутниковими знімками. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.3. С. 80–84.

8. Маковейчук А. Н., Бутко И. Н., Жуйков Д. Б., Худов Г. В. Анализ показателей оценки качества обработки изображений фрактальным методом при воздействии протяженных маскирующих помех. *Системи обробки інформації*. 2012. Вип. 7 (105). С. 104–108.

9. Пелешко Д., Маковейчук О., Ковальчук А., Клювак А. Усунення динамічних часткових спотворень для відтворення зображень на основі інтегрально-диференціального підходу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 751. С. 320–332.

10. Павлій В. О., Маковейчук О. М., Худов Г. В. Показники ефективності відновлення дефокусованих оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені змазом. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*. 2013. № 3 (66). С. 106–112.

11. Худов В. Г., Маковейчук О. М. Генетичні алгоритми для сегментування зображень систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 2 (23). С. 142–145.

12. Худов В. Г., Кучук Г. А., Маковейчук О. М., Крижний А. В. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 9 (146). С. 77–80.

13. Клювак А., Пелешко Д., Маковейчук О., Ізонін І. Двоетапне сегментування зображення із складним фоном на основі методу Отсу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2016. № 843. С. 335–341.

14. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості еволюційного методу сегментування зображення, що отримано з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 4 (44). С. 133–137.

15. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості сегментування оптико-електронного зображення шляхом оцінки комплексних показників та відстані Кульбака-Лейблера. *Системи обробки інформації*. 2017. Вип. 4 (150). С. 27–30.

16. Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109904>.

17. Ruban I.V., Khudov V.G., Khizhnyak I.A., Makoveichuk O.M. Segmentation of multiple image sequences, which obtained from optoelectronic observations of the aircraft. *News of Science and Education*. 2017. № 5 (53). P. 103–110.

18. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Рубан І.В., Худов Г.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 1 (47). С. 146–152.

19. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г., Подліпаєв В.О., Горбань Г.В., Худов Г.В. Метод ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії (АВС)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 2 (48). С. 91–96.

20. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Інформаційна ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 3 (49). С. 26–32.

21. Хижняк І.А., Худов Г.В., Рубан І.В., Маковейчук О.М., Соломоненко Ю.С., Худов В.Г. Метод тематичного сегментування кольорового зображення бортової системи оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 5 (51).

С. 13–19.

22. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Худов Р.Г. Цільова функція методу тематичного сегментування зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 4 (33). С. 36–42.

23. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод визначення об'єктів міської забудови на зображеннях бортових систем оптико-електронного спостереження з використанням перетворення Хафа. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 6 (52). С. 20–24.

24. Худов Г.В., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Ройовий метод тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу. *Екологічні науки*. 2018. № 4 (23). С. 24–28.

25. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Khudov V., Podlipaiev V., Shumeiko V., Atrasevych O., Nikitin A., Khudov R. Segmentation of optical-electronic images from on-board systems of remote sensing of the Earth by the artificial bee colony method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/9 (98). P. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161860>.

26. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Березіна С.І., Соломоненко Ю.С. Метод багатомасштабного оброблення зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження для визначення елементів міської інфраструктури. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 3 (55). С. 3–7.

27. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Lukova-Chuiko N., Pevtsov G., Sheviakov Y., Yuzova I., Drob Y., Tytarenko O. Method for determining elements of urban infrastructure objects based on the results from air monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/9 (100). P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174576>.

28. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56). С. 72–81.

29. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Chomik M., Khudov V., Khizhnyak I., Podlipaiev V., Sheviakov Y., Baranik O., Irkha A. Construction of methods for determining the contours of objects of tonal aerospace images based on the ant algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9 (101). P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.177817>.

30. Khudov H., Ruban I., Makoveichuk O., Pevtsov H., Khudov V., Khizhnyak I., Fryz S., Podlipaiev V., Polonskyi Y, Khudov R. Development of methods for determining the contours of objects for a complex structured color image based on the ant colony optimization algorithm. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. № 1, P. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001108>.

31. Павлій В. А., Маковейчук А. Н., Худов Г. В. Функция размытия точки оптико-электронных изображений при смазе и дефокусировке, обусловленных неоднородностью атмосферы. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2013. Вип. 4 (37). С. 75–78.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Жуйков Д.Б. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах впливу маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 8 наук. конф. (Харків, 18–19 квіт. 2012). Харків: ХУПС, 2012. С. 315.

2. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Бутко І.М., Жуйков Д.Б. Методи захисту зображень технічних систем розвідки і спостереження від дії маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 9 наук. конф. (Харків, 17–18 квіт. 2013). Харків: ХУПС, 2013. С. 325.

3. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Павлій В.О., Подліпаєв В.О. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазу. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 11 наук. конф. (Харків, 08–09 квіт. 2015). Харків: ХУПС, 2015. С. 363.

4. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Кухарський І.А., Худов Р.Г. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 14 наук. конф. (Харків, 11–12 квіт. 2018). Харків: ХНУПС, 2018. С. 469–470.

5. Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Худов Г.В. Двоетапний метод визначення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях з використанням перетворення Хафа. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 15 Міжнар. наук. конф. (Харків, 10–11 квіт. 2019). Харків: ХНУПС, 2019. С. 525.

6. Izonin I., Malets I., Makoveichuk O., Peleshko D., Ivanov Y., Batyuk D., Lotoshunkska N. Adaptive Moving Object Segmentation Algorithms in Cluttered Environments. *Proceeding in 13 International scient.-pract. confer Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. 2015. P. 97–99. DOI: 10.1109/CADSM.2015.7230806.

7. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Сердюк О.В. Мультиагентний метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО*: Тези допов. IX наук.-практ. конф. (Київ, 25 листопада 2016). Київ: ВІТІ, 2016. С. 194.

8. Хижняк І.А., Сердюк О.В., Маковейчук О.М. Ройовий метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-

електронного спостереження. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах*: Тези допов. 17 наук.-техн. конф. (Чернігів, 7-8 вересня 2017). Чернігів: ДНДІ ОВТ, 2017. С. 369–370.

9. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Хижняк І.А. Удосконалений еволюційний метод сегментування багатомасштабної послідовності зображень, отриманих з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи*: Тези допов. четвертої Всеукр. наук.-практ. конф. (Одеса 7–8 вересня 2017). Одеса: Військова академія, НА ДПС України, 2017. С. 172–173.

10. Бутко І., Маковейчук О., Медвецька Т. Використання даних дистанційного зондування для контролю за станом земель запасу та резервного фонду. *Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law*: Збірник міжнар. наук. праць (Словаччина-Чехія-Чернігів, 24-28 квітня 2018). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 131–134.

11. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Тематичне сегментування оптико-електронного зображення методом ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (АВС)). *Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції*: Тези допов. XXII Всеукр. наук.-практ. конф. (Житомир, 26–27 квітня 2018). Житомир: ЖВІ, 2018. С. 251–252.

12. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Сердюк О.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 17-18 травня 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 241.

13. Рубан І.В., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Генетичні методи обробки зображень в системах доповненої реальності військового

призначення. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 16-17 травня 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 256.

14. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Подліпаєв В.О. Інформаційна технологія тематичного сегментування тонових та кольорових зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. восьмої Міжнар. наук.-техн. конф. (Полтава, Баку, Харків, Жиліна, 26–27 квітня 2018). Полтава: ПНТУ; Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2018. С. 58.

15. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Двоетапний метод виявлення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. дев'ятої Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку, Харків, Жиліна, 11–12 квітня 2019). Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2019. С. 12.

16. Ruban I., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I. A swarm method for segmentation of images obtained from on-board optoelectronic surveillance systems. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 5th International scientific-practical conference (Kharkiv, October, 9–12, 2018). Kharkiv: IEEE, 2018. P. 613–618. DOI: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632045>.

17. Ruban I., Makoveichuk O., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I., Yuzova I., Drob Y. The Method for Selecting the Urban Infrastructure Objects Contours. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 6th International scientific-practical conference (Kiev, October, 8–11, 2019). Kiev: IEEE, 2019. P. 689–693. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061267.

18. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В.,

Худов Р.Г., Сердюк О.В. Метод тематичного сегментування оптико-електронних зображень. *Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів*: Тези допов. XXII Всеукр.наук.-практ.конф. (Житомир, 1–2 лист. 2018). ЖВІ, 2018. С. 164–168.

19. Худов Г.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М. Метод обробки багатомасштабної послідовності зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 15 листопада 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 159.

20. Худов Г.В., Хижняк І.А., Маковейчук О.М. Худов Р.Г. Застосування алгоритмів ройового інтелекту для вирішення задачі сегментування аерокосмічних зображень. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 14-15 листопада 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 209–210.

21. Худов Г.В., Хижняк І.А., Подліпаєв В.О., Худов Р.Г. Удосконалений метод обробки багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: Thesis of International scientific and practical conference (Wloclawek, Republic of Poland, December, 21-22, 2018). Wloclawek: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2018. P. 29–32.

22. Khudov H., Pavlii V., Khizhnyak I., Makoveichuk O., Khudov R. Image segmentation method for onboard environmental monitoring systems. *Science, Research, Development # 14. Technics and Technology*: Thesis of International scientific and practical conference (London, February, 27-28, 2019). London, 2019. P. 23–25.

23. Рубан І.В., Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод визначення контурів елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях бортових систем. *Комп'ютерні та інформаційні системи і технології*:

Тези допов. третьої Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 23-24 квітня 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 20–21.

24. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод виявлення об'єктів міської інфраструктури на багатомасштабній послідовності зображень з бортових систем дистанційного зондування Землі. *Наукоємні технології в інфокомунікаціях (НІСТ`2019)*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, Кам'янець-Подільський, 23-25 травня 2019). Харків: ХНУПС, ХНУРЕ; Кам'янець-Подільський: Кам.-Поділ. нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2019. С. 93–94.

25. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Рубан І.В. Метод визначення інверсних псевдовипадкових блочних перестановок на основі генетичних алгоритмів. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*: Тези допов. VII наук.-техн. конф. (Київ, 09-10 жовтня 2019). Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2019. С. 413–414.

26. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод виявлення об'єктів інтересу на зображеннях з безпілотних літальних апаратів в інтересах охорони державного кордону. *Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Хмельницький, 22 листопада 2019). Хмельницький: Нац. академія держ. прикор. служби ім. Б. Хмельницького, 2019. С. 828–829.

27. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил*: Тези допов. XII наук.-практ. конф. (Київ, 14-15 листопада 2019). Київ: ВІТІ, Київ, 2019. С. 189–190.

28. Маковейчук О.М. Знаходження інверсних блочних перестановок в задачах комп'ютерного зору. *Сучасні проблеми прикладної математики*

та інформатики АРАМС-2019: Тези допов. XXV Всеукр. наук. конф. (Львів, 24–27 вересня 2019). Львів: Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2019. С. 102–105.

29. Ruban I., Khudov H., Makoveychuk O., Khizhnyak I., Khudov V., and Lishchenko V. The model and the method for forming a mosaic sustainable marker of augmented reality. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET): Thesis of 2020 IEEE 15th International Conference* (Slavske, February 25–29, 2020). Slavske: IEEE, 2020. P. 402–406. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235463>.

A.2 Відомості про апробацію результатів дисертації

Апробація результатів дисертації була проведена на:

– 8 науковій конференції "Новітні технології – для захисту повітряного простору" 18-19 квітня 2012 року в Харківському університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, участь з доповіддю;

– 9 науковій конференції "Новітні технології – для захисту повітряного простору" 17-18 квітня 2013 року в Харківському університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, участь з доповіддю;

– 11 науковій конференції "Новітні технології – для захисту повітряного простору" 8-9 квітня 2015 року в Харківському університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, участь з доповіддю;

– 14 науковій конференції "Новітні технології – для захисту повітряного простору" 8-9 квітня 2015 року в Харківському університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, участь з доповіддю;

– 15 науковій конференції "Новітні технології – для захисту повітряного простору" 10-11 квітня 2019 року в Харківському університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, участь з доповіддю;

– 13 Міжнародній науково-практичній конференції "Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)" 10-11 жовтня 2015 року в Національному університеті «Львівська політехніка», м. Львів, участь з доповіддю;

– IX Міжнародній науково-практичній конференції "Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО " 25 листопада 2016 року в Військовому інституті телекомунікацій та інформатизації, м. Київ, участь з доповіддю;

– 17 науково-технічній конференції "Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах" 7-8 вересня 2017 року в Державному науково-випробувальному центрі Збройних Сил України, м. Чернігів, участь з доповіддю;

– 4 Всеукраїнській науково-практичній конференції "Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи" 7-8 вересня 2017 року в Військовій академії, м. Одеса, доповідь та її тези подано дистанційно;

– Міжнародній науковій конференції "Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law" 24-28 квітня 2018 року в Чернігівському національному технічному університеті, м. Чернігів, участь з доповіддю;

– XXII Всеукраїнській науково-практичній конференції "Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції" 26-27 квітня 2018 року в Житомирському військовому інституті імені С.П.Корольова, м. Житомир, участь з доповіддю;

– міжнародній науково-технічній конференції "Перспективи розвитку озброєння і військової техніки Сухопутних військ" 17-18 травня 2018 року в Національній академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, участь з доповіддю;

– міжнародній науково-технічній конференції "Перспективи розвитку озброєння і військової техніки Сухопутних військ" 16-17 травня 2019 року в Національній академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, участь з доповіддю;

– 8 міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління" 26-27 квітня 2018 року в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка, м. Полтава, участь з доповіддю;

– 9 міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління" 11-12 квітня 2019 року в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка, м. Полтава, участь з доповіддю;

– 5 міжнародній науково-практичній конференції "Problems of infocommunications science and technology" 9-12 жовтня 2018 року в Харківському національному університеті радіоелектроніки, м. Харків, участь з доповіддю;

– 6 міжнародній науково-практичній конференції "Problems of infocommunications science and technology" 11-14 жовтня 2019 року в Київському університеті імені Бориса Гринченка, м. Київ, участь з доповіддю;

– I Всеукраїнській науково-практичній конференції "Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів" 1-2 листопада 2018 року в Житомирському військовому інституті імені С.П.Корольова, м. Житомир, участь з доповіддю;

– науково-практичній конференції "Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах" 15 листопада 2018 року в Національній академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, участь з доповіддю;

– науково-практичній конференції "Застосування Сухопутних військ

Збройних Сил України у конфліктах" 14-15 листопада 2019 року в Національній академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, участь з доповіддю;

– міжнародній науково-технічній конференції "Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine" 21-22 грудня 2018 року в Університеті міста Вроцлавек, м. Вроцлавек, доповідь та її тези подано дистанційно;

– міжнародній науково-технічній конференції "Science, Research, Development # 14. Technics and Technology" 27-28 лютого 2019 року в Лондонському Університеті, м. Лондон, доповідь та її тези подано дистанційно;

– 3 міжнародній науково-технічній конференції "Комп'ютерні та інформаційні системи і технології" 23-24 квітня 2019 року в Харківському національному університеті радіоелектроніки, м. Харків, участь з доповіддю;

– 3 міжнародній науково-практичній конференції "Наукоємні технології і інфокомунікаціях" 23-25 травня 2019 року в Кам'янець-Подільському національному університеті імені Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський, доповідь та її тези подано дистанційно;

– VII міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки" 9-10 жовтня 2019 року в Центральному науково-дослідному інституті озброєння і військової техніки Збройних Сил України, м. Київ, доповідь та її тези подано дистанційно;

– Міжнародній науково-практичній конференції "Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України" 22 листопада 2019 року в Національній академії державної прикордонної служби України, м. Хмельницький, участь з доповіддю;

– Міжнародній науково-практичній конференції "Пріоритетні

напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в ООС " 14 листопада 2019 року в Військовому інституті телекомунікацій та інформатизації, м. Київ, доповідь та її тези подано дистанційно;

– XXV Всеукраїнській науковій конференції "Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики АРАМС-2019" 24-27 вересня 2019 року в Львівському національному університеті імені Івана Франка, м. Львів, участь з доповіддю;

– 15 Міжнародній конференції "Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET)" 25-29 лютого 2020 року в Національному університеті "Львівська політехніка", м. Славське, участь з доповіддю.

ДОДАТОК Б

Акти про реалізацію і впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник управління військової частини А2667

кандидат технічних наук

Гор КУХАРСЬКИЙ
"28" 2020 року

Акт

про реалізацію результатів дисертаційної роботи докторанта
Харківського національного університету радіоелектроніки
Маковейчука Олександра Миколайовича

Комісія у складі: голови комісії – заступника начальника управління, кандидата технічних наук, Подліпаєва В.О. та членів комісії: заступника начальника управління, кандидата технічних наук, Шумейка В.О., заступника начальника управління, Мартинюка С.В., констатує, що основні результати дисертаційної роботи Маковейчука О.М., а саме:

науково-прикладні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності;

модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

інформаційна технологія доповненої реальності

реалізовані у спеціалізованому програмно-апаратному комплексі обробки інформації у вигляді алгоритмів і програм робочого місця інтерпретатора-дешифрувальника.

У результаті реалізації наукових результатів, отриманих Маковейчуком О.М., вдалося забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій та систем доповненої реальності шляхом побудови і використання візуальних інформаційних структур, запропонованих докторантом, а саме:

знизити час виявлення запропонованої візуальної інформаційної структури, що застосовується у військовій сфері, приблизно у 3,6 разів у порівнянні з часом виявлення відомих QR-кодів;

підвищити інформативність повідомлення у системі доповненої реальності у 5 разів у порівнянні з інформативністю відомих QR-кодів;

знизити кількість помилково декодованих бітів повідомлення у системі доповненої реальності;

знизити кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання маркерів доповненої реальності.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії: кандидат технічних наук

Члени комісії: кандидат технічних наук

Вячеслав ПОДЛІПАЄВ

Віктор ШУМЕЙКО

Сергій МАРТИНЮК



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи докторанта Харківського національного університету радіоелектроніки Маковейчука Олександра Миколайовича на тему «Моделі, методи та інформаційна технологія побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності» представленої на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук.

Комісія у складі:

– голови комісії – заступника генерального директора ПрАТ «АВІКОС»

Бенди Ярослава Івановича;

та членів комісії:

– провідного інженера-програміста ПрАТ «АВІКОС»

Охримовича Євстахія Володимировича;

– інженера-програміста ПрАТ «АВІКОС» Паславського Ігоря Володимировича
даним актом засвідчує, що основні наукові положення розроблені Маковейчуком О.М. і викладені в його докторській дисертації, а саме:

– модель та метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів;

– метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– метод проектування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності використані в ПрАТ «АВІКОС» при створенні модулів управління рухомими об'єктами в комплексах «Скіф», «Стугна», БМ «Оплот» що дозволило забезпечити стійке їх функціонування завдяки використанню візуальних інформаційних структур у вигляді стійкого мозаїчного стохастичного маркеру доповненої реальності.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Результати досліджень, викладених в дисертаційній роботі Маковейчука О.М. дозволили підвищити ефективність сучасних комплексів озброєння.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:

Заступник генерального директора ПрАТ «АВІКОС»

Бенда Я. І;

Члени комісії:

Провідний інженер-програміст ПрАТ «АВІКОС»

Охримовича Є. В;

Інженер-програміст ПрАТ «АВІКОС»

Паславського І. В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора

ДП «Центр державного земельного кадастру»

кандидат технічних наук, доцент



Ігор БУТКО

«28» травня 2020 р.

Акт

щодо впровадження результатів дисертаційної роботи
докторанта Харківського національного університету радіоелектроніки
Маковейчука Олександра Миколайовича

Комісія у складі голови — начальника відділу інноваційно-технологічного розвитку департаменту регіонального розвитку та виробництва ДП «Центр ДЗК» Більбута Р.Л. та

членів комісії — начальника відділу робіт із землеустрою департаменту регіонального розвитку та виробництва ДП «Центр ДЗК» Бабича О.А. та інженера-землевпорядника II категорії відділу робіт із землеустрою Ткаченка А.О.

у період з 26 по 27 травня 2020 року розглянула результати дисертаційного дослідження, отримані особисто Маковейчуком О. М., а саме:

- теоретичні основи побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності;
- модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності;
- модель та метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів;
- метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;
- метод проєктування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності;
- інформаційна технологія доповненої реальності.

На підставі розгляду представлених матеріалів комісія встановила та цим актом засвідчує, що впровадження отриманих Маковейчуком Олександром Миколайовичем наукових результатів забезпечує стійке функціонування інформаційної технології та системи доповненої реальності шляхом побудови і використання візуальної інформаційної структури у вигляді стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. При цьому:

- час виявлення маркера скоротився в середньому 3-5 разів у порівнянні з QR-кодами та маркерами-зображеннями;
- кількість кольорів, що необхідні для побудови маркера, дорівнює трьом — бінарне зображення і додатковий проміжний колір;

– інформативність підвищена в середньому у 4-5 разів у порівнянні з інформативністю QR-кодів;

– зменшена кількість додаткових параметрів для використання маркерів в середньому у 10 разів.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:

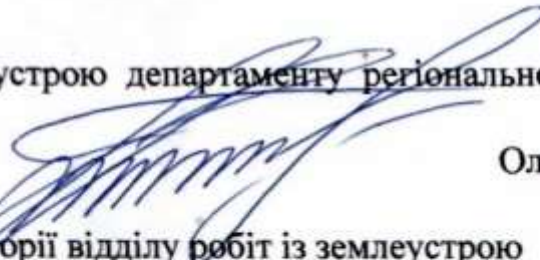
начальник відділу інноваційно-технологічного розвитку департаменту регіонального розвитку та виробництва ДП «Центр ДЗК»



Руслан БОЛЬБУТ

Члени комісії :

начальник відділу робіт із землеустрою департаменту регіонального розвитку та виробництва ДП « Центр ДЗК»



Олександр БАБИЧ

інженера-землевпорядника II категорії відділу робіт із землеустрою



Андрій ТКАЧЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Національного центру

управління та випробувань космічних засобів
канд. техн. наук, с.н.с.



Володимир ПРИСЯЖНИЙ

05 2020 року

АКТ

щодо впровадження результатів дисертаційної роботи
МАКОВЕЙЧУКА Олександра Миколайовича

Комісія Національного центру управління та випробувань космічних засобів у складі:

- | | |
|------------------|--|
| ЯНЧЕВСЬКОГО С.Л. | - заступник начальника інформаційно-аналітичного центру; |
| МАМАРЄВА В.М. | - начальника відділу науково-дослідної та випробувальної роботи; |
| КОЗУБА А.М. | - заступника начальника відділу науково-дослідної та випробувальної роботи; |
| МОРОЗА В.С. | - начальника групи аналітичної інформаційно-аналітичного центру; |
| СЛАСТИНА С.О. | - начальника відділу забезпечення економічного сектору інформаційно-аналітичного центру; |

у період з 18 по 22 травня 2020 року розглянула опубліковані у фахових наукових виданнях результати дисертаційного дослідження докторанта Харківського національного університету радіоелектроніки Маковейчука Олександра Миколайовича, а саме:

вперше розроблені модель та метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення у задане число разів методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою з проміжним кольором.

вперше розроблений метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення.

вперше розроблений метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних

точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування іншої апріорної інформації.

вперше розроблений метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, із трансформованого зображення бітконтейнера будує матрицю бітів маркера, визначає зсув у повній матриці бітів, на основі застосування оберненої перестановки до повної матриці бітів реалізує фільтрацію перматованого зображення.

удосконалений метод проектування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потоків в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення.

удосконалену інформаційну/технологію доповненої реальності.

За результатами розгляду згаданих публікацій комісія встановила та цим актом засвідчує, що впровадження розроблених Маковейчуком Олександром Миколайовичем методів формування, виявлення, визначення параметрів проєктивного перетворення та декодування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності у порівнянні з QR-кодами забезпечує підвищення інформативності, не менше ніж у 4 рази при цьому скоротивши середній час виявлення маркеру у 3-5 разів. При системному застосуванні розроблених Маковейчуком О.М. моделей та методів обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів запропонована автором удосконалена інформаційна технологія доповненої реальності дозволяє забезпечити вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, стійке функціонування інформаційної технології та системи доповненої реальності.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії: канд. техн. наук



Сергій ЯНЧЕВСЬКИЙ

Члени комісії: канд. техн. наук



Віктор МАМАРЧУК

канд. техн. наук, доцент



Андрій КОЗУБ



В'ячеслав МОРОЗ



Сергій СЛАСТІН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника університету

з навчальної роботи

заслужений діяч науки і техніки України

доктор технічних наук професор

Костянтин ВАСЮТА



Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи докторанта
Харківського національного університету радіоелектроніки
Маковейчука Олександра Миколайовича
в освітньому процесі Харківського національного університету
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Комісія у складі: голови комісії – начальника кафедри тактики радіотехнічних військ факультету радіотехнічних військ протиповітряної оборони доктора технічних наук, професора Худова Г.В., та членів комісії: доцента кафедри тактики радіотехнічних військ факультету радіотехнічних військ протиповітряної оборони кандидата технічних наук, доцента Рафальського Ю.І., доцента кафедри тактики радіотехнічних військ факультету радіотехнічних військ протиповітряної оборони Борового В.І., начальника навчального командного пункта кафедри тактики радіотехнічних військ факультету радіотехнічних військ протиповітряної оборони Смірнова Є.В., склала цей акт про те, що на кафедрі № 501 при вивченні дисципліни "Автоматизовані системи управління радіотехнічних військ", змістовий модуль 1.1 "Завдання, структура та характеристики автоматизованих систем управління радіотехнічних військ" (під час проведення лекції – 2 години, семінару – 4 години, групового заняття – 2 години), змістовий модуль 2.1 "Обробка радіолокаційної інформації в автоматизованих системах управління радіотехнічних військ" (під час проведення лекцій – 6 годин, групових занять – 4 години, практичних занять – 4 години), при вивченні дисципліни "Розвідка повітряного противника", змістовий модуль 2 "Засоби повітряного нападу як об'єкти радіолокаційної розвідки" (під час проведення групового заняття – 2 години, практичного заняття – 2 години) були використані такі результати дисертаційної роботи докторанта Харківського національного університету радіоелектроніки Маковейчука О.М.:

- основи побудови маркерів доповненої реальності, що базуються на системі моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних;

- модель мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, яка забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних;

- метод формування стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності;

– метод виявлення мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності;

– метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Маковейчука О.М. дозволило підвищити загальний рівень знань курсантів щодо розробки сучасних інформаційних технологій функціонування систем доповненої реальності.

Зміст акту ухвалено на засіданні кафедри № 501 університету, протокол № 19 від 05.05.2020.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:



Геннадій ХУДОВ

Члени комісії:



Юрій РАФАЛЬСЬКИЙ



Вадим БОРОВИЙ



Євген СМІРНОВ