

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**БРОННІКОВ АРТЕМ ІГОРОВИЧ**

УДК 004.896:007.52]:004.416.3

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АДАПТИВНОГО ВІЗУАЛЬНОГО  
КЕРУВАННЯ РОБОТАМИ**

**05.13.07 – автоматизація процесів керування**

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент  
**Цимбал Олександр Михайлович,**  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих  
технологій, автоматизації та мехатроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Купін Андрій Іванович,**  
Криворізький національний університет,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем  
та мереж

кандидат технічних наук, доцент  
**Хавіна Інна Петрівна,**  
Харківський національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри обчислювальної техніки  
та програмування

Захист відбудеться «23» вересня 2021 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розіслано: «18» серпня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. П. Плісс

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні гнучкі інтегровані виробничі системи (ГІВС), порівняно з виробництвом попередніх періодів, характеризуються, з одного боку здатністю швидкого переналаштування і перепрограмування до випуску нових типів продукції, з іншого складаються з більш складних, і, відповідно, більш коштовних компонентів програмно-апаратного забезпечення. Введення роботів до складу ГІВС відкриває нові можливості у вигляді часткової або повної автоматизації певних типів робіт, особливо таких, що є важкими або небезпечними для виконання людиною. Ступінь складності виконання роботами завдань ГІВС суттєво залежить від технічних характеристик транспортувальних та маніпуляційних систем роботів, здатності сприймати інформацію про стан робочого простору ГІВС, наявності баз знань роботизованих систем, зокрема, у вигляді сценаріїв поведінки робота, що відображають специфіку виконання практичних завдань. При цьому, отримання роботом інформації про стан робочого простору забезпечується сенсорними системами, що складаються з датчиків, які створено на основі різних фізичних принципів і орієнтованих на конкретні умови експлуатації.

Використання зорової інформації в системах керування роботів практично привертає найбільшу увагу розробників та дослідників за аналогією з зором людини, особливо з точки зору розв'язання завдань розпізнавання та ідентифікації. Проблемою створення адаптивних систем керування присвячені наукові роботи таких вчених як: A. Pugh, J. Canny, D. Forsyth, J. Ponce, S. Thrun, R. Lozano, K. Åström, A. Тимофеев, Є. Юревич, А. Ющенко, А. Ладанюк, В. Лисенко, А. Александров, Є. Бодянский, І. Невлюдов, О. Филипенко, А. Купін, В. Філатов та ін. Проте завдання інтеграції засобів комп'ютерного та технічного зору у системи керування, візуальної корекції руху мобільних платформ та маніпуляторів, адаптації роботи засобів керування на основі візуальної інформації є до сих пір такими, що не отримали свого повного розв'язання. Очевидним є протиріччя між сучасним рівнем розробки технології і методів комп'ютерного зору та рівнем їх впровадження у системи інтелектуального керування мобільними та маніпуляційними роботами. Таким чином, тематика дисертаційного дослідження, спрямованого на розробку моделей та методів адаптивного візуального керування мобільними роботизованими засобами, є своєчасною та актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках НДР за держбюджетними темами: «Створення мікрооптоелектромеханічних засобів для інтелектуальних технологічних систем промислового обладнання та робототехніки» (ДР №0115U002433), «Безскладальні гнучко-жорсткі конструкції зі змінною конфігурацією для мікросистемної техніки та інтелектуальних роботів» (ДР №0117U002529), «Інтелектуальна багатоцільова робототехнічна платформа з удосконаленими маніпуляційними можливостями» (ДР №0121U109909). Здобувачем, в якості, виконавця розроблені метод та окремі моделі адаптивного візуального

керування, що застосовуються у інтелектуальних системах керування роботів, відповідне інформаційне та програмне забезпечення.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка нових та удосконалення існуючих моделей та методів адаптивного візуального керування, що забезпечують підвищення продуктивності, швидкодії та надійності робототехнічних засобів гнучких інтегрованих виробничих систем.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити сучасний стан гнучких інтегрованих роботизованих систем і застосування засобів адаптивного та інтелектуального керування;

- розробити інформаційно-логічну модель подання інформації про робочий простір ГІВС;

- розробити функціональну модель, що забезпечує опис взаємодії об'єктів ГІВС під час виконання виробничих завдань;

- вдосконалити метод адаптивного візуального керування мобільними роботами;

- вдосконалити моделі керування мобільним роботом у просторі ГІВС на основі впровадження візуального цілевказання та нечіткого опису параметрів керування, модель розпізнавання та ідентифікації об'єктів;

- практично реалізувати розроблені моделі і метод, розробити інформаційне та програмне забезпечення, що забезпечує адаптивне візуальне керування мобільними роботами, які функціонують у складі ГІВС.

Об'єкт дослідження – процеси керування гнучким інтегрованим роботизованим виробництвом.

Предмет дослідження – моделі і методи автоматизованого керування мобільними транспортними роботами у складі гнучкого інтегрованого виробництва.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використані методи теорії множин – для розробки інформаційно-логічної моделі робочого простору ГІВС, функціональної моделі ГІВС, а також для удосконалення моделей розпізнавання та ідентифікації об'єктів, керування мобільним роботом у просторі ГІВС; методи теорії автоматичного керування та нечітких множин – для моделювання роботи адаптивної системи керування роботом; методи теорії обробки зображень – для програмної реалізації завдань, що входять до складу системи адаптивного візуального керування. При проведенні експериментальних досліджень, для практичної перевірки результатів і розробки програмного забезпечення використані мови програмування C/C++, Python, програмні бібліотеки MFC, OpenGL, OpenCV, NumPy, середовища розробки Microsoft Visual C++, PyCharm та пакет прикладних програм GNU Octave для моделювання роботи системи адаптивного візуального керування.

**Наукова новизна одержаних результатів.** До нових, отриманих особисто автором, слід віднести такі результати:

- 1) Вперше розроблено інформаційно-логічну модель робочого простору, що відображає об'єкти ГІВС, характерні для завдань інтелектуального керування роботами та зв'язки між об'єктами, і яка, на відміну від існуючих враховує дискретність та заповненість виробничого робочого простору; ґрунтується на інформації, отриманій від об'єктової системи комп'ютерного зору; визначає та враховує властивості об'єктів, що розміщуються в робочому просторі; враховує взаємодію, упорядкованість та сумісність об'єктів;

2) Вперше розроблено функціональну модель ГІВС, яка забезпечує опис взаємодії об'єктів на рівні виконання поставлених перед ГІВС виробничих, транспортувальних, сервісних, моніторингових, управлінських та інших завдань, та, на відміну від існуючих, ґрунтується на інформаційно-логічній моделі робочого простору, враховує особливості технологічних операцій, містить детальний опис властивостей об'єктів та їх взаємодії, включає можливість кількісної оцінки вартості та якості робіт;

3) Вдосконалено метод адаптивного візуального керування, що описує сукупність прийомів та операцій, які слід застосувати у інтелектуальних системах керування роботів для планування завдання переміщень на основі отримання зорової інформації від систем комп'ютерного (технічного) зору, та, на відміну від існуючих методів, орієнтований на використання в мобільних робототехнічних системах;

4) Отримала подальший розвиток модель керування мобільним роботом у просторі ГІВС, що здійснює керування шасі двоколісного робота, та, на відміну від існуючих, функціонує на основі інформації від об'єктових/локальних систем комп'ютерного зору та виконує функції розпізнавання та ідентифікації об'єктів ГІВС, забезпечує розрахунок координат та швидкостей роботизованої платформи та інших об'єктів ГІВС, розрахунок лінійних та криволінійних траєкторій переміщень у дискретному робочому просторі, подання маршруту у вигляді послідовностей переміщень, забезпечує організацію керування транспортувальними роботами за їх візуальним положенням; містить нечітку складову з розгорнутим описом процедур формування лінгвістичних змінних, пов'язаних з динамікою руху мобільної роботизованої платформи та формалізує набір продукційних правил нечіткого регулятора.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблено інформаційне та програмне забезпечення адаптивної візуальної системи керування мобільним транспортувальним роботом, яке реалізує запропоновані моделі і метод, практично забезпечує аналіз робочого простору за допомогою системи комп'ютерного/технічного зору, розпізнавання та ідентифікацію об'єктів робочого простору та робототехнічних засобів, отримання їх просторових координат, підтримку візуального цілевказання маршруту мобільного робота та функціонування інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

Результати досліджень можуть бути використані в дослідженнях та розробках, що виконуються у ДП «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (м. Харків), АТ «Хартрон» (м. Харків), ПАТ «ФЕД» (м. Харків), ПАВ «Вертикаль» (м. Харків), ТОВ «Укрінтех» (м. Харків) та інших організаціях та підприємствах, що вирішують проблеми створення гнучких інтегрованих систем, автоматизованих та роботизованих пристроїв різного призначення.

Результати розробок і досліджень впроваджені в освітній процес у Харківському національному університеті радіоелектроніки на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології при викладанні дисциплін Комп'ютерні системи керування рухомими об'єктами та Автоматизовані системи керування роботизованим виробництвом (акт від 6 лютого 2021 року). Також інформаційно-логічна модель робочого простору, функціональна модель взаємодії об'єктів, метод адаптивного

візуального керування впроваджені у наукову діяльність у ННЦ «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М.С. Бокаріуса» (акт від 26 червня 2021 року).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати дисертаційної роботи сформовані і одержані автором особисто. Всі основні результати опубліковані в роботах [1-38]. Роботи [7-8], [13] опубліковані одноосібно. В роботах, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1] – визначено основні властивості візуального цілевказання, визначено основний метод зшивки зображень для багатозонової системи комп'ютерного зору, визначено основні алгоритми перетворення координат; [2] – розроблено математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення для інформаційно-логічної моделі робочого простору; [3] – вдосконалено структурну схему адаптивного візуального керування; [4] – сформульовано основні вимоги до моделі та методу адаптивного візуального керування; [5] – запропоновано інформаційно-логічну модель агентно-орієнтованого виробництва; [6] – розроблено програмні методи ідентифікації та розпізнавання виробничого агента в робочому просторі гнучкої інтегрованої системи; [9] – сформульовано основні вимоги до побудови функціональної моделі ГВС для виробничого роботизованого агента; [10] – визначено окремі складові функціональної моделі ГВС для проєктування мехатронних систем; [11] – вдосконалено метод адаптивного керування мобільною платформою та проведено комп'ютерне моделювання; [12] – вдосконалено модель керування мобільним роботом у просторі ГВС; [14] – вдосконалені інформаційно-логічна модель та модель адаптивного керування мобільним роботом у просторі гнучкої інтегрованої системи, в тому числі на основі нечіткого підходу; [15] – вдосконалено інформаційно-логічну модель робочого простору за рахунок використання концепції інтернету роботизованих речей; [16] – вдосконалено модель розпізнавання та ідентифікації об'єктів у робочому просторі за рахунок впровадження програмних методів визначення рухів динамічних об'єктів; [17] – запропоновано використання інформаційно-логічної моделі для кібер-фізичного виробництва; [18] – вдосконалено інформаційно-логічну модель у складі інтелектуальної системи управління роботом; [19] – запропоновано використання інформаційно-логічної моделі для завдань автоматизованого проєктування. Усі співавтори із задекларованим особистим внеском Броннікова А.І. згодні. Задекларований особистий внесок здобувача в роботах, виконаних у співавторстві, відповідає темі та змістові дисертації.

**Апробація результатів дисертації** Основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і отримали схвалення на таких конференціях: 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL\*2019, DSMOLE\*2019 (Созополь, Болгарія); Proceedings of 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (Virtual Meeting, Італія); Міжнародній науково-практична конференція «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (Севастополь, 2010); Першій Всеукраїнській науково-практична конференція «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем» (Сєверодонецьк, 2011); Міжнародній науково-технічна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2011); Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012) (Харків, 2012); 5-ій міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку

інформаційно-комунікаційних технологій та засобів керування» (Харків, 2016); першій міжнародній науково-технічній конференції «Computer and information systems and technologies» (Харків, 2017); V Міжнародній науково-технічній Інтернет-конференції Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами (2018); 3-ій міжнародна науково-практична конференції «Computer and informational systems and technologies» (Харків, 2019); 1-ій міжнародній науково-технічній конференції Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives (Баку, 2019); 4-ій міжнародній конференції Manufacturing & Mechatronic Systems (Харків, 2020); міжнародній науково-технічній конференції Development of scientific and practical approaches in the era of globalization (Бостон, 2020); міжнародній науково-технічній конференції Actual Trends of Modern Scientific Research (Мюнхен, 2020); III International scientific-practical conference «Theory, science and practice» (Токіо, 2020); IV th International scientific and practical conference «Integration of scientific bases into practice» (Стокгольм, 2020); Internet-конференції Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами (Київ, 2020); The X th International scientific and practical conference «Trends in the development of modern scientific thought» (Ванкувер, Канада).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 38 наукових праць, з них 19 статей, у тому числі – 1 стаття у науковому фаховому виданні у Турецькій республіці (входить у Організацію економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР)); 16 статей в наукових фахових виданнях України з технічних наук; 2 статті у наукових виданнях інших держав; 19 тез доповідей, що опубліковані в матеріалах міжнародних наукових конференцій, з яких 2 включено до наукометричної бази даних Scopus.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, що містять основні результати роботи, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 222 сторінок, що включає 180 сторінки основного тексту, 77 рисунків (з них 60 рисунків займають площу на 30 сторінках), 6 таблиць, список використаних джерел зі 107 найменувань (на 13 сторінках) та 3 додатки (на 27 сторінках).

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи, які використовувалися при вирішенні завдань досліджень. Викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробацію, особистий внесок здобувача та публікації за темою дисертаційної роботи.

**Перший розділ** містить критичний огляд сучасного стану інтелектуального керування виробництвом, зокрема методів інтелектуального керування та навігації мобільними роботами, що працюють у складі ГІВС і виконують транспортувальні операції.

Аналіз сучасного стану ГІВС показав, що на цей час на багатьох виробництвах для транспортувальних операцій ще й досі використовується ручну працю, що

зменшує швидкість та ефективність цих операцій. Одночасно, набувають поширення ГІВС, де використовуються так звані AGV (Automated guided vehicles) – мобільні роботи (МР) або транспортувальні засоби, що працюють на основі інформації з сенсорної системи та на основі сенсорної системи керування.

Найбільш поширеними навігаційними системами для цих засобів є: лазерна, магнітна, природня, магнітна точкова, дротова, оптична навігації та навігація за допомогою комп'ютерного/технічного зору.

За результатами аналізу навігаційних систем з'ясовано, що для сучасного одиничного, дрібносерійного або серійного виробництва за умов гнучкості для навігації краще використовувати саме системи комп'ютерного зору, завдяки легкості їх інтеграції та здатності до швидкого переналагоджування.

Отже, актуальним завданням сучасних гнучких інтегрованих систем залишається забезпечення виконання виробничих функцій, спрямованих на підвищення ефективності виробництва за рахунок безперервності функціонування всієї системи.

Істотним недоліком ГІВС є відсутність можливостей систем керування робототехнічними платформами адаптуватися до змін робочого простору, що можуть відбуватися внаслідок динаміки виконання виробничих завдань, впливу людських факторів, потреб змін технології виробництва, виникнення різного роду нештатних ситуацій тощо. Система керування робототехнічною платформою, яка буде враховувати зміни робочого середовища і станів гнучкої інтегрованої системи має здійснювати спостереження за умовами виконання технологічних завдань, спостерігати за пересуванням персоналу та інших мобільних платформ, слідкувати за виникненням нештатних ситуацій і при необхідності, адаптувати процес виконання виробничих функцій в ГІВС в цілому. В якості такої системи пропонується система адаптивного візуального керування.

Адаптивне візуальне керування є перспективним напрямком, що може бути використаним на сучасних ГІВС для керування мобільними роботами, що виконують транспортувальні операції та промисловими роботами для виконання маніпуляцій. Головною перевагою таких систем є її гнучкість, що полягає у високій пристосованості та здатності до швидкого переналагодження виробничих ділянок.

Сформульовані мета та задачі дослідження, які полягають у розробці нових та удосконаленні існуючих моделей та методів адаптивного візуального керування, що забезпечують підвищення продуктивності, швидкодії та надійності робототехнічних засобів гнучких інтегрованих виробничих систем.

У **другому розділі** наведено розроблену інформаційно-логічну модель робочого простору, що відображає об'єкти ГІВС, характерні для завдань інтелектуального керування роботами та зв'язки між об'єктами, а також розроблено функціональну модель ГІВС, яка забезпечує опис взаємодії об'єктів на рівні виконання поставлених перед ГІВС виробничих, транспортувальних, сервісних, моніторингових, управлінських та інших завдань.

Для розв'язання завдань відображення зв'язків між об'єктами ГІВС, врахування дискретності та заповненості виробничого робочого простору (РП), визначення та врахування властивостей об'єктів, їх взаємодії, упорядкованості та сумісності, розроблено інформаційно-логічну модель робочого простору.



Інформаційно-логічна модель передбачає, що існує РП  $W_s$  робота  $Rb$ , що описується властивостями: геометричні розміри  $D(x, y, z)$ , набір приналежних простору об'єктів  $Obj$ , інтервал часу  $T_{param}$  існування РП:

$$W_s = \langle D(x, y, z), Obj, T_{param} \rangle \quad (1)$$

Дискретний характер робочого простору означає наявність координат об'єктів, що знаходяться в РП та коефіцієнту  $K_{FL}$  заповненості ділянки РП:

$$D(z, y, z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l d(x_i, y_j, z_k), K_{FL} \in [0, 1] \quad (2)$$

де  $d(x_i, y_j, z_k)$  – геометричні параметри осередку дискретного простору,  $K_{FL}$  – коефіцієнт заповнення осередку.

$$K_{FL} = \frac{S_{FL}(d(x, y, z))}{S(d(x, y, z))}, K_{FL} \leq 0.25 \quad (3)$$

де  $S(d(x, y, z))$  – площа осередку дискретного простору,  $S_{FL}(d(x, y, z))$  – заповнена частина осередку дискретного простору  $d(x, y, z)$ .

У робочому просторі ГІВС передбачається існування певних об'єктів  $Obj$  – верстати ( $Vr$ ), інструмент ( $Ins$ ), оснащення ( $Osn$ ), людина ( $Hum$ ), робот ( $Rb$ ), накопичувачі ( $Storage$ ), конвеєри ( $Conv$ ), пристрої моніторингу РП ( $Mon$ ):

$$\exists Vr \in W_s; \exists Ins \in W_s; \exists Osn \in W_s; \exists Hum \in W_s; \exists Rb \in W_s; \quad (4)$$

$$\exists Storage \in W_s; \exists Conv \in W_s; \exists Mon \in W_s$$

$$Obj = \langle Vr, Ins, Osn, Hum, Rb, Storage, Conv, Mon \rangle \quad (5)$$

З точки зору властивостей вся ГІВС може бути описана виразом:

$$FIS = \langle W_s, Rb, Vr, Ins, Osn, Hum, Storage, Conv, Mon \rangle \quad (6)$$

Всі властивості предметів можна записати у вигляді кортежів параметрів.

$$\forall v \in Vr, \exists v = \langle Type_{Vr}, D_{Vr}(x_{Vr}, y_{Vr}, z_{Vr}), PM_{Vr}, Sc_{Vr}, ID_{Vr} \rangle \quad (7)$$

$$\forall ins \in Ins, \exists ins = \langle Type_{Ins}, D_{Ins}(x_{Ins}, y_{Ins}, z_{Ins}), PM_{Vr}, ID_{Ins} \rangle \quad (8)$$

$$\forall o \in Osn, \exists o = \langle Type_{Osn}, D_{Osn}(x_{Osn}, y_{Osn}, z_{Osn}), ID_{Osn} \rangle \quad (9)$$

$$\forall h \in Hum, \exists h = \langle D_{Vr}(x_{Vr}, y_{Vr}, z_{Vr}), Mv_{Hum}(x_{HumMv}, y_{HumMv}, z_{HumMv}), \quad (10)$$

$$Per_{Hum}, Exp_{Hum}, Age_{Hum}, Qual_{Hum}, ID_{Hum} \rangle$$

$$\forall rb \in Rb, \exists rb = \langle D_{Rb}(x_{Rb}, y_{Rb}, z_{Rb}), Mv_{Rb}(x_{Rb}, y_{Rb}, z_{Rb}), Speed_{Rb}, \quad (11)$$

$$Cp_{Rb}(x_{cpRb}, y_{cpRb}, z_{cpRb}), ID_{Rb} \rangle$$

$$\forall storage \in Storage, \exists storage = \langle D_{Storage}(x_{Storage}, y_{Storage}, z_{Storage}), Type_{Storage}, \text{Quan}_{Storage}, ID_{Storage} \rangle \quad (12)$$

$$\forall conv \in Conv, \exists conv = \langle D_{Conv}(x_{Conv}, y_{Conv}, z_{Conv}), Type_{Conv}, \text{Quan}_{Conv}, Speed_{Conv}, ID_{Conv} \rangle \quad (13)$$

$$\forall mon \in Mon, \exists mon = \langle Camera_{Glob}, Camera_{Loc}, Sens \rangle \quad (14)$$

При цьому, система моніторингу складається з камер спостереження та сенсорів різного типу та призначення:

$$\forall cam \in Cam, \exists cam = \langle Inst_{pt}(x_{pt}, y_{pt}, z_{pt}), Angle_{View}, Resolution \rangle \quad (15)$$

Крім робочого простору ГІВС, де працює робот, існує і інший – простір складського устаткування *Warehouse*, який взаємодіє з ГІВС і має характеристики: геометричні параметри  $D_{Warehouse}(x_{Warehouse}, y_{Warehouse}, z_{Warehouse})$ , матеріали *Material* та готові продукти *Product*, також параметри транспортування *Transport*.

$$Warehouse = \langle D_{Warehouse}(x_{Warehouse}, y_{Warehouse}, z_{Warehouse}), Material, Product, Transport \rangle \quad (16)$$

Між усіма об'єктами РП ГІВС існують функціональні залежності, що забезпечують виконання функцій: виробничих  $F_{prod}$ , транспортувальних  $F_{trans}$ , керування  $F_{control}$ , сервісних  $F_{service}$ , моніторингових  $F_{Mon}$ .

Виробничі функції, що виконуються у *FIS* представимо у вигляді:

$$Product_i = F_{prod}(Material_i, Rb_i, Vr_i, Osn_i, Ins_i, Hum_i, Conv_i, Storage_i, t) \quad (20)$$

$$Transport_i = F_{trans}(Product_i, Rb_i, Material_i, Conv_i, Storage_i, t, vlc) \quad (21)$$

$$Control_i = F_{ctrl}(Product_i, Transport_i, Rb_i, Material_i, Conv_i, Storage_i, Hum_i, Ins_i, Osn_i, Warehouse_i, t) \quad (22)$$

$$Service_i = F_{service}(Rb_i, Conv_i, Storage_i, Hum_i, Osn_i, t) \quad (23)$$

$$Mon_i = F_{Mon}(\forall Obj, Obj \in W_s, t) \quad (24)$$

Виконання ГІВС своїх функцій означає виконання усіх завдань керування  $F_{FIS}$ , виробничих та транспортувальних функцій:

$$F_{FIS} = \langle F_{prod}, F_{trans}, F_{ctrl}, F_{Service}, F_{Mon} \rangle \quad (25)$$

Точність  $C_{FIS}$  та швидкість кожної функції ГІВС мають бути мінімальними за умови максимізації якості  $Q_{FIS}$  виконання завдань:

$$C_{FIS} = \min[C(F_{prod})] \cup \min[C(F_{trans})] \cup \min[C(F_{ctrl})] \cup \min[C(F_{Service})] \cup \min[C(F_{Mon})] \quad (26)$$

$$Q_{FIS} = \max[Q(F_{prod})] \cup \max[Q(F_{trans})] \cup \max[Q(F_{ctrl})] \cup \max[Q(F_{Service})] \cup \max[Q(F_{Mon})] \quad (27)$$

У **третьому розділі** представлено вдосконалений метод адаптивного візуального керування та отримала подальший розвиток модель керування мобільним роботом у просторі ГІВС.

Функціонування методу адаптивного візуального керування підтримується розробкою моделі розпізнавання та ідентифікації об'єктів, в тому числі, на основі нечіткого опису параметрів керування, а також отримала подальший розвиток модель розпізнавання та ідентифікації об'єктів ГІВС за допомогою методів комп'ютерного зору. Процедура розпізнавання та ідентифікації об'єктів записано у вигляді:

$$Rb_{sensor} \times Obj \equiv \begin{bmatrix} sensor_{11} & sensor_{12} & \dots & sensor_{1m} \\ sensor_{21} & sensor_{22} & \dots & sensor_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ sensor_{n1} & sensor_{n2} & \dots & sensor_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} param_{11} & param_{12} & \dots & param_{1k} \\ param_{21} & param_{22} & \dots & param_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ param_{m1} & param_{m2} & \dots & param_{mk} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} param'_{11} & param'_{12} & \dots & param'_{1k} \\ param'_{21} & param'_{22} & \dots & param'_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ param'_{n1} & param'_{n2} & \dots & param'_{nk} \end{bmatrix} \Rightarrow Obj' \quad (28)$$

де  $[sensor_{11}, sensor_{12}, \dots, sensor_{nm}]$  – множина сенсорів;  $[param_{11}, param_{12}, \dots, param_{mk}]$  – множина ознак;  $Param' = [param'_{11}, param'_{12}, \dots, param'_{nk}]$  – множина розпізнаних ознак;  $Obj'$  – множина розпізнаних об'єктів.

Також, отримала подальший розвиток модель керування мобільним роботом у просторі гнучкої інтегрованої системи на основі інформації глобальної системи комп'ютерного зору.

Побудова моделі керування мобільним роботом має виходити з наявності технічних особливостей конструкції шасі МР, наявності сенсорної системи певного рівня, здатності виконувати маніпуляції з об'єктами РП. Оскільки передбачається, що ключовим елементом сенсорної системи має бути система комп'ютерного зору, запропонована модель має зворотні зв'язки, що забезпечуються на основі отримання візуальної інформації.

Для опису функціонування системи керування мобільного робота за допомогою об'єктової системи комп'ютерного зору (ОСКЗ) пропонується схема керування (рис. 1) та для локальної системи комп'ютерного зору (ЛСКЗ) (рис. 2).

Головна розбіжність між системами полягає у тому, що для керування ОСКЗ використовується комп'ютер, а робот лише виконує команди керування від нього на основі інформації з об'єктової камери. ЛСКЗ виконує всі дії за допомогою процесору плати керування, встановленої на ній. Це може бути плата Raspberry Pi, ASUS Tinkerboard та подібні їм. Аналіз інформації та її інтерпретацію, всі розрахунки і формування керуючих впливів виконує комп'ютер *Computer*, а робот *Rb* – лише виконує ці впливи.

Вихідну інформацію для функціонування системи керування МР має надавати система підтримки прийняття рішень *DMS*. Вона попередньо генерує маршрут робота як послідовність цільових точок  $Sp_i(x_i, y_i, z_i)$ , або у випадку 2D-проекції –

$Cp_i(x_i, y_i, z_i = 0)$ . Весь шлях буде складатись з суми ділянок, які потрібно пройти роботу:  $Cp_i(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=0}^N Cp_i^j(x_i^j, y_i^j, z_i^j)$ .

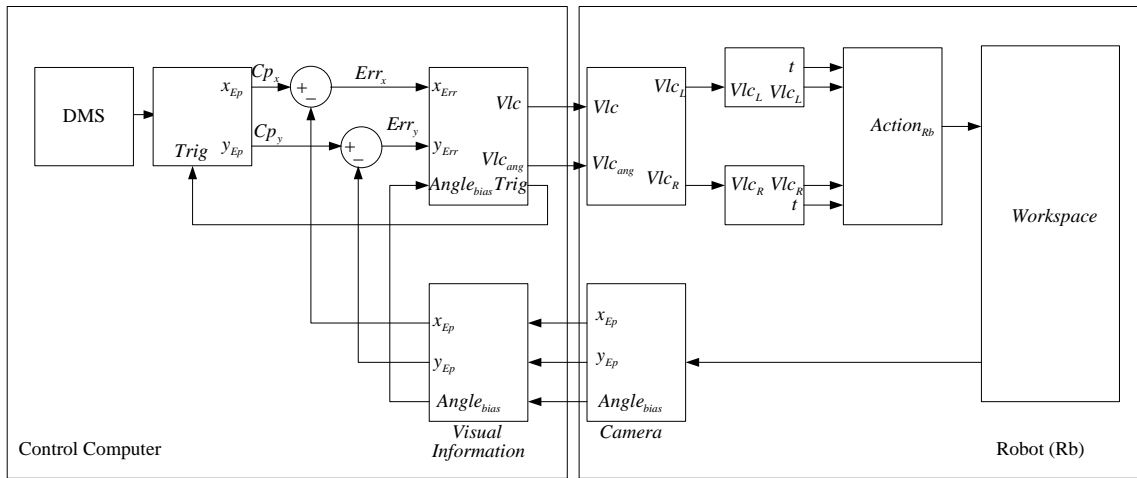


Рисунок 1 – Схема керування мобільним транспортувальним колісним роботом із зворотнім зв'язком за візуальним положенням з використанням ОСКЗ

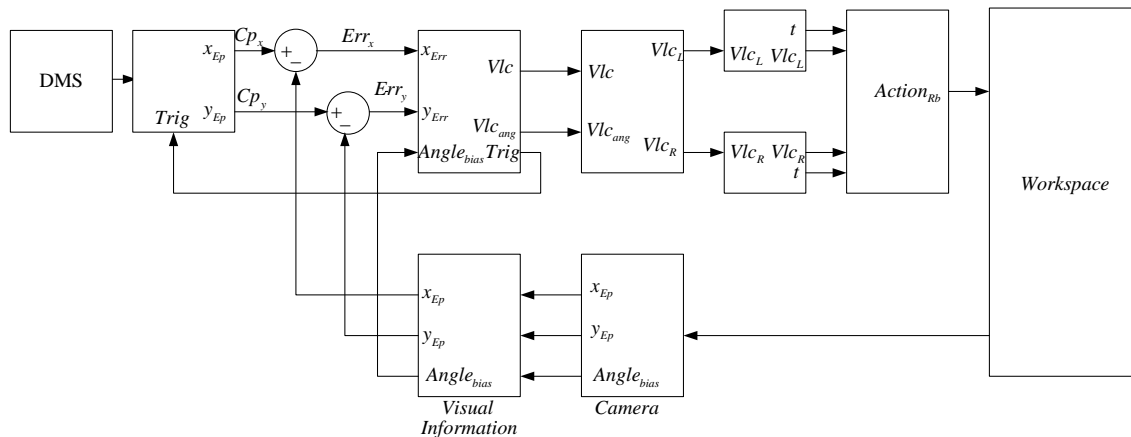


Рисунок 2 – Схема керування мобільним транспортувальним колісним роботом із зворотнім зв'язком за візуальним положенням з використанням ЛСКЗ

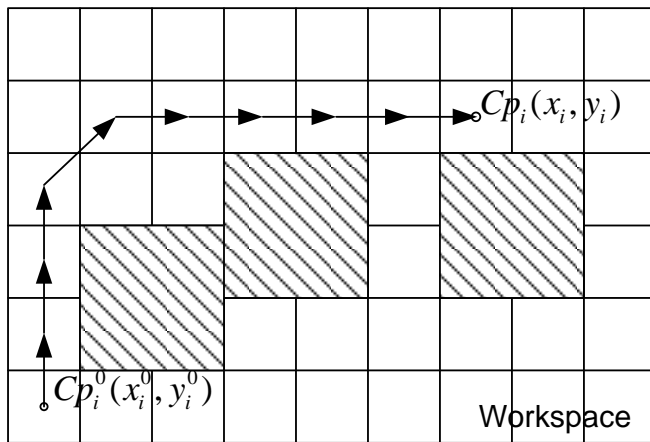


Рисунок 3 – Перехід у дискретному РП

Система позиціонування робота порівнює поточні координати робота  $Cp_i^0(x_i^0, y_i^0)$  з  $Cp_i^1(x_i^1, y_i^1)$  і знаходить різницю між ними, як  $Cp_i^1 Cp_i^0(x_i^1 - x_i^0, y_i^1 - y_i^0)$ . Таким чином знаходиться різниця координат  $\epsilon_x = (x_i^1 - x_i^0)$ ,  $\epsilon_y = (y_i^1 - y_i^0)$  (рис 3). Виходячи з того, що камера розташована об'єктивно, початкова точка  $Sp_{Rb}$  має координати  $(x_0; y_0)$ .

Оскільки весь шлях є дискретним, то між початковою та кінцевою точками визначаються проміжні точки  $Cp_i^0$ . Далі задається кінцева точка  $Ep_{Rb}$  маршруту з координатами  $(x_{Ep}; y_{Ep})$ . Під час реалізації маршруту практично завжди виникають похибки по осях –  $Err_x$  та  $Err_y$ , тому координати кінцевої точки з похибкою  $Ep_{Rb}^{Err}$  будуть мати значення  $(Err_x, Err_y) = (Cp_{ix}^n - Ep_x, Cp_{iy}^n - Ep_y)$ .

Наявність похибок не має перевищувати певний рівень дискретності робочого простору, тобто:  $(Err_x < k \times D_x; Err_y < k \times D_y)$ , де  $k \in [0, 0.25]$ .

Знаючи загальну швидкість робота, отримуємо час  $t$ , який потрібен роботу, щоб переміститись у кінцеву точку.

На основі кінематичної моделі двоколісного МР розраховуються величини лінійної та кутової швидкостей:  $\dot{x} = \cos \alpha \times Vlc$ ,  $\dot{y} = \sin \alpha \times Vlc$ ,  $\dot{\alpha} = Vlc_{Ang}$ ,  $Vlc = \frac{K}{2}(Vlc_1 + Vlc_2)$ ,  $Vlc_{Ang} = -\frac{K}{2}(Vlc_1 - Vlc_2)$ , де  $(x, y)$  – координати колісного робота на площині,  $\alpha$  – кут повороту робота на площині,  $Vlc_{Ang}$  – кутова швидкість,  $Vlc$  – лінійна швидкість робота,  $Vlc_1$  та  $Vlc_2$  – лінійні швидкості правого та лівого коліс,  $K$  – коефіцієнт передавання приводу.

Виконання мобільним роботом переміщень із заданими швидкостями  $Vlc_L$  та  $Vlc_R$  на інтервал часу  $t$  означає виконання дій  $Action_{Rb}$ , що взаємодіють з командами керування роботом і виконують дії у робочому просторі *Workspace*.

Система комп'ютерного зору *Camera* отримує інформацію з робочого простору *Workspace*, а саме положення МР по осям  $(x_{Ep}; y_{Ep})$ , а також кут його повороту  $Angle_{bias}$  відносно осей координат.

Блок візуального керування *Visual Information* отримує ці координати та аналізує положення робота. Ці координати порівнюються з необхідними кінцевими і вираховується наступна точка переміщення в дискретному робочому просторі. Якщо вони різні, тоді поточні координати  $(x_{cur}; y_{cur})$  стають початковими координатами переміщення і весь процес повторюється знову, доки робот не прибуде в кінцеву точку переміщення. Далі відбувається переміщення у наступну точку дискретного простору. Якщо помилки немає, або вона компенсується і робот досяг цільової точки, встановлюється булевий тригер *Trig*, що сигналізує (*true*) про виконання завдання.

Метод адаптивного візуального керування, удосконалений третьому розділі, є описом сукупності прийомів та операцій, що у інтелектуальних системах керування роботами, у зв'язку із розв'язанням завдання переміщення мобільної платформи або маніпулятора, на основі отримання зорової інформації від систем комп'ютерного (технічного) зору.

Удосконалений метод може використовуватись як засіб постановки завдання мобільним транспортувальним роботом для виконання транспортувальних операцій в робочому просторі ГІВС та автоматизованих складів; промисловим роботам – для виконання маніпуляцій з об'єктами на окремому робочому місці пов'язаних з завантаженням/розвантаженням технологічного обладнання та його

обслуговуванням, а також у інших сферах, наприклад, візуальне цілевказання для наземних та повітряних дронів, систем автоматичного паркування транспортувальних засобів. Подання методу представлено нижче.

1. Розпізнати наявність та положення робота  $Rb$  у робочому просторі  $W_s$  за допомогою систем комп'ютерного (технічного) зору  $Camera$  ;
2. Вважати початковою точкою маршруту робота  $Rb$  поточне розміщення робота  $Sp_{Rb}$  у робочому просторі  $W_s$  ;
3. Здійснити перетворення системи координат  $Trans(Rb, Camera)$  камери  $Camera$  у систему координат робота  $Rb$  ;
4. Отримати цілевказання кінцевої точки  $Ep_{Rb}$  переміщення робота;
5. Здійснити перетворення  $Trans(Camera, Rb)$  системи координат камери у систему координат робота;
6. Проводити розрахунок шляху переміщення  $L_{Rb} = \sum_{i=0}^n L_{Rb}^i$  ;
7. Проводити поділ шляху на відрізки  $L_{Rb}^i$  у відповідності до дискретності робочого простору;
8. Отримати кути поворотів робота  $Angle_{Bias}$  ;
9. Отримати лінійні  $Vlc$  швидкості і кутової  $Vlc_{Ang}$  швидкості робота;
10. Проводити розрахунок керуючих впливів  $Control$  ;
11. Виконати керуючі впливи  $Control$  ;
12. Провести ідентифікацію  $I$  робота  $Rb$  у робочому просторі;
13. Забезпечити отримання поточних координат робота у просторі камери  $Cp(x_{cp}, y_{cp})$  ;
14. Перетворити  $Trans(Rb, Camera)$  систему координат камери у систему координат робота;
15. Порівняти поточні координати робота  $Cp(x_{cp}, y_{cp})$  та цільові координати  $Ep_{Rb}(x_{Rb}, y_{Rb})$  ;
16. Розрахувати похибки. Якщо похибка переміщення перевищує максимальну допустиму, перехід на крок 3;

$$Err_x = Cp_{ix}^n - Ep_x, Err_x > \varepsilon$$

$$Err_y = Cp_{iy}^n - Ep_y, Err_y > \varepsilon$$

17. Розрахувати похибки. Якщо похибка не перевищує максимальну допустиму, то робот досяг кінцевої точки маршруту;

$$Err_x = Cp_{ix}^n - Ep_x, Err_x < \varepsilon$$

$$Err_y = Cp_{iy}^n - Ep_y, Err_y < \varepsilon$$

Модель нечіткого адаптивного керування представлена схемою (рис. 4).

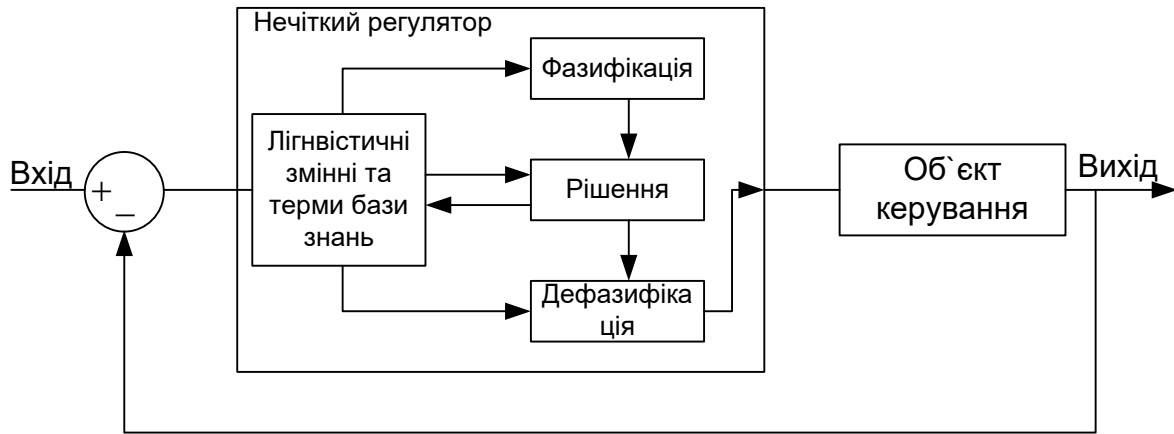


Рисунок 4 – Схема нечіткого адаптивного візуального керування

В якості алгоритму для нечіткого регулятора використано алгоритм Мамдані, який передбачає наступне: створення правил нечіткого виведення; формування бази, що зберігає правила нечіткого виводу; фазифікацію входних змінних; об'єднання умов у нечітких правилах; створення рішень для цих нечітких правил; об'єднання рішень з множини нечітких правил; дефазифікація вихідних змінних.

Створимо базу правил нечіткого виводу. Першою лінгвістичною змінною, що буде використовуватись на вході нечіткого регулятора є *Length* – довжина маршруту, яку потрібно пройти роботу для досягнення кінцевої точки. Термами цієї змінної є: *ShortLen* – мала відстань; *MiddleLen* – середня; *LargeLen* – велика.

Другою лінгвістичною змінною є *Angle* – кут повороту робота. Термами цієї змінної є: *LargeNeg* – великий негативний; *MiddleNeg* – середній негативний; *SmallNeg* – малий негативний; *Zero* – нульовий; *SmallPos* – малий позитивний; *MiddlePos* – середній позитивний; *LargePos* – великий позитивний.

Першою і другою лінгвістичними змінними на виході нечіткого регулятора є *VeloLeft* та *VeloRight* – швидкість лівого та правого коліс робота. Термами для них є швидкості: *Zero* – нульова; *LowSmallPos* – низька мала позитивна; *SmallPos* – мала позитивна; *LowMiddlePos* – низька середня позитивна; *MiddlePos* – середня позитивна; *LowLargePos* – низька велика позитивна; *LargePos* – велика позитивна; *VeryLargePos* – дуже велика.

Наявність списку необхідних лінгвістичних змінних забезпечує формування нечітких правил виведення, що можуть бути представлені у наступному вигляді:

$$\beta_1 = \langle Length, \{ShortLen, MiddleLen, LargeLen\}, [0...100], G_1, M_1 \rangle;$$

$$\beta_2 = \langle Angle, \{LargeNeg, MiddleNeg, SmallNeg, Zero, SmallPos, MiddlePos, LargePos\}, [-180...+180], G_2, M_2 \rangle;$$

$$\beta_3 = \langle VeloLeft, \{Zero, LowSmallPos, SmallPos, LowMiddlePos, MiddlePos, LowLargePos, LargePos, VeryLargePos\}, [0...100], G_3, M_3 \rangle;$$

$$\beta_4 = \langle VeloRight, \{Zero, LowSmallPos, SmallPos, LowMiddlePos, MiddlePos, LowLargePos, LargePos, VeryLargePos\}, [0...100], G_4, M_4 \rangle;$$

Лінгвістичні змінні мають відповідні функції приналежності.

Сукупність усіх правил  $Rules = \langle Rule_1, Rule_2, \dots, Rule_N \rangle$  є кортежем:

$Rule_1$  : if ( $Length = ShortLen$ ) and ( $Angle = Zero$ ) then  
 ( $VeloLeft = SmallPos$ ) and ( $VeloRight = SmallPos$ )

$Rule_{21}$  : if ( $Length = LargeLen$ ) and ( $Angle = LargeNeg$ ) then  
 ( $VeloLeft = LowMiddlePos$ ) and ( $VeloRight = LargePos$ )

На вхід моделі подаються довжина шляху та кут повороту робота, а на виході отримуються швидкості лівого та правого коліс, що забезпечує досягнення заданої точки маршруту. Оскільки вхідна інформація в системі керування може бути визначена у вигляді елементів терм-множин лінгвістичних змінних, доречним є використання нечітких регуляторів в системах керування мобільними роботами.

У четвертому розділі виконано моделювання запропонованих моделей і методу в середовищі GNU Octave. Запропонована на рис. 5 структурна схема адаптивної системи керування мобільним роботом складається з об'єкта керування  $Obj_{Con}$ , регулятора  $regulator$ , еталонної моделі  $E_{mod}$ , сигналу помилки  $Error$ , контуру самоналаштування  $STuning$ . Досліджувались системи з одним та з двома двигунами.

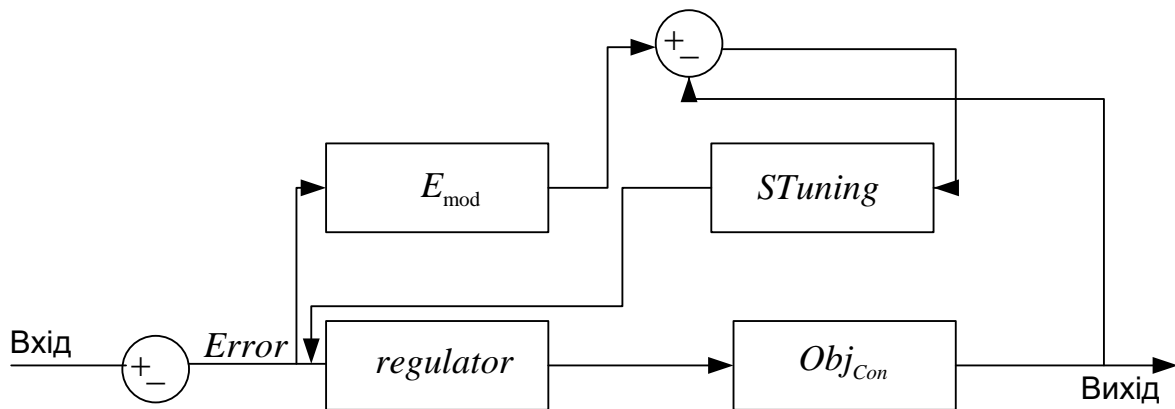


Рисунок 5 – Загальна схема адаптивної системи керування двигунами

У разі зміни параметрів об'єкта керування при взаємодії з еталонною моделлю відбувається налаштування регулятора за допомогою контуру самоналаштування. Головною метою адаптації системи є мінімізація похибки  $Error = y_{E_{mod}} - y = 0$  на

виході. В якості еталонної моделі таку передавальна функція  $W_{E_{mod}}(s) = \frac{0.4446}{0.001s^2 + s}$ .

На практиці параметри двигунів можуть бути різними, як і їх передавальні функції.

Якщо для першого двигуна передавальна функція –  $W_0 = \frac{4.466}{779.4s^2 + s}$ , то зміна

параметрів другого двигуна на 5% дає передавальну функцію  $W_{02} = \frac{4.2427}{740.4s^2 + s}$ .

При зміні коефіцієнтів підсилення та постійної часу на 5% показники похибок теж змінилися на величину, максимальне значення якої дорівнює 0.02%, що теж свідчить про високий рівень адаптації (рис. 6). Також було проведено моделювання розрахунку швидкостей та крутного моменту переміщення робототехнічної платформи. Загальна схема розробленої системи представлена на рис. 7.



Початкова точка переміщення має 3 складових – координати робота (x, y) та початковий кут повороту відносно осі координат. Проміжними точками переміщення є точки дискретного простору, які складають шлях переміщення робота у робочому просторі. На основі цих даних, отримуються швидкості та кутова швидкість робота. Далі ці швидкості перетворюються в цільові швидкості для лівого та правого колеса.

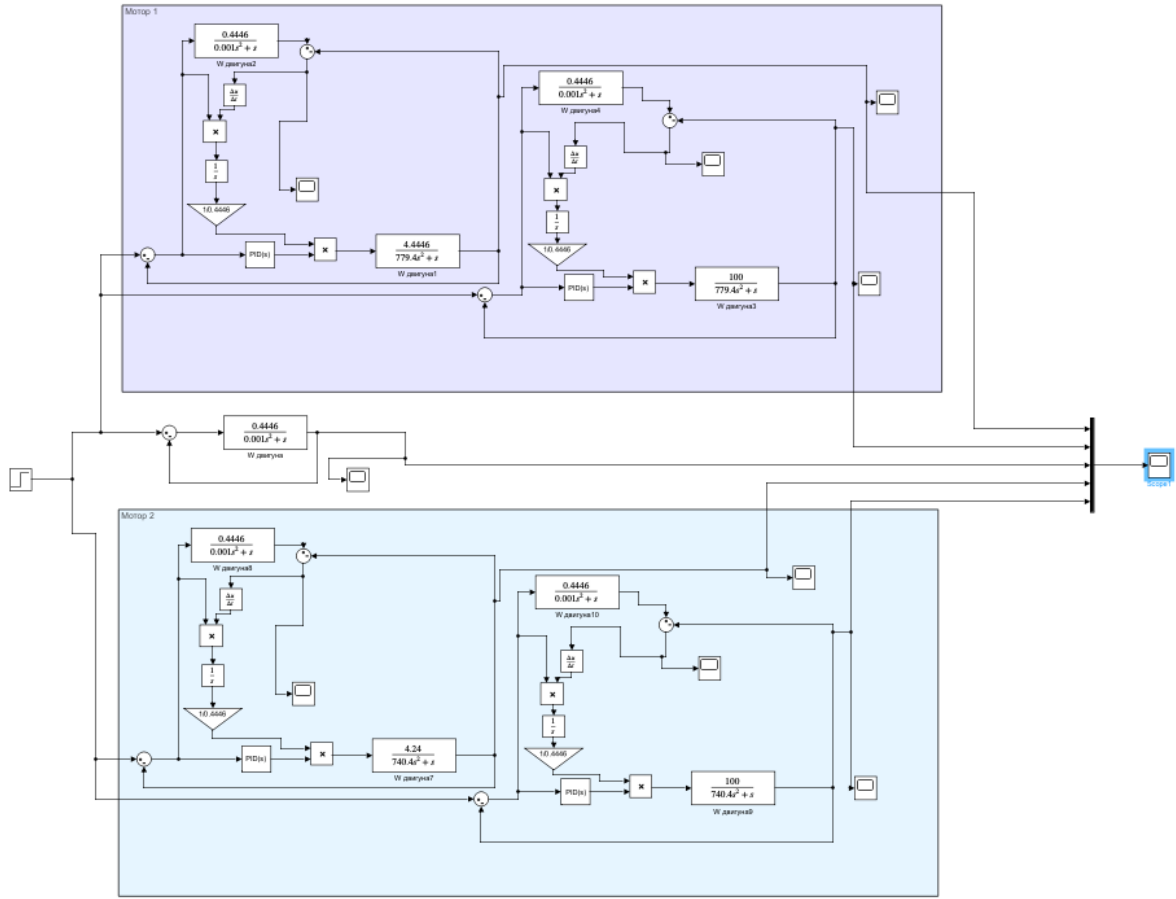


Рисунок 6 – Модель адаптивної системи для двох двигунів

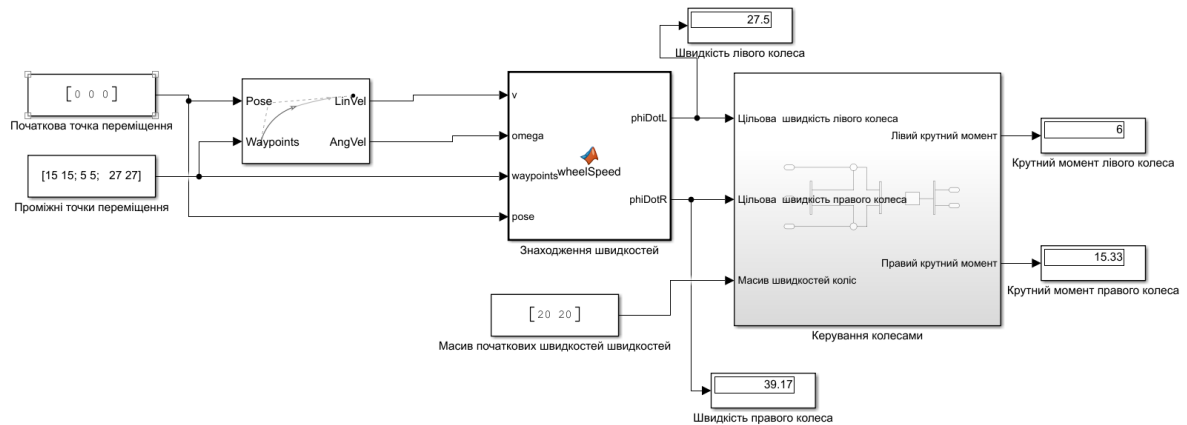


Рисунок 7 – Схема моделювання крутного моменту коліс

На основі отриманих швидкостей, із врахуванням початкових значень за допомогою ПД-регулятора, визначаються крутні моменти для лівого та правого коліс, які можна використовувати для переміщення робота у дискретному РП.

За допомогою GNU Octave створено схему системи нечіткого адаптивного керування роботом, представлена на рис. 8.

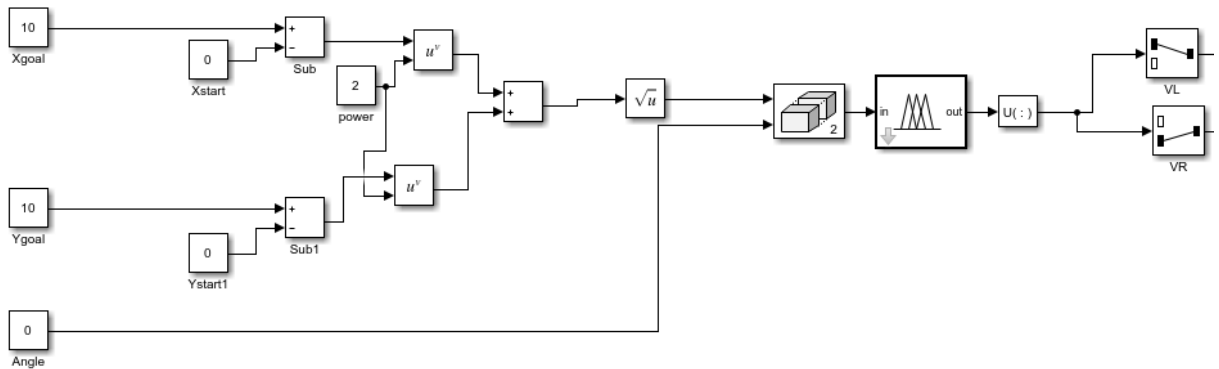


Рисунок 8 – Модель нечіткого адаптивного керування роботом

На основі цієї моделі забезпечено моделювання нечітких правил, визначених у другому розділі. Результати моделювання з вхідними показниками [50;40] та їх тривимірне подання представлені на рисунку 9.

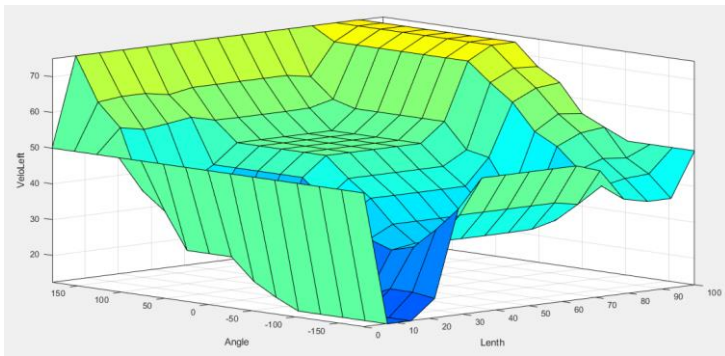


Рисунок 9 – Результати моделювання

Результати проведеного моделювання демонструють наявність залежності між вхідними (шлях переміщення та кут повороту) і вихідними параметрами (швидкості коліс робота), що може бути використане при нечіткому адаптивному керуванні мобільними транспортувальними роботами.

У п'ятому розділі наведено реалізацію програмного забезпечення для адаптивного візуального керування роботами.

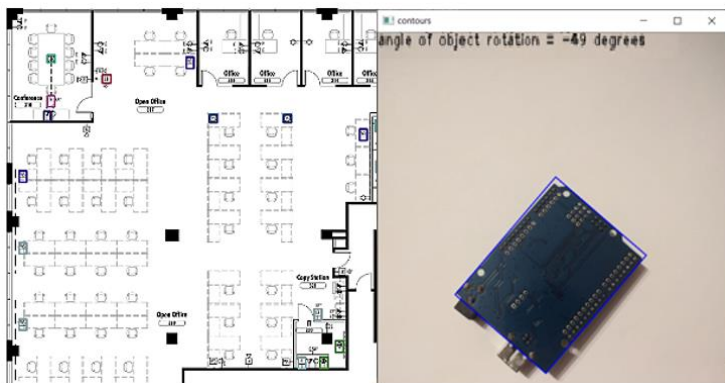


Рисунок 10 – Приклад робочого простору із розпізнаними об'єктами та їх характеристиками

Розроблене програмне забезпечення практично реалізує запропоновану у другому розділі інформаційно-логічну модель і модель розпізнавання та ідентифікації об'єктів у робочому просторі мобільного робота. Приклад робочого простору із розпізнаними об'єктами та їх характеристиками (клас об'єкта, кут повороту) представлено на рисунку 10.



Рисунок 11 – Переміщення робота Robotino у робочому просторі ГІВС

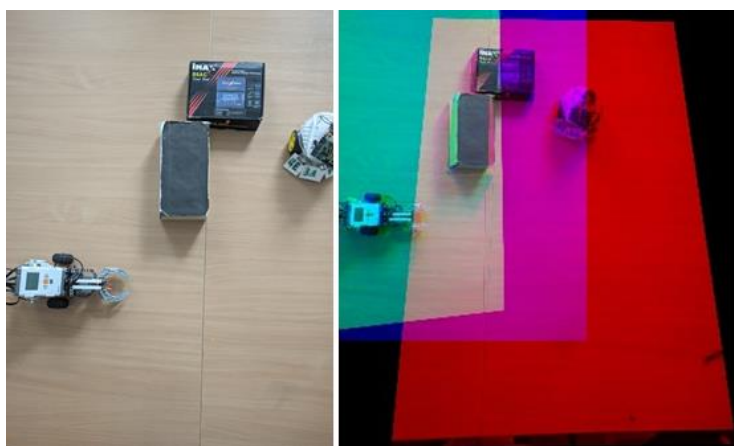


Рисунок 12– Робота з багатозоновим робочим простором

Тестування розробленого програмного забезпечення для адаптивного візуального керування мобільними роботами проводилось для платформ Lego NXT Mindstorms, FESTO Robotino 2.0 (рис 11), Arduino-роботів.

Візуальне цілевказання проводилось у вікні програмного інтерфейсу системи керування на спостережуваному зображенні РП.

Окремими функціями розробленого програмного забезпечення є робота з багатозоновими робочими просторами (рис 12). Об'єднання зображень проводилось з використанням алгоритмів SIFT та SURF.

Розроблене інформаційне, алгоритмічне та програмне забезпечення тестувалося у лабораторних умовах кафедри КІТАМ ХНУРЕ.

Результати тестування підтверджують доцільність розробки інформаційно-логічної моделі робочого простору мобільного робота, функціональної моделі, моделі розпізнавання та ідентифікації об'єктів робочого простору, методу адаптивного візуального керування роботами і підвищення швидкості введення координат мобільних роботизованих платформ до 25%.

У додатках наведено список публікацій за темою дисертації; код програми, що реалізує запропоновані моделі та метод адаптивного візуального керування мобільними роботами; акти про впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі розв'язана нова актуальна науково-практична задача розробки моделей та методу адаптивного візуального керування, що забезпечує підвищення продуктивності та швидкодії робототехнічних засобів гнучких інтегрованих виробничих систем.

Внаслідок проведення теоретичних та практичних досліджень отримано такі результати:

1. Проведено дослідження сучасного стану гнучких інтегрованих роботизованих систем, засобів адаптивного та інтелектуального керування показало наявність протиріччя між сучасним рівнем розробки технології і методів комп'ютерного зору та рівнем їх впровадження у системах інтелектуального керування мобільних та

маніпуляційних роботів. Обґрунтовано, що розробка моделей та методів адаптивного візуального керування мобільними роботизованими засобами, є своєчасною та актуальною задачею;

2. Вперше розроблено інформаційно-логічну модель робочого простору, що відображає об'єкти ГІВС, характерні для завдань інтелектуального керування роботами та зв'язки між об'єктами. Ця модель враховує дискретність та заповненість виробничого робочого простору; ґрунтується на інформації, отриманій від об'єктової системи комп'ютерного зору; визначає та враховує властивості об'єктів, що розміщуються в робочому просторі; враховує взаємодію, упорядкованість та сумісність об'єктів;

3. Вперше розроблено функціональну модель ГІВС, яка забезпечує опис взаємодії об'єктів на рівні виконання поставлених перед ГІВС виробничих, транспортувальних, сервісних, моніторингових, управлінських та інших завдань, та, ґрунтується на інформаційно-логічній моделі робочого простору враховує особливості технологічних операцій, містить детальний опис властивостей об'єктів та їх взаємодії, включає можливість кількісної оцінки вартості та якості робіт;

3. Вдосконалено метод адаптивного візуального керування, що описує сукупність прийомів та операцій, які слід застосувати у інтелектуальних системах керування роботів для планування завдання переміщень на основі отримання зорової інформації від систем комп'ютерного (технічного) зору та орієнтований на використання в мобільних робототехнічних системах;

4. Отримала подальший розвиток модель керування мобільним роботом у просторі ГІВС, що здійснює керування шасі двоколісного робота, та, на відміну від існуючих, функціонує на основі інформації від об'єктових/локальних систем комп'ютерного зору та виконує функції розпізнавання та ідентифікації об'єктів ГІВС, забезпечує розрахунок координат та швидкостей роботизованої платформи та інших об'єктів ГІВС, розрахунок лінійних та криволінійних траєкторій переміщень у дискретному робочому просторі, подання маршруту у вигляді послідовностей переміщень, забезпечує організацію керування транспортувальними роботами за їх візуальним положенням; містить нечітку складову з розгорнутим описом процедур формування лінгвістичних змінних, пов'язаних з динамікою руху мобільної роботизованої платформи та формалізує набір продукційних правил нечіткого регулятора;

5. Розроблено інформаційне та програмне забезпечення адаптивної візуальної системи керування мобільним транспортувальним роботом, яке реалізує запропоновані моделі і метод, практично забезпечує аналіз робочого простору за допомогою системи комп'ютерного/технічного зору, розпізнавання та ідентифікацію об'єктів робочого простору та робототехнічних засобів, отримання їх просторових координат, підтримку візуального цілевказання маршруту мобільного робота та функціонування інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень;

6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки, а також у наукову діяльність у ННЦ «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М.С. Бокаріуса».

**ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Artem Bronnikov, Nevliudov Igor, Oleksandr Tsymbal. Flexible manufacturing tendencies and improvements with visual sensing / *Eskisehir Technical University Journal of Science and Technology. Applied Sciences and Engineering*, 2019. Vol. 20, ICONAT issue, P. 77-83.
2. Цымбал А.М., Бронников А.И., Литвинова А.Е., Чернышенко О.Е. Технологии программирования и робототехника / *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, Харьков, 2009, № 3/2 (39), С. 56-60.
3. Цимбал О.М., Бронников А.И. Адаптивність у прийнятті рішень роботів / *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, Харьков, 2011, № 4/4 (52), С. 40 - 43.
4. Цимбал О.М., Бронников А.И. Адаптивні процеси у завданнях робототехніки // *Системи обробки інформації*, Харків. – 2012. – Вип. 3 (101), том 1, С. 68 -73.
5. Цимбал О.М., Бронников А.И., Куценко О.І., Шеін Є.С. Концепція інтелектуальних виробничих агентів та особливості її реалізації // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, Харьков, 2014, № 1/2 (67), С. 9 - 13.
6. Бронников А.И., Цимбал О.М., Фомовський Ф.М., Інтелектуальні засоби в системі керування виробничим агентом / *Технология приборостроения*. Харьков, 2014, № 2 , С. 26 - 30.
7. Бронников А.И., Методи пошуку оптимального керування / *Технология приборостроения*. Харьков, 2015, № 2 , С. 53 - 55.
8. Бронников А.И., Адаптивное визуальное управление производственным агентом / *Технология приборостроения*. Харьков, 2016, № 3 , С. 3 - 6.
9. Цимбал О.М., Бронников А.И., Нгуєн Т.М.Л., Бекметова А.О. Інтелектуальні виробничі системи та перспективи їх реалізації / *Технология приборостроения*. Харьков, 2016, № 1 , С. 29 - 34.
10. Бронников А.И., Цимбал О.М., Сінотин А.М. Мехатроніка у освітньому та загальнонауковому контексті / *Системи керування, навігації та зв'язку*. Полтава, 2017, № 2 (42) , С. 30 - 32.
11. Цимбал О.М., Бронников А.И. Прямий метод адаптації для керування робото технічною платформою. / *Технология приборостроения*. Харків, 2016, № 3, С. 19 - 21.
12. Nevlyudov I., Tsymbal O., Bronnikov A. Intelligent means in the system of managing a manufacturing agent / *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2018. № 1 (3). – С. 33-47.
13. Бронников А.И. Сучасний стан та перспективи розвитку гнучких інтегрованих систем / *Технология приборостроения*. Харьков, 2018, № 1 , С. 54 - 57.
14. Tsymbal O., Bronnikov A. Decision-making information technology for flexible integrated manufacturing / *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 2 (8). – С. 105-112.
15. Nevliudov I., Tsymbal O., Bronnikov A., Mordyk O. Internet of things for robotic projects / *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 3 (13). – С. 58-64.
16. Цимбал О.М., Замірець М.В., Мордик О.О., Бронников А.И., Корнілова Ю.Б. Інтелектуальні методи відеоспостереження: аналіз методів реалізації / *Технология приборостроения*. Харків, 2020, № 1, С. 35 - 40.

17. Igor Nevliudov, Vladyslav Yevsieiev, Murad Omarov, Artem Bronnikov and Viacheslav Liashenko. Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), Volume 8 No.10 (October 2020), pp: 7465 – 7473. ISSN 2347 - 3983 (DOI:10.30534/ijeter/2020/1278102020)

18. Цымбал А.М., Бронников А.И. Моделирование адаптивного принятия решений в ИСУ роботом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород. – 2013. – №4, С. 173-176.

19. V. Yevsieiev, A. Bronnikov. Development of databases interconnection “essences” information model for cyber-physical production systems additive cyber design creation automation // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, №3 (481), 2020р. pp.: 56- 62 ISSN 2311-3405 (Print), ISSN 2313-0415 (Online) (DOI: 10.15589/znp2020.3(481).7)

20. Oleksandr Tsymbal, Artem Bronnikov, Andriy Yerokhin. Adaptive Decision-making for Robotic tasks // Proceeding of IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL\*2019, DSMOLE\*2019: Scientific Workshop “Data Science in Modern Optoelectronics and Laser Engineering”, September 6-8, Sozopol, Bulgaria. – P. 594-597.

21. Oleksandr Tsymbal, Artem Bronnikov, Paolo Mercorelli. Decision-making models for Robotic Warehouse // Proceedings of 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Virtual Meeting, June 24-26, P. 546-551.

22. Цымбал А.М. Программное моделирование системы управления мобильным роботом / А.М. Цымбал, А.И. Бронников //: проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-технической конференции 6 – 10 сентября 2010 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2010. – С. 224 – 226.

23. Цимбал О.М., Бронников А.И. Особенности адаптивного визуального керування мобільними роботами // Перша Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем»: матеріали конференції. – Северодонецьк: Технол. Ін-т Східноукр. Нац. Ун-ту ім. В. Даля, 2011. – С. 26 – 28.

24. Цимбал О.М. Адаптивні методи та їх реалізація в робототехніці / О.М. Цимбал, А.И. Бронников // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції 23–28 травня 2011 р.: тези доп.– Київ, 2011.– С. 335.

25. Tsymbal A.M. Decision-making in Robotics and adaptive tasks / A.M. Tsymbal, A. I. Bronnikov // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012), Kharkov, Sept. 14-17, 2012. – P. 417-420.

26. Бронников А.И., Цимбал О.М. Интеллектуальное керування мобільним роботом в обмеженому робочому просторі // Матеріали 5-ї міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів керування». 21-22 квітня 2016 р. – Харків: ДП «ХНДІТП», 2016. – С. 33 – 34.

27. Цимбал О.М., Сінотін А.М., Бронников А.И. Интервальные засоби у моделі керування роботом // Матеріали першої міжнародної науково-практичної конференції

«Computer and informational systems and technologies». 20-22 квітня 2017 р. – Харків: ХНУРЕ, 2017. – С. 43-44.

28. Цимбал О.М., Бронніков А.І. Інтелектуальне керування гнучкою роботизованою системою // Матеріали першої міжнародної науково-практичної конференції «Computer and informational systems and technologies». 20-22 квітня 2017 р. – Харків: ХНУРЕ, 2017. – С. 45-46.

29. О.М. Цимбал, А.І. Бронніков. Формування стратегій прийняття рішень в завданнях робототехніки // Матеріали V Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2018 С. 213-214.

30. Цимбал О.М., Бронніков А.І. Інтернет роботизованих речей: огляд концепції // Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції «Computer and informational systems and technologies». 23-24 квітня 2019 р. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – С. 95-96.

31. Nevliudov Igor, Oleksandr Tsymbal, Artem Bronnikov. The Implementation of Manufacturing Agent's Concept for Flexible Production Systems // 1st International Scientific-Practical Conference - Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives 2019, 1-2 July 2019, Baku. – P. 187.

32. Vladyslav Yevsieiev, Artem Bronnikov, Analysis of architectural models for representing the integration of cyber-physical production systems hierarchical levels // Manufacturing & Mechatronic Systems 2020: Proceedings of IVth International Conference, Kharkiv, October 22-23, 2020: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] - Kharkiv .: [electronic version], 2020. - 146 p, pp:17-19.

33. Vladyslav Yevsieiev, Artem Bronnikov Analysis of the cyber-physical production systems implementation impact to achieve the goals of lean production //The II th International scientific and practical conference «Development of scientific and practical approaches in the era of globalization» (September 28-30, 2020). Boston, USA 2020. p.241. pp. 221-226. ISBN - 978-1-64945-867-4. (DOI: 10.46299/ISG.2020.II.II) (Google Scholar, Crossref)

34. Yevsieiev V., Bronnikov A. Analysis of the CMMI model application for solving the tasks of CPPS control processes automation development // The IV th International scientific and practical conference «Actual Trends of Modern Scientific Research» (11-13 October 2020) MDPC Publishing, Munich, Germany, pp.128- 132, 386p. ISBN 978-3-954753-02-4

35. Yevsieiev V., Bronnikov A. Information systems development methodologies application analysis for cyber-physical production systems development // III International scientific-practical conference “Theory, science and practice” (October 05-08, 2020), Tokyo, Japan, pp. 399-401, p.450, 2020. ISBN - 978-1-64945-868-1 (DOI: 10.46299/ISG.2020.II.III) (Google Scholar, Crossref)

36. Yevsieiev V., Bronnikov A. Analysis of the multi-agent systems application to solve the problem of cyberphysical production systems development // The IV th International scientific and practical conference «Integration of scientific bases into practice», (October 12-16, 2020), Stockholm, Sweden, pp. 459 – 462, 524. ISBN - 978-1-64945-864-3 (DOI:10.46299/ISG.2020.IV) (Google Scholar, Crossref)

37. Yevsieiev V., Bronnikov A. Structural model of a cyber-physical production system based on multi-agent systems analysis // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020 – 314 с. 312-313.

38. Yevsieiev V., Bronnikov A. (2020) Complexity development analysis of cyber-physical production systems for smart manufacturing // The X th International scientific and practical conference «Trends in the development of modern scientific thought» November 23-26, 2020 Vancouver, Canada. 789 p. pp. 699-703 (ISBN - 978-1-63649-921-5) (DOI - 10.46299/ISG.2020.II.X) (Google Scholar, Crossref).

## АНОТАЦІЯ

**Бронніков А.І. Моделі і методи адаптивного візуального керування роботами. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального завдання розробки моделей та методів адаптивного візуального керування мобільними роботизованими засобами.

Вперше розроблено інформаційно-логічну модель робочого простору, що відображає об'єкти ГІВС, характерні для завдань інтелектуального керування роботами та зв'язки між об'єктами, що враховує дискретність та заповненість виробничого робочого простору; ґрунтується на інформації, отриманій від об'єктової системи комп'ютерного зору; визначає та враховує властивості об'єктів, що розміщуються в робочому просторі; враховує взаємодію, упорядкованість та сумісність об'єктів. Також вперше розроблено функціональну модель ГІВС, яка забезпечує опис взаємодії об'єктів на рівні виконання поставлених перед ГІВС виробничих, транспортувальних, сервісних, моніторингових, управлінських та інших завдань та ґрунтується на інформаційно-логічній моделі робочого простору враховує особливості технологічних операцій, містить детальний опис властивостей об'єктів та їх взаємодії, включає можливість кількісної оцінки вартості та якості робіт.

Вдосконалено метод адаптивного візуального керування, що описує сукупність прийомів та операцій, які слід застосувати у інтелектуальних системах керування роботів для планування завдання переміщень на основі отримання зорової інформації від систем комп'ютерного (технічного) зору та орієнтований на використання в мобільних робототехнічних системах.

Отримала подальший розвиток модель керування мобільним роботом у просторі ГІВС, що здійснює керування шасі двоколісного робота, та функціонує на основі інформації від глобальних/локальних систем комп'ютерного зору та виконання функцій розпізнавання та ідентифікації об'єктів ГІВС, забезпечує розрахунок координат та швидкостей роботизованої платформи та інших об'єктів ГІВС, розрахунок лінійних та криволінійних траєкторій переміщень у дискретному



робочому просторі, подання маршруту у вигляді послідовностей переміщень, забезпечує організацію керування транспортувальними роботами за їх візуальним положенням; нечітка складова моделі містить розгорнутий опис процедур формування лінгвістичних змінних, пов'язаних з динамікою руху мобільної роботизованої платформи та формалізує набір продукційних правил нечіткого регулятора.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці інформаційного та програмного забезпечення адаптивної візуальної системи керування мобільним транспортувальним роботом, яке реалізує запропоновані моделі і метод, практично забезпечує аналіз робочого простору за допомогою системи комп'ютерного/технічного зору, розпізнавання та ідентифікацію об'єктів робочого простору та робототехнічних засобів, отримання їх просторових координат, підтримку візуального цілевказання маршруту мобільного робота та функціонування інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: Industry 4.0, Flexible Integrated System, автоматизація процесів керування, робототехніка, моделі, методи, адаптація, адаптивне візуальне керування.

## ABSTRACT

**Bronnikov A.I. Models and methods of robots adaptive visual control. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

Thesis for the degree of technical sciences candidate in specialty 05.13.07 – Automation of control processes. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to solving the urgent problem of developing models and methods of adaptive visual control of mobile robotic means.

For the first time, an information-logical model of the workspace has been developed that reflects the FIPS objects characteristic of the tasks of intelligent work control and communication between objects, taking into account the discreteness and fullness of the production workspace; based on information received from object computer vision systems; defines and takes into account the properties of objects placed in the workspace; takes into account the interaction, ordering and compatibility of objects. Also, for the first time, a functional model of the GIVS has been developed, which provides a description of the interaction of objects at the level of execution of production, transportation, service, monitoring, management and other tasks assigned to the FIPS and is based on the information-logical model of the workspace takes into account the peculiarities of technological operations, contains a detailed description of the properties objects and their interactions, including the ability to quantify the cost and quality of work.

The method of adaptive visual control has been improved, describes a set of techniques and operations that should be applied in intelligent control systems of robots for planning a movement task based on receiving visual information from computer (technical) vision systems and is focused on use in mobile robotic systems.

The model for controlling a mobile robot in the space of the FIPS, which controls the chassis of a two-wheeled operation, has been further developed, and operates on the basis of information from global / local computer vision systems and performs the functions of recognition and identification of FIPS objects, provides the calculation of coordinates and

speeds of the robotic platform and other FIPS objects, calculation of linear and curvilinear trajectories of movements in a discrete workspace, presentation of the route in the form of sequences of movements, ensures the organization of control of transporting works according to their visual position; the fuzzy component of the model contains a detailed description of the procedures for the formation of linguistic variables associated with the dynamics of the movement of a mobile robotic platform and formalizes a set of production rules for a fuzzy regulator.

The practical significance of the results obtained lies in the development of information and software for an adaptive visual control system for a mobile transport robot, which implements the proposed models and method, practically provides an analysis of the workspace using a computer / technical vision system, recognition and identification of objects in the workspace and robotic equipment, obtaining their spatial coordinates, support for visual target designation of the route of the mobile robot and the functioning of an intelligent decision support system.

**Key words:** Industry 4.0, Flexible Integrated System, automation of control processes, robotics, models, methods, adaptation, adaptive visual control.