

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СОРОКІН АНТОН РОМАНОВИЧ

УДК 681.3:004

ДИСЕРТАЦІЯ

ЛОКАЛІЗАЦІЯ ТА НАВІГАЦІЯ МОБІЛЬНИХ КОЛІСНИХ РОБОТІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ

05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту

технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

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

Науковий керівник

Удовенко Сергій Григорович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Сорокін А.Р. Локалізація та навігація мобільних колісних роботів з використанням методів обчислювального інтелекту – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 «Системи та засоби штучного інтелекту». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2019.

У дисертаційній роботі запропоновано рішення актуальної науково-практичної задачі розробки гібридних методів локалізації та навігації мобільних колісних роботів з застосуванням нечітких та нейромережевих моделей, що можуть бути ефективно використані у середовищах зі змінними властивостями.

Об'єктом дослідження в роботі є процеси локалізації та навігації мобільних об'єктів з застосуванням методів обчислювального інтелекту.

Методи дослідження в роботі основані на використанні: методів локалізації рухомих об'єктів в з використанням радіосигналів – для локалізації МР в будівлях з відомими картами приміщень; методів оптимізації маршрутів на графах – для визначення маршруту руху МР з використанням прискорених схем пошуку; методів фільтрації Калмана і Байєса – для локалізації положення МР за умов наявності шумів та відсутності пропріоцептивних даних; методів нечіткої логіки – для автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі; методів машинного навчання з підкріпленням – для покращення нечітких стратегій керування МР з використанням сигналів підкріплення; методів нейромережевого моделювання – для перевірки теоретичних результатів та практичної реалізації запропонованих методів.

В роботі запропоновано метод локалізації та навігації МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан автономної навігації.

Запропоновано метод автономної навігації МР в невідомому середовищі з комбінованим застосуванням нечіткої моделі і RL-методів, який дозволяє покращувати набір нечітких правил, використовуючи сигнали підкріплення.

Запропоновано удосконалення методу локалізації мобільних об'єктів з використанням технології iBeacon та даних акселерометра у просторі з відомими картами приміщень, що дозволяє скоротити кількість необхідних для локалізації передавачів.

Запропоновано удосконалення методу локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байеса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота за умов наявності або відсутності пропріоцептивних даних;

Запропоновано удосконалення методу автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі, який дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації.

В роботі набув подальшого розвитку метод визначення маршруту руху мобільних об'єктів з використанням модифікованого алгоритму Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам), що дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані теоретичні результати реалізовано за допомогою нових інтелектуальних процедур локалізації та навігації мобільних об'єктів, що забезпечує можливість їх ефективного використання в системах керування МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування. Результати тестування запропонованих методів та відповідних

обчислювальних процедур підтверджують її працездатність та перспективи практичного застосування (акт ТОВ «Автомейшн Систем» від 12.01.2017р.). Окремі положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи використано в навчальному процесі для підготовки та модифікації курсу «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці», а також у курсовому та дипломному проектуванні на кафедрі електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки, що підтверджено відповідним актом (акт від 12.09.2018 р.).

За матеріалами дисертації опубліковано 18 печатних робіт, у тому числі: 9 статей (з них 4 статті у наукових фахових виданнях України та 1 стаття у Scopus) та 9 тез доповідей конференцій.

Ключові слова: мобільний робот, локалізація положення мобільних об'єктів, дистанційне керування рухом мобільного роботу; автономна навігація мобільного роботу, фільтрація Калмана, нечіткий регулятор, стратегії управління, нечіткий регулятор, керування з підкріпленням навчанням, гібридний метод навігації

Список публікацій здобувача

1. Рустинів В.А. Комбинированный метод локализации подвижных объектов / В.А. Рустинів, А.Р. Сорокин // Радиоэлектроника и информатика. 2014. – № 4. С. 83 - 88.

2. Удовенко С.Г. Гибридный метод фильтрации в задачах локализации мобильных роботов / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 10(135). – С.248 - 254

3. Удовенко С.Г. Стратегии нечеткого управления колесным мобильным роботом / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 5(142). – С.42 - 49

4. Удовенко С.Г. Нечеткое управление автономным мобильным роботом с подкрепляемым обучением / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 8(145). – С.56 - 62.

5. Udovenko S. Localization and navigation of mobile robots in the environment with variable properties / S. Udovenko, A. Sorokin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/9(98). – 2019. – Pp. 29 - 36. (стаття) Scopus.

6. Шеховцов Б.В. Оптимальное управление движением робота-транспортера / Б.В. Шеховцов, В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2012. – С.135 - 141.

7. Шеховцов Б.В. Оптимальное планирование пути для мобильных объектов / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2013. – С.196 - 199.

8. Рустин В.А. Система локализации и планирования пути мобильных агентов в зданиях / В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, И.А. Тавадзе, Б.В. Шеховцов // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2014. – С.3 - 7.

9. Рустин В.А. Методы локализации мобильных объектов внутри помещений с использованием IOS платформы / В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, И.А. Тавадзе, Б.В. Шеховцов // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2014. – С.106 - 110.

10. Шеховцов Б.В. Оптимальное управление движением робота-транспортера / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : матеріали

2-ї міжнар. наук.-техн. конф., 2011. – Київ : ДП «ЦНДІ НіУ» ; Харків : ДП «ХНДІ ТМ» ; Київ : КДАВТ, 2011. – С. 52-53.

11. Шеховцов Б.В. Обоснование выбора алгоритма поиска кратчайшего пути в задачах навигации мобильных объектов / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : материалы XVII Междунар. молодежного форума,– Харьков : ХНУРЭ, 2013. – Т. 5 . – С. 238-239.

12. Удовенко С.Г. Управление мобильным роботом с RL-обучением при наличии перемещаемых препятствий / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 5 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку-Кировоград- Харьков. – 2015. – С. 25-26.

13. Rustinov V.A.. Selection of technology for building an indoor localization and tracking system / V.A. Rustinov., A.R. Sorokin // 13th International conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics». –Lviv-Poljana. –2015. – P. 178-181.

14. Удовенко С.Г. Оценивание навигационных параметров в системе управления роботом / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 4-й Міжнародної науко-технічної конференції «Інформаційні системи і технології» (ИСТ-2015). – Харьков. –2015. –С. 157-158

15. Удовенко С.Г. Нейро-нечеткое ANFIS-управление мобильным роботом / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 6 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку- Кировоград- Харьков. – 2016. – С. 29

16. Удовенко С.Г. Комбинированный метод навигации мобильных объектов в среде с изменяемыми свойствами / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин, А.О. Смеркус // Матеріали 8 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку- Харьков-Жиліна. – 2018. – С. 33

17. Удовенко С.Г. Комбінований метод локалізації та навігації мобільних роботів у середовищі зі змінними властивостями / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Збірник наукових праць за матеріалами II міжнародної науково-практичної конференції «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці» – Харків, ХНАДУ, 2018. – С. 154-156

18. Udovenko S.G. Modeling of mobile robots adaptative control / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Матеріали 6-ї Міжн. науково-техн. конф. «Проблеми інформатизації». – Черкаси-Баку-Бельско-Бяла-Харків (14-16.11.18). –2018. – С. 51-52 (тези)

ABSTRACT

Sorokin, A. Localization and navigation of mobile wheel robots using computational intelligence methods. – Qualifying scientific work on the manuscript rights.

A thesis for the candidate degree in technical sciences in the specialty 05.13.23 – systems and means of artificial intelligence. – Kharkiv National University of Economics them. Semen Kuznets, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2019.

In dissertation work the solution of the actual scientific and practical task of developing hybrid methods of localization and navigation of mobile wheel robots with the use of fuzzy and neural network models that can be effectively used in environments with variable properties is proposed.

The object of research in work is the processes of localization and navigation of mobile objects with the use of methods of computing intelligence.

Methods of research in work are based on the use of: methods of localization of moving objects in using radio signals - for the localization of MP in buildings

with known maps of premises; methods of optimizing routes in graphs - to determine the route of motion of MP using accelerated search patterns; Kalman and Bayes filtration methods - to localize the position of MR in the presence of noise and lack of proprioceptive data; methods of fuzzy logic - for autonomous navigation of MPs in an unknown environment with the obstruction of interference with the use of fuzzy model; methods of machine learning with reinforcements - to improve fuzzy control strategies of MPs using reinforcement signals; methods of neural network modeling - to check the theoretical results and practical implementation of the proposed methods.

The paper proposes a method of localization and navigation of MPs in a medium with variable properties under the conditions of limited possibilities for remote control, which provides for the possibility of switching the mode of control of the robot to the state of autonomous navigation.

The method of autonomous navigation of MR in an unknown environment with combined application of fuzzy model and RL-methods is proposed, which allows to improve the set of fuzzy rules using reinforcement signals.

The improvement of the method of localization of mobile objects using iBeacon technology and accelerometer data in space with known maps of premises is proposed, which allows to reduce the amount of transmitters necessary for localization.

The improvement of the method of localization of AMP with the use of Kalman filtration and Bayes filtration procedures, which allows taking into account the features of localization of the robot's position in the presence or absence of proprioceptive data, is proposed.

The improvement of the method of autonomous navigation of MR in an unknown environment with obstacle bypassing with the use of fuzzy model, which allows to realize different types of behavior of the robot in the presence and absence of proprioceptive information.

In this work, the method for determining the route of mobile objects movement using the modified Jump Point Search algorithm has been further

developed, which allows reducing the number of computations required in comparison with the basic algorithms.

The practical value of the work is that the obtained theoretical results are realized with the help of new intelligent procedures of localization and navigation of mobile objects, which ensures the possibility of their effective use in control systems of the MR in a medium with variable properties under the conditions of limited possibilities for remote control. The results of the testing of the proposed methods and the corresponding computational procedures confirm its efficiency and prospects of practical application. Some provisions, conclusions and recommendations of the dissertation work are used in the educational process for the preparation and modification of the course "Embedded Systems in Intellectual Robotics", as well as in course and graduation designing at the Department of Electronic Computing Machines of the Kharkiv National University of Radio Electronics, which is confirmed by the relevant act.

Keywords: mobile robot, localization of the position of mobile objects, remote control of the movement of mobile work; autonomous mobile work navigation, Kalman filtration, fuzzy controller, control strategies, fuzzy controller, reinforced learning management, hybrid navigation method.

List of publications of the applicant

1. Rustinov V.A. Kombinirovannyi metod lokalizatsii podvizhnykh ob"yektov / V.A. Rustinov, A.R. Sorokin // Radioelektronika i informatika. 2014. – № 4. S. 83–88.

2. Udovenko S.G. Gibridnyy metod fil'tratsii v zadachakh lokalizatsii mobil'nykh robotov / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Sistemi obrobki ínformatsíi. – 2015. – Vip. 10(135). – S.248-254

3. Udovenko S.G. Strategii nechetkogo upravleniya kolesnym mobil'nyim robotom / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Sistemi obrobki ínformatsíi. – 2016. – Vip. 5(142). – S.42-49

4. Udovenko S.G. Nechetkoye upravleniye avtonomnym mobil'nyim robotom s podkreplyayemym obucheniyem / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // *Sistemi obrobki informatsii*. – 2016. – Vip. 8(145). – S.56-62

5. Udovenko S. Localization and navigation of mobile robots in the environment with variable properties / S. Udovenko, A. Sorokin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2/9(98). – 2019. – Pp. 29-36. (стаття) Scopus

6. Shekhovtsov B.V. Optimal'noye upravleniye dvizheniyem robota-transportera / B.V. Shekhovtsov, V.A. Rustinov, A.R. Sorokin, S.A. Rezvan // *Sbornik nauchnykh statey «Informatika, matematicheskoye modelirovaniye, ekonomika»* – T.2. – Smolensk, Smolenskiy filial RUK. – 2012. – S.135 – 141.

7. Shekhovtsov B.V. Optimal'noye planirovaniye puti dlya mobil'nykh ob'yektov / B.V. Shekhovtsov, A.R. Sorokin, S.A. Rezvan // *Sbornik nauchnykh statey «Informatika, matematicheskoye modelirovaniye, ekonomika»* – T.2. – Smolensk, Smolenskiy filial RUK. – 2013. – S.196 – 199.

8. Rustinov V.A. Cistema lokalizatsii i planirovaniya puti mobil'nykh agentov v zdaniyakh / V.A. Rustinov, A.R. Sorokin, I.A. Tavadze, B.V. Shekhovtsov // *Sbornik nauchnykh statey «Informatika, matematicheskoye modelirovaniye, ekonomika»* – T.2. – Smolensk, Smolenskiy filial RUK. – 2014. – S.3 – 7.

9. Rustinov V.A. Metody lokalizatsii mobil'nykh ob'yektov vnutri pomeshcheniy s ispol'zovaniyem IOS platformy / V.A. Rustinov, A.R. Sorokin, I.A. Tavadze, B.V. Shekhovtsov // *Sbornik nauchnykh statey «Informatika, matematicheskoye modelirovaniye, ekonomika»* – T.2. – Smolensk, Smolenskiy filial RUK. – 2014. – S.106 – 110.

10. Shekhovtsov B.V. Optimal'noye upravleniye dvizheniyem robota-transportera / B.V. Shekhovtsov, A.R. Sorokin // *Suchasni napryamy rozvytku informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy ta zasobiv upravlinnya : materialy 2-yi mizhnar. nauk.-tekh. konf., 2011. – Kyyiv : DP «TSNDI NiU» ; Kharkiv : DP «KHNDI TM» ; Kyyiv : KDAVT, 2011. – S. 52-53.*

11. Shekhovtsov B.V. Obosnovaniye vybora algoritma poiska kratchayshego puti v zadachakh navigatsii mobil'nykh ob'yektov / B.V. Shekhovtsov, A.R. Sorokin, S.A. Rezvan // Radioelektronika i molodezh' v XXI veke : materialy XVÍÍ Mezhdunar. molodezhnogo foruma,– Khar'kov : KHNURE, 2013. – T. 5 . – S. 238-239.

12. Udovenko S.G. Upravleniye mobil'nym robotom s RL-obucheniyem pri nalichii peremeshchayemykh prepyatstviy / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Materialy 5 Mizhnarodnoyi nauchn.-tekhn.konf. «Suchasni napryamky rozvytku informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy ta zasobiv upravlinnya». –Poltava-Baku-Kyrovohrad- Khar'kov. – 2015. – S. 25-26.

13. Rustinov V.A.. Selection of technology for building an indoor localization and tracking system / V.A. Rustinov., A.R. Sorokin // 13th International conference «The expierence of designing and application of CAD systems in microelectronics». –Lviv-Poljana. –2015. – P. 178-181.

14. Udovenko S.G. Otsenivaniye navigatsionnykh parametrov v sisteme upravleniya robotom / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Materialy 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnyye sistemy i tekhnologii» (IST-2015). - Khar'kov. –2015. –S. 157-158.

15. Udovenko S.G. Neyro-nechetkoye ANFIS-upravleniye mobil'nym robotom / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Materialy 6 Mizhnarodnoyi nauchn.-tekhn.konf. «Suchasni napryamky rozvytku informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy ta zasobiv upravlinnya». –Poltava-Baku- Kyrovohrad- Khar'kov. – 2016. – S. 29

16. Udovenko S.G. Kombinirovannyi metod navigatsii mobil'nykh ob'yektov v srede s izmenyayemyimi svoystvami / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin, A.O. Smerkus // Materialy 8 Mizhnarodnoyi nauchn.-tekhn.konf. «Suchasni napryamky rozvytku informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy ta zasobiv upravlinnya». –Poltava-Baku- Khar'kov-Zhylina. – 2018. – S. 33

17. Udovenko S.H. Kombinovannyi metod lokalizatsiyi ta navihatsiyi mobil'nykh robotiv u seredovyshchi zi zminnyimi vlastyivostyami / S.H.

Udoenko, A.R. Sorokyn // Zbirnyk naukovykh prats' za materialamy II mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Synerhetyka, mekhatronika, telematyka dorozhnykh mashyn i system u navchal'nomu protsesi ta nautsi» – Kharkiv, KHNADU, 2018. – S. 154-156

18. Udoenko S.G. Modeling of mobile robots adaptative control / S.G. Udoenko, A.R. Sorokin // Materialy 6-yi Mizhn. naukovo-tekh. konf. «Problemy informatyzatsiyi». – Cherkasy-Baku-Bel'sko-Byala-Kharkiv (14-16.11.18). –2018. – S. 51-52

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	15
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	23
1.1 Загальна характеристика задач локалізації та навігації мобільних роботів	23
1.2 Методи локалізації мобільних роботів	31
1.3 Методи навігації мобільних роботів	53
1.3.1 Методи пошуку найкоротшого шляху між заданими точками маршруту	53
1.3.2 Методи навігації мобільних роботів з використанням засобів обчислювального інтелекту	56
1.4 Висновки до розділу 1 і постановка завдань дисертаційного дослідження	60
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ КЕРОВАНИХ МОБІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	63
2.1 Локалізація мобільних об'єктів з використанням технології NFC	63
2.2 Локалізація мобільних об'єктів з використанням технології iBeacon	67
2.3 Гібридний метод фільтрації в задачах локалізації мобільних роботів	73
2.4 Висновки до розділу 2	90
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ	91
3.1 Визначення оптимальних маршрутів мобільних керованих роботів	91
3.2 Стратегії нечіткого керування рухом колісного мобільного робота	96
3.3 Нечітке керування рухом колісного АМР з підкріпленням навчанням	111
3.4 Висновки до розділу 3	122

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ	123
4.1 Експериментальне дослідження методів локалізації мобільних об'єктів	123
4.2 Експериментальне дослідження методів навігації мобільних роботів	129
4.2.1 Моделювання навігації мобільних роботів з нечіткими регуляторами	130
4.2.2 Моделювання навігації мобільних роботів з нечіткими регуляторами та підкріпленням навчанням	135
4.3 Використання результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі	138
4.4 Висновки до розділу 4	150
ВИСНОВКИ	152
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	154
Додаток А Акти впровадження	169
Додаток Б Список публікацій здобувача	172

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

МО – мобільний об'єкт;

МР – мобільний робот;

АМР – автономний мобільний робот;

ШНМ – штучна нейронна мережа;

GPS – Global Positioning System;

ЦОС – цифрова обробка сигналів;

RSSI – Received Signal Strength Indication

НР – нечіткий регулятор;

ФН – функція належності;

NFC – Near Field Communication;

JPS – Jump Point Search;

RL – reinforcement learning (навчання з підкріпленням);

ФК – фільтр Калмана.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Завдання локалізації та навігації є фундаментальними для ефективної експлуатації таких рухомих об'єктів, як мобільні роботи (MR) або інші мобільні керовані пристрої. Системи керування такими об'єктами (дистанційні чи автономні) мають бути обладнані засобами визначення місцезнаходження та алгоритмами визначення маршруту, яким потрібно слідувати, щоб досягти поставленої мети. Серед сучасних систем позиціонування і навігації слід виділити систему GPS (Global Positioning System), що має наземне та космічне устаткування. Локалізація MR всередині будівель стала актуальною завдяки розвитку навігації рухомих об'єктів у виробництві, оборонній промисловості, моніторингу надвичайних станів тощо. Глобальна система позиціонування GPS, яка найбільш широко використовується на відкритій місцевості, не може бути застосовувана для визначення місця розташування рухомого об'єкта в приміщеннях за умов відсутності прямої видимості між супутниками і приймачем. Крім того, перешкоди і джерела шумів всередині будівлі впливають на точність GPS. У зв'язку з цим в останні роки з'явилася нова задача в області позиціонування – локалізація і подальша навігація рухомих об'єктів в закритих приміщеннях, а також за умов, коли супутникові системи навігації не є ефективними. Існує ряд технологій, які використовуються для локалізації рухомих об'єктів всередині будівель, серед яких найбільш привабливим є застосування бездротових мереж, оскільки вони не вимагають додаткових витрат на створення інфраструктури. Задачі локалізації керованих рухомих об'єктів щільно пов'язані з задачами їх навігації. Для успішної навігації в просторі система навігації мобільних об'єктів (зокрема, колісних MR) має визначати маршрут, керувати параметрами руху, правильно інтерпретувати інформацію від сенсорів щодо середовища і відслідковувати поточні координати.

Останнім часом з'явилися численні наукові публікації, присвячені теоретичним дослідженням та практичному застосуванню методів обчислювального інтелекту в системах локалізації положення МР та керування їх рухом. Значний вплив на розвиток даного напрямку досліджень здійснили, зокрема, Безнос А.В., Жихарєв Д.Н., Бурдаков С.Ф., Гайдук А.Р., Зенкевич С.Л., Капустян С.Г., Нейдорф Р.А., Юрєвич Е.И., Ющенко А.С., Каляєв И.А., Пшихопов В.Х. Montaner M.B., Rigatos G.G., Tzafestas C.S., Lee T.L., Wu C.J., Khatib O., Quoy M., Moga S., Gaussier P., Janglova. D., Lumelsky V., Stepanov V., Mcisaac K.A., Patel R.V. та деякі інші вчені.

В останній час набуває актуальності задача навігації мобільних роботів (МР) в безперервному середовищі в умовах обмежених можливостей для дистанційного керування. Для складного навколишнього середовища, що динамічно змінюється, часто не вистачає технічних можливостей для автоматичного спостереження, аналізу ситуації і прийняття рішень МР без зіткнень з непередбаченими перешкодами. Траєкторія руху МР такого типу розраховується на основі аналізу доступної інформації, після чого реалізуються відповідні дії. Це особливо актуально в разі, коли в процесі руху дистанційно керований МР потрапляє в зону, недоступну для сигналів навігаційних датчиків. Перспективним є підхід, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан «автономна навігація». При цьому якість локалізації та навігації автономних МР (АМР) може бути підвищена за допомогою засобів обчислювального інтелекту (зокрема, нечітких та нейромережєвих моделей), що дозволяє проводити керування МР в складних динамічних середовищах. Відомі методи локальної навігації мають ряд недоліків, зокрема відхилення від оптимального маршруту, досягнення локальних мінімумів та складність локалізації АМР. Тому актуальною задачею є розробка моделей та методів інтелектуальних засобів керування АМР, які забезпечують вихід до цілі та підвищення стійкості маневрування в умовах невизначеності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано в рамках держбюджетної теми №ДР0110U000458 «Еволюційні гібридні методи і моделі інтелектуальної обробки інформації зі змінною структурою за умов невизначеності», що виконувалась у Харківському національному університеті радіоелектроніки, де автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – розробка гібридних методів локалізації та навігації мобільних колісних роботів з застосуванням нечітких та нейромережевих моделей, що можуть бути ефективно використані у середовищах зі змінними властивостями.

Для досягнення зазначеної мети в роботі вирішуються такі задачі:

- дослідження проблеми локалізації та навігації мобільних об'єктів з використанням сучасних інтелектуальних технологій та засобів;
- розробка методу локалізації мобільних об'єктів з використанням технології iBeacon та даних акселерометра у просторі з відомими картами приміщень, що дозволяє скоротити кількість необхідних для локалізації передавачів;
- розробка методу локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байеса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота за умов наявності або відсутності пропріоцептивних даних;
- розробка методу визначення маршруту руху мобільних об'єктів з використанням модифікованого алгоритму Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам), що дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами;
- розробка методу автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі, який дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації;
- розробка методу автономної навігації МР в невідомому середовищі з

комбінованим застосуванням нечіткої моделі і RL-методів, який дозволяє покращувати набір нечітких правил, використовуючи сигнали підкріплення;

– розробка методу локалізації та навігації МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан автономної навігації;

– моделювання роботи запропонованих методів та вирішення практичних задач.

Об'єкт дослідження – процеси локалізації та навігації мобільних об'єктів з застосуванням методів обчислювального інтелекту.

Предмет дослідження – методи локалізації та навігації мобільних колісних роботів у середовищах зі змінними властивостями з застосуванням нечітких та нейромережових моделей.

Методи дослідження: методи локалізації рухомих об'єктів в з використанням радіосигналів – для локалізації МР в будівлях з відомими картами приміщень; методи оптимізації маршрутів на графах – для визначення маршруту руху МР з використанням прискорених схем пошуку; методи фільтрації Калмана і Байеса – для локалізації положення МР за умов наявності шумів та відсутності пропріоцептивних даних; методи нечіткої логіки – для автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі; методи машинного навчання з підкріпленням – для покращення нечітких стратегій керування МР з використанням сигналів підкріплення; методи нейромережевого моделювання – для перевірки теоретичних результатів та практичної реалізації запропонованих методів.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні результати, які визначають наукову новизну дисертаційної роботи:

а) вперше:

– запропоновано метод локалізації та навігації МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного

керування, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан автономної навігації;

– метод автономної навігації МР в невідомому середовищі з комбінованим застосуванням нечіткої моделі і RL-методів, який дозволяє покращувати набір нечітких правил, використовуючи сигнали підкріплення.

б) удосконалено:

– метод локалізації мобільних об'єктів з використанням технології iBeacon та даних акселерометра у просторі з відомими картами приміщень, що дозволяє скоротити кількість необхідних для локалізації передавачів;

– метод локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байєса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота за умов наявності або відсутності пропріоцептивних даних;

– метод автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі, який дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації.

в) набув подальшого розвитку:

– метод визначення маршруту руху мобільних об'єктів з використанням модифікованого алгоритму Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам), що дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані теоретичні результати реалізовано за допомогою нових інтелектуальних процедур локалізації та навігації мобільних об'єктів, що забезпечує можливість їх ефективного використання в системах керування МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування. Результати тестування запропонованих методів та відповідних обчислювальних процедур підтверджують її працездатність та перспективи

практичного застосування (акт ТОВ «Автомейшн Систем» від 12.01.2017). Окремі положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи використано в навчальному процесі для підготовки та модифікації курсу «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці», а також у курсовому та дипломному проектуванні на кафедрі електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки, що підтверджено відповідним актом (акт від 12.09.2018).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. В опублікованих зі співавторами роботах здобувачу належать (нумерація зі списку публікацій здобувача): [1] – розробка гібридного методу машинного навчання в трейдингових системах, що базується на навчанні з підкріпленням та генетичній оптимізації; [2] – розробка методу локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байеса; [3] – розробка стратегій нечіткого керування мобільними роботами; [4] – розробка методу автономної навігації МР в невідомому середовищі з комбінованим застосуванням нечіткої моделі і методів навчання з підкріпленням; [5] – розробка методу локалізації та навігації МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан автономної навігації; [6] – удосконалення методу керування роботом-транспортном; [7] – розробка алгоритму визначення маршруту руху МР; [8] – удосконалення системи локалізації та визначення руху МР в будівлях; [9] – аналіз та синтез методів локалізації мобільних об'єктів з використанням IOS платформи; [10] – моделювання алгоритму керування роботом-транспортном; [11] – аналіз алгоритмів пошуку шляху МР; [12] – моделювання алгоритму керування МР з використанням навчання з підкріпленням; [13] – аналіз технологій локалізації МР в будівлях; [14] – розробка алгоритму оцінювання параметрів навігації МР; [15] – моделювання та тестування алгоритму нейро-нечіткого керування рухом МР; [16] – удосконалення методу навігації МР в середовищі зі

змінними властивостями; [17] – розробка комбінованого метод локалізації та навігації мобільних роботів; [18] – моделювання алгоритму адаптивного керування МР.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: 2-й, 5-й, 6-й та 2-й міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (Київ- Полтава-Баку-Кировоград- Харків, 2011, 2015, 2016, 2018); 13 міжнародній конференції «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics» (Lviv-Poljana, 2015); 17-му міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі» (Харків, 2013); 4-й міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні системи та технології» (Харків, 2015); 2-й міжнародній науково-практичній конференції «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці» (Харків, 2018); 6-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (Харків, 2018).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 18 друкованих праць, у тому числі: 9 статей (з них 4 статті у наукових фахових виданнях України та 1 стаття у Scopus) та 9 тез доповідей конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг дисертації становить 174 сторінок; обсяг основного тексту 153 сторінок; 88 ілюстрацій; 8 таблиць; список використаних джерел, що включає 126 найменувань та займає 15 сторінок; 2 додатки на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальна характеристика задач локалізації та навігації МР

Завдання локалізації та навігації є фундаментальними в роботі з такими рухомими об'єктами, як мобільний робот або інший мобільний пристрій. Системи керування (дистанційні чи автономні) мають бути обладнані засобами визначення місцезнаходження та алгоритмами визначення маршруту, яким потрібно слідувати, щоб досягти поставленої мети. Людині, в силу її інтелектуального розвитку і здатності орієнтуватися в просторі, зазвичай достатньо мати приблизні показники поточного розташування, тоді як роботу або мобільному пристрою найчастіше потрібна максимально можлива точність показань про його місцезнаходження.

Серед сучасних систем позиціонування і навігації слід виділити систему GPS (Global Positioning System), а також систему ГЛОНАСС (Глобальна Навігаційна Супутникова Система). Дані системи складаються з сукупності наземного і космічного устаткування. Космічне обладнання являє собою орбітальне угруповання, що складається з декількох (2-30) супутників, що випромінюють спеціальні радіосигнали. Наземна система управління і контролю включає блоки вимірювання поточного положення супутників і передачі на них отриманої інформації для коригування інформації про орбіти, а також апаратуру споживача супутникових навігаційних систем, яка використовується для визначення координат. На додаток до вищеописаних елементів слід додати наземну систему радіомаяків, що дозволяє значно підвищити точність визначення координат. Принцип роботи супутникових систем навігації заснований на вимірюванні відстані від антени на об'єкті (координати якого необхідно отримати) до супутників, положення яких

відомо з великою точністю.

Локалізація всередині будівель стала актуальною темою завдяки розвитку навігації рухомих об'єктів у виробництві, торгівлі, охороні здоров'я, освіті і т.д. За умови високої точності визначення місця розташування об'єкта реальним стає широкий спектр послуг по навігації і знаходженню об'єктів, а також з доставки різних вантажів з мінімальними витратами [1, 2].

Глобальна система позиціонування (GPS), яка найбільш широко використовується на відкритій місцевості, має недоліки, які не дозволяють застосовувати її для визначення місця розташування рухомого об'єкта в приміщенні. До основного недоліку можна віднести необхідність прямої видимості між супутниками і приймачем. Крім того, перешкоди і джерела шумів всередині будівлі впливають на точність GPS [3 – 5].

В останні кілька років роль згаданих систем позиціонування дещо падає в великих містах. Причиною цього є зростаюча щільність, висота і площа будівель. Стіни будівель є одними з ключових проблем в якості роботи даних систем позиціонування. Також, вищевказані системи не справляються з покладеними на них завданнями всередині таких, зазвичай великих будівель, як музеї, виставкові центри, навчальні заклади, торгові центри, лікарні. У зв'язку з цим в останні роки з'явилася нова глобальна задача в області позиціонування – локалізація і подальша навігація рухомих об'єктів (як людей, так і рухомої інтелектуальної техніки) в закритих приміщеннях, а також в тих умовах, в яких супутникові системи навігації за тими чи іншими причинами не працездатні (висока хмарність, вузькі вулиці).

Існує ряд технологій, які розроблялися для локалізації рухомих об'єктів тільки всередині будівель. До найбільш відомих можна віднести системи, засновані на таких технологіях, як RFID [6], Wi-Fi [7, 8], QR кодування тощо [9] Однак, вони не знайшли широкого застосування через високу вартість необхідного обладнання. У порівнянні з іншими технологіями привабливим є застосування бездротових локальних мереж (WLAN) для вирішення задачі локалізації, оскільки не вимагає додаткових витрат на створення

інфраструктури і забезпечує високу продуктивність [10].

На підтвердження актуальності даної проблеми в 2012 році був створений альянс InLocation Alliance, метою якого є розробка методів, технологій та програм для позиціонування об'єктів всередині приміщень. Учасниками даного альянсу є такі лідери світової індустрії, як Intel, Cisco, Sony, Nokia, Qualcomm, Broadcom тощо.

Задачі локалізації керованих рухомих об'єктів щільно пов'язані з задачами їх навігації. Безумовною, наприклад, є необхідність чіткого позиціонування МР в просторі, адже вони повинні мати чітке уявлення про те, де вони знаходяться в даний час і за яким маршрутом вони повинні слідувати, щоб досягти своєї мети. При цьому роботам або іншим рухомих об'єктам потрібна максимально можлива точність даних про їх місцезнаходження.

Для успішної навігації в просторі система керування роботом має вміти будувати маршрут, керувати параметрами руху (задавати кут повороту коліс і швидкість їх обертання), правильно інтерпретувати інформацію про оточуюче середовище, що отримується від сенсорів, і постійно відслідковувати свої поточні координати.

Вирішення цієї низки завдань має враховувати планування переміщення МР в середовищах різного типу (детермінованих, частково детермінованих або недетермінованих) з використанням наявних картографічних даних та даних, що надходять в реальному часі від сенсорних та навігаційних систем. При цьому локалізації та навігації МР безумовно залежить від: наявності апріорних даних щодо навколишнього середовища, де має переміщуватися МР згідно з можливими варіантами його маршрутів; можливістю забезпечення (в разі необхідності) режима автономного керування МР з використанням регуляторів та відповідного алгоритмічного забезпечення; використання сучасних технологій локалізації положення МР та сенсорних систем.

В роботі [11] запропоновано загальну функціональну схему керування

переміщенням мобільного робота, де реалізовано принцип багаторівневого управління (на стратегічному, тактичному і виконавчому рівнях) [12, 13, 14]. На рис. 1.1 наведено дещо модифікований варіант цієї схеми, що передбачає можливість здійснення локалізації та навігації МР як у дистанційному (з використанням оператора) так і в автономному режимах.

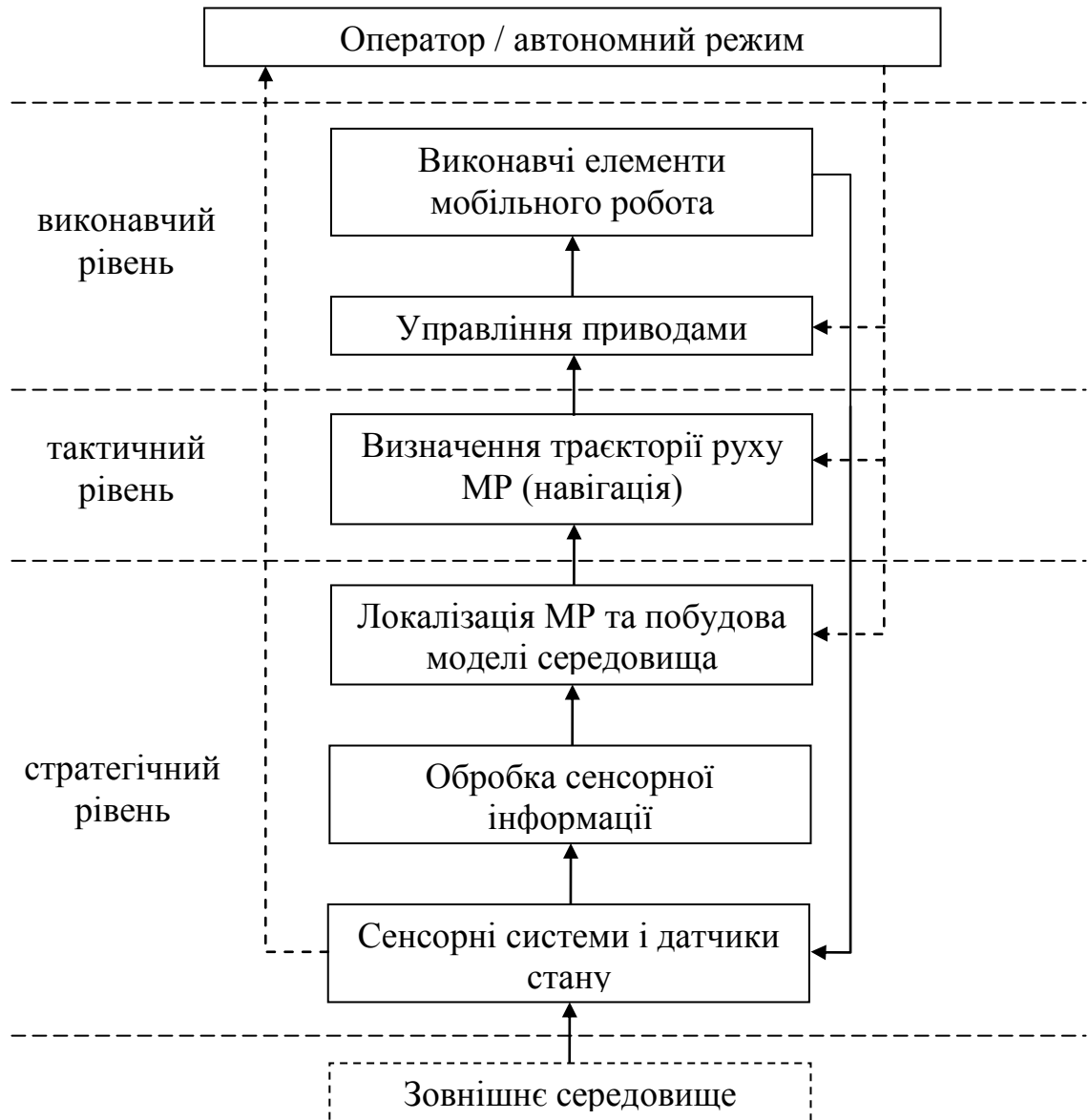


Рисунок 1.1 – Загальна схема локалізації та навігації МР

Функціями блоку «Сенсорні системи і датчики стану» є забезпечення зворотнього зв'язку за параметрами зовнішнього середовища і параметрами

стану МР для уточнення плану місцевості та корекції маршруту переміщення МР.

Функції оператора, що реалізуються в дистанційному режимі локалізації та навігації МР на кожному з рівнів наведеної вище схеми, можуть полягати або у генерації завдань та контролі їх виконання (на стратегічному рівні), або у безпосередньому керуванні його виконавчими елементами у поточному часі (виконавчий рівень).

В автономному режимі керування рухом роботу перекладається на його бортові системи локалізації та навігації.

В роботі [11] також наведено достатньо повну класифікацію систем керування МР за рівнем автономності, способом формування сигналів керування та типом руху (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Класифікація систем керування МР

Згідно з цим варіантом класифікації, за рівнем автономності системи

керування МР поділяються на системи ручного керування, системи автоматизованого керування та системи автоматичного керування.

Системи ручного керування базуються на використанні дистанційного режиму, де оператор (на стаціонарному або рухомому центрах управління) бере безпосередню участь в керуванні МР на виконавчому рівні. Крім того, у режимі дистанційного керування оператор вирішує поточні завдання з аналізу особливостей середовища, формування маршруту руху та команд керування МР. Недоліки дистанційного керування обумовлені, насамперед, невисокою завадозахищеністю каналів зв'язку з МР ризиком прийняття хибних рішень при повністю ручному управлінні внаслідок впливу людського фактору.

В системах автоматизованого керування деякі завдання локалізації та навігації МР, що не вимагають безпосереднього прийняття рішень, реалізуються в автоматичному режимі, а завдання, що вимагають остаточного прийняття рішень, реалізуються за участю оператора.

В системах автоматичного керування функції оператора обмежуються формуванням цілей керування МР та контролем їх виконання, тобто реалізують автономний режим навігації робота. В таких системах мають використовуватися як алгоритми керування переміщенням МР так і поточного планування траєкторій таких переміщень.

Нижній рівень класифікації систем автоматичного керування МР (рис. 1.2) передбачає їх поділ на системи програмного керування, адаптивного керування та інтелектуального керування.

Системи програмного керування можуть використовуватися, якщо зовнішні умови функціонування є повністю (тобто зовнішнє середовище є детермінованим), що дозволяє заздалегідь здійснювати детерміноване планування маршруту переміщення МР. Системи програмного керування переміщенням МР можуть додатково розділятися за типом руху на дискретні циклові, дискретні позиційні та безперервні [15].

В недетермінованих умовах переміщення МР, коли виникає

необхідність обходу під час руху перешкод різного типу, реалізувати програмне керування практично неможливо. Для виконання цього завдання необхідно оперативно отримувати інформацію про середовище для використання її при керуванні переміщенням в реальному часі.

Системи адаптивного керування МР мають поточну інформацію про зовнішнє середовище і положення робота та здійснювати корекцію структури або параметрів системи керування роботом згідно з відомими принципами адаптації [16 – 18]. При цьому можуть використовуватися параметрична адаптація (корегування деяких параметрів регуляторів МР в поточному часі), структурна адаптація (корегування структури законів керування, що використовуються в регуляторах МР, або комбінована (структурно-параметрична) адаптація.

Системи інтелектуального керування МР засновані на застосуванні методів обчислювального інтелекту і дозволяють організувати управління роботами в автономному режимі в умовах невизначеності щодо умов навігації [19 – 24]. Актуальною задачею синтезу таких систем є розробка моделей і інтелектуальних засобів керування автономними МР, які забезпечують вихід до цілі та підвищення стійкості маневрування. При цьому має братися до уваги необхідність уникнення роботами перешкод в динамічному середовищі. Використання інтелектуальних засобів в системах автономного керування МР дозволяє розширити їх функціональність за рахунок розв'язання в реальному складних інтелектуальних завдань локалізації та навігації, що важко формалізуються.

До методів обчислювального інтелекту, що можуть бути ефективно використані для синтезу систем інтелектуального керування автономними МР, слід, зокрема, віднести методи, що використовують нейромережеві моделі, нечітку логіку і машинне навчання з підкріпленням (RL-навчання) [25 – 35]. Відзначимо, що для реалізації цих методів для інтелектуального керування МР необхідним є використання сенсорних систем та сучасних технологій локалізації [36, 37].

Теорія нечіткої логіки характеризується здатністю моделювати та обробляти непевну та неточну інформацію в процесі розробки нечітких регуляторів (НР) руху автономних МР. У більшості нечітких логічних програм для навігації мобільних роботів математична модель динаміки зовнішнього середовища може безпосередньо не використовуватися в процесі проектування НР руху з наборами нечітких лінгвістичних правил «if-then». В структуру НР можуть бути включені механізми уточнення бази таких правил для підвищення ефективності визначення оптимальних параметрів руху МР.

Одним з таких механізмів є машинне навчання з підкріпленням. Навчання підкріплення – це метод покрокового знаходження оптимальних дій (стратегій), що доцільно застосовувати для кожної із ситуацій, в яких може опинитися МР, щоб максимізувати деяку формалізовану функцію винагороди. Існуючі методи навчання з підкріпленням, що реалізуються, зазвичай, з використанням нейромережових моделей, дозволяють формувати короткострокові стратегії визначення таких дій, які дозволять максимізувати довгострокову винагороду. Обчислювальні можливості нейромережового навчання з підкріплення дозволяють вважати його методом, придатним для вирішення завдань робототехніки.

Сутність машинного RL-навчання, що використовується для завдань навігації автономних МР, полягає в можливості використання сигналів підкріплення для підвищення якості навігаційних рішень в системах автономної навігації МР з застосуванням НР.

Таким чином, слід вважати доцільним комбіноване застосування методів локалізації та навігації МР в різних режимах їх експлуатації, зокрема: в режимі, що дозволяє безпосереднє застосування системи позиціонування GPS; в режимі локалізації мобільних об'єктів у просторі з відомими картами приміщень; в режимі автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі та RL-навчання, який дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота в умовах наявності і

відсутності пропріоцептивної інформації [38 – 40]. Відзначимо, що в подальшому будуть розглядатися колісні мобільні роботи, які є найпоширенішими типами МР завдяки їх простим механічним конструкціям і порівняно простішим управлінням, ніж для роботів з іншими засобами пересування.

1.2. Методи локалізації МР

Існує ряд підходів для локалізації рухомих об'єктів, але поки вони не знайшли широкого застосування через високу вартість або через недостатню точність [41 – 45]. Розглянемо деякі з цих методів.

Метод локалізації об'єктів по куту сигналу – це метод, призначений для визначення напрямку поширення радіосигналу пристроєм одержувача [46]. За допомогою даного методу можна визначити напрямок сигналу шляхом вимірювання різниці часу прийому сигналу від кількох антен. Таким чином, кут сигналу є кутом між напрямком поширення радіосигналу і деяким опорним напрямком (кут орієнтації). Опорний напрямок визначається як фіксований напрямок, від якого можна виміряти кут сигналу. Орієнтація вимірюється в градусах за годинниковою стрілкою від півночі. У разі, якщо опорний напрямок становить 0 градусів або напрямок вказує на північ, кут сигналу є абсолютним, у всіх інших випадках він є відносним.

Загальним підходом в отриманні вимірювань кута сигналу є використання антенних решіток в кожному передавальному пристрої. Деякі підходи для визначення та отримання кута між передавачем і приймальним пристроєм описані в [47]. Припустимо, що передавальні пристрої не мають інформації про їхнє становище в просторі і можуть визначити кут сигналу між сусідніми точками, використовуючи один з методів локалізації.

Орієнтація пристроїв з невідомим опорним напрямком може або не може бути відома на етапі розгортання системи. Локалізація об'єктів в обох випадках може бути реалізована за допомогою тріангуляції. Для початку

припустимо, що орієнтація передавальних пристроїв в просторі відома. На рис. 1.3 кути $Q1$ і $Q2$, які виміряні на невідомому пункті u є відносними кутами сигналу від передавальних пристроїв $b1$ і $b2$ відповідно.

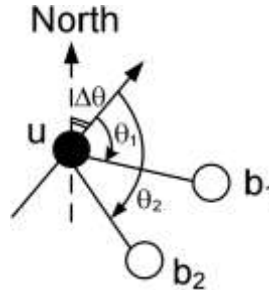


Рисунок 1.3 – Локалізація об'єктів з відомою орієнтацією

Якщо припустити, що орієнтація пристрою одержувача дорівнює ΔQ , тоді абсолютний кут сигналу від передавальних пристроїв $b1$ і $b2$ може бути розрахований як $(Q_i + \Delta Q) \pmod{2\pi}$, де $i = \{1,2\}$. Кожне абсолютний вимір відповідає передавальному пристрою і обмежує положення пристрою одержувача протягом променя між приймаючим і передавальним пристроями. Положення пристрою одержувача визначається перетином всіх променів, коли є два або більше неколінеарних передавальних пристроїв.

У разі, коли орієнтація пристрою одержувача не відома (коли абсолютний кут сигналу не може бути визначений), може бути використана різниця кутів сигналу. На рис. 1.4 кути $b1ub2$, $b1ub3$ і $b2ub3$ можуть бути розраховані з використанням даних про відносні кути сигналів.

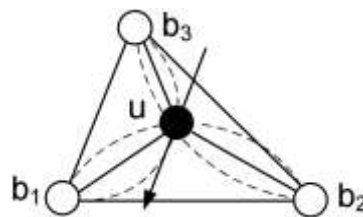


Рисунок 1.4 – Локалізація об'єктів з невідомою орієнтацією

Всі кути, під якими видно загальну хорду, рівні. Таким чином, дані дві точки і хорда, що з'єднує їх, а також дана третя точка, від якої хорду видно під фіксованим кутом і яка обмежена дугою кола. Наприклад, кут $b1ub2$ і хорда $b1b2$ обмежують положення пристрою одержувача u дугою, що проходить через $b1$, u і $b2$. Так як кожна хорда визначає одну дугу, положення пристрою одержувача знаходиться на перетині всіх дуг в разі доступності трьох або більше неколінеарних передавальних пристроїв. Даний метод може застосовуватися тільки за умови прямої видимості між передавачем і приймають пристроєм. Також слід зазначити, що для реалізації даного методу потрібні спеціалізовані приймаючі пристрої, чутливі до напрямку сигналу [48]. Ілюстрація даного методу показана на рис 1.5.

Розглянемо метод локалізації рухомих об'єктів за часом прийому сигналу. Час прийому сигналу – це час, протягом якого сигнал (зазвичай, це радіосигнал) пройшов від передавального пристрою до одного або декількох приймаючих пристроїв. Цим проміжком часу визначається затримка поширення сигналу, а також відстань між передавачем і приймаючим пристроєм.

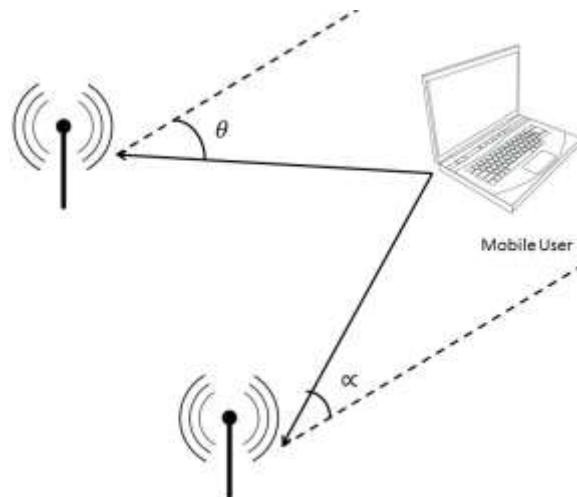


Рисунок 1.5 – Локалізація об'єктів за кутами сигналів

Використовуючи даний метод, можна знайти відстань між передавачем і приймаючим пристроєм. Для цього потрібно знайти значення затримки

поширення сигналу. Для того, щоб отримати дане значення, потрібно помножити час поширення сигналу на швидкість поширення сигналу. Далі отримане значення затримки конвертується у відстань між пристроями. Щоб отримати значення часу прийому сигналу і подальшого визначення положення пристрою одержувача в двовимірному просторі, потрібно не менше трьох передавальних пристроїв. Для визначення положення пристрою одержувача в тривимірному просторі потрібно не менше чотирьох передавальних пристроїв (рис. 1.6). У двовимірному просторі позиція пристрою одержувача може бути представлена у вигляді перетину декількох кіл, тоді як в тривимірному просторі позиція пристрою одержувача представляється у вигляді перетину декількох сфер [49].

Для того, щоб мати впевненість в вимірі пройденого часу $t_i - t_0$, лічильники передавального і приймаючого пристрою повинні бути синхронізовані. Відстань між приймаючим і передавальним пристроєм може бути розрахована за даними з використанням різних методів, проте слід зазначити, що даний процес супроводжується значною вартістю пристроїв.

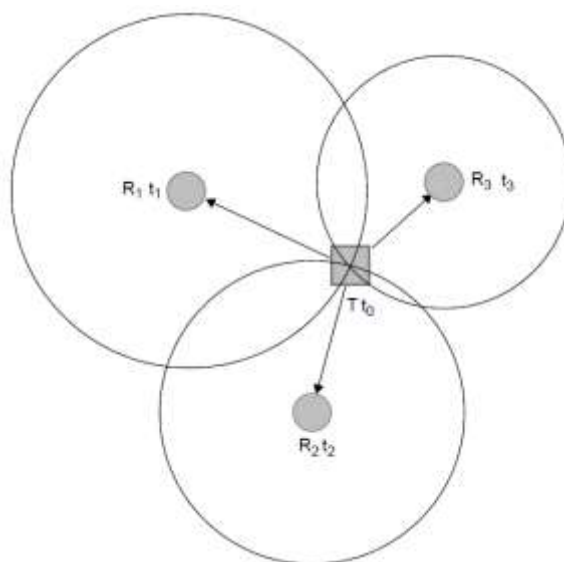


Рисунок 1.6 – Локалізація об'єктів за часом прийому сигналів

Для того, щоб досягти точності локалізації до масштабу наносекунд, що тягне за собою більш точні вимірювання відстані, потрібно розробити складну систему синхронізації датчиків, вартість якої буде настільки

високою, що не дасть використовувати даний метод в більшості установ. Крім того, для успішного процесу локалізації об'єктів потрібно як мінімум три передавальних пристрої, що також впливає на вартість системи, заснованої на даному методі.

Тоді, як метод локалізації об'єктів за часом прийому сигналу може бути представлений у вигляді перетину сфер з центральними точками відомих положень, метод визначення поточного місця розташування об'єктів з використанням різниці часу прийому сигналу може бути представлений як перетин гіпербол. Реалізація системи локалізації об'єктів, заснована на цьому методі, полягає у вимірюванні різниці часу передачі між сигналами, прийнятими від кожного передавального пристрою. Метод локалізації об'єктів по різниці часу прийому сигналу також відомий як тривимірне гіперболічне позиціонування.

У той час, як метод локалізації об'єктів з використанням часу прийому сигналу полягає в фіксуванні часу, за яке передавальний пристрій передає сигнал приймаючому пристрою, метод з використанням різниці часу прийому сигналу вимагає фіксації часу, за який сигнал був прийнятий пристроєм одержувача. Так само, як і перший метод, другий метод вимагає синхронізації передачі сигналів або за часом, або за відомою затримкою між передачею сигналів.

Для реалізації методу локалізації об'єктів по різниці часу прийому сигналу потрібно мінімум три або чотири передавальних пристроїв, розташованих в певному положенні. Кожен приймаючий пристрій приймає сигнал від передавального пристрою синхронно і потім фіксує час прийому сигналу. Дана інформація направляється до обчислювального пристрою для розрахунку різниці часу прийнятих сигналів між кожним з приймаючих пристроїв. Різниця часу перетворюється в певне положення пристрою одержувача в просторі. Математично, приймаючий пристрій знаходиться на перетині трьох гіпербол в двомірному просторі, тоді як приймаючий пристрій знаходиться на перетині трьох гіперболоїдів в тривимірному

просторі. Положення пристрою одержувача в тривимірному просторі показано на рис. 1.7.

Проблеми, пов'язані з методом локалізації об'єктів по різниці часу прийому сигналу, схожі з методом локалізації об'єктів за часом прийому сигналу. Метод різниці часу прийому сигналу вимагає синхронізації датчиків кожного з трьох передавальних пристроїв. Точність визначення місця розташування об'єкта відповідає точності датчиків, які використовуються в передавальних пристроях (велика точність датчиків в приносить до збільшення вартості системи). У більшості випадків датчики працюють асинхронно з відповідним впливом на точність у визначенні місця розташування об'єкта.

Крім того, метод локалізації об'єктів по різниці часу сигналу надзвичайно чутливий до багатопроменевого розповсюдження сигналу, шумів і інтерференції, що призводить до неточного перетину гіпербол.

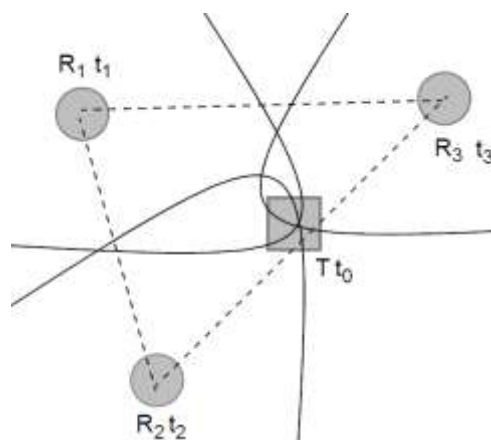


Рисунок 1.7 – Локалізація об'єктів за різницею часу прийому сигналів

Кращою є ситуація з прямою видимістю між передавачем і приймаючим пристроєм (використання даного методу в відкритому просторі, або в будівлях з великими відкритими приміщеннями) [50].

Для визначення положення об'єкта метод індикації рівня сигналу використовує одночасно кілька точок доступу, які відповідають набору

стандартів зв'язку IEEE 802.11. Потрібно як мінімум три точки доступу для використання даного методу. Для збільшення точності роботи даного методу використовують більш складні розширення методу індикації рівня потужності сигналу. Одним з таких розширень є метод побудови карт радіосигналів. Принцип роботи даного методу описаний нижче.

В системі локалізації об'єктів з використанням методу індикації рівня потужності радіосигналу відстань між об'єктом і точкою доступу визначається перетворенням значення потужності сигналу на приймальному пристрої в вимір відстані, заснований на відомій потужності вихідного сигналу на стороні передавального пристрою. Сервер, або оператор, призначений для обчислення поточного місця розташування об'єкта, реалізує алгоритм визначення місця розташування пристрою одержувача з використанням обчислених відстаней між приймаючим пристроєм і деякою кількістю передавальних пристроїв. Незважаючи на те, що процес визначення відстані між передавачем і приймаючим пристроєм істотно відрізняється від методу локалізації об'єктів за часом прийому сигналу, сам процес визначення розташування об'єкта будується на подібних алгоритмах.

Метод визначення поточного місця розташування об'єктів по індикації рівня потужності сигналу представлений на рис. 1.8. Передавальний пристрій позначено тут як T, а передавальні пристрої позначено як R1, R2 і R3. Потужність радіосигналів для кожного передавального пристрою позначено як S1, S2 і S3 відповідно. Для збільшення ефективності роботи даного методу потрібно забезпечити щільне розгортання передавальних пристроїв (точок доступу), що значно збільшує вартість системи. Проте основна проблема пов'язана з системами визначення поточного місця розташування об'єктів, заснованими на індикації рівня потужності сигналу, з пошуком стабільної моделі поширення і згасання радіосигналу як для умов прямої видимості між передавачем і приймаючим пристроєм, так і для умов відсутності прямої видимості між ними, а також в умовах динамічного навколишнього середовища.

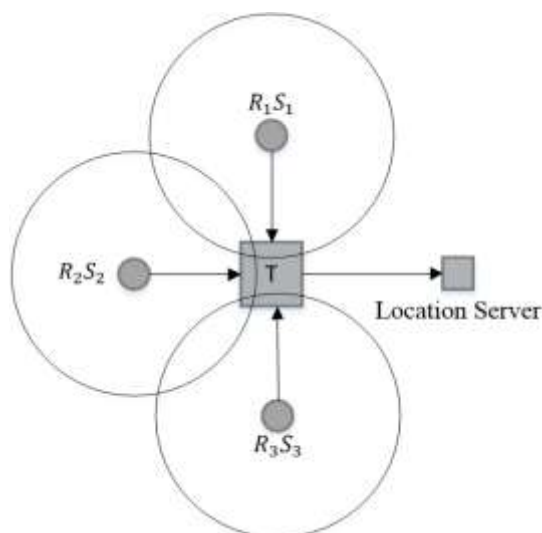


Рисунок 1.8 – Локалізація об'єктів по індикації рівня потужності сигналу

Як показують практичні дослідження, процес визначення відстані між передавачем і приймаючим пристроєм, заснований на цьому методі, закінчується вкрай неточними результатами. Більш того, системи, засновані на цьому методі, схильні до атак зловмисників, які легко можуть впливати на потужність сигналу, використовуючи стороннє електронне обладнання. Слід зазначити, що даний метод досить сильно впливає на завантаження бездротової мережі Wi-Fi [51].

Часопролітний метод визначення поточного місця розташування об'єктів використовує вимірюваний час передачі сигналу між передавачем і приймаючим пристроєм і заснований на встановленні швидкості поширення сигналу в середовищі [52]. Так як даний метод заснований на значенні часу, точність датчиків стає особливо важливою в порівнянні з попередніми методами. Позначимо передавальні пристрої з високоточними датчиками як R , а приймаючі пристрої позначимо як T . Значення часу передачі сигналу приймаючому пристрою позначимо як t . Слід зазначити, що точність датчиків, встановлених на приймаючих пристроях, повинна бути також висока. Час передачі сигналу $t1$ порівнюється з часом прийому сигналу $t2$. Використовуючи оцінку швидкості поширення сигналу S , відстань між пристроями D може бути визначена з точністю до двох метрів. Місце

розташування об'єкта в тривимірному просторі може бути визначено з використанням трьох передавальних пристроїв. Даний метод ілюструється на рис. 1.9. Використання даного методу не впливає на навантаження апаратної частини системи, так як метод може використовувати те ж обладнання, що використовується для передачі даних і обробки сигналу [53].

Для стабільної роботи системи визначення поточного місця розташування об'єктів, заснованої на використанні часопролітного методу, потрібні дорогі точні датчики. Насправді, зміщення лічильників досить сильно впливає на точність визначення місця розташування об'єктів. Крім того, сигнал може залежати від перешкод від інших сигналів, шуму і багатопроменевого поширення. Проте часопролітний метод локалізації об'єктів має перевагу в порівнянні з іншими методами – вартість додаткового обладнання є відносно невеликою.

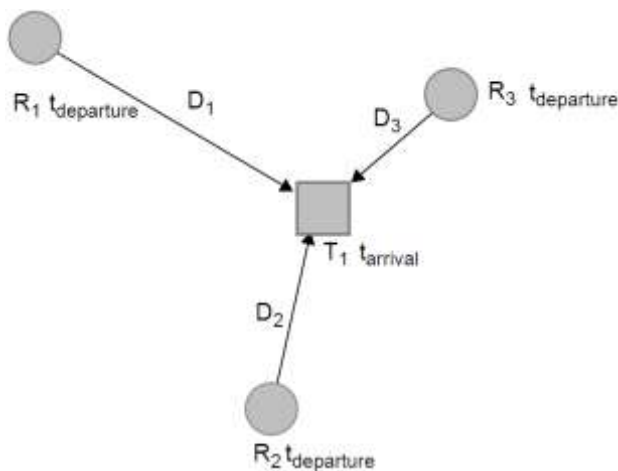


Рисунок 1.9 – Локалізація об'єктів за часопролітним методом

Даний метод працює досить стабільно в приміщеннях з бетонними стінами і підлогою і має відносно високу точність визначення поточного місця розташування об'єктів в порівнянні з іншими методами. Крім того, часопролітної метод локалізації об'єктів вважається безпечним методом.

Розглянемо методи локалізації рухомих об'єктів з використанням

WLAN.

Wi-Fi RTLS (системи локалізації в реальному часі) дозволяють виявляти місця розташування за рахунок використання існуючих бездротових маршрутизаторів LAN [54]. Крім того, WLAN дозволяє покрити приміщення з великою площею. WLAN може підтримувати велику кількість місць у великих приміщеннях, а за допомогою додавання точок доступу можна збільшити площу покриття. Тому WLAN дозволяє користувачам посправжньому мобільно визначатися з місцем положення до тих пір, поки мобільний термінал знаходиться в мережі покриття.

У пристроях бездротових мереж і Bluetooth індикатор рівня сигналу (RSSI – Received Signal Strength Indication) є доступним параметром для вимірювання відстані до базової станції або маяка і може бути використаний для локалізації рухомих об'єктів. RSSI є нестабільним параметром через складні поширення радіосигналу в будівлях, але його можна використовувати для локалізації рухомого об'єкта. Привабливим є те, що системи локалізації з використанням RSSI не вимагають додаткового обладнання і можуть базуватися на інфраструктурі існуючих WLAN.

На жаль стандарт 802.11 не визначає ніякого відношення між значенням RSSI і потужністю в mW або dBm (МВт, або дБм). Виробники обладнання для бездротових мереж вибирають власні точність, деталізацію і діапазон фактичної потужності в mW або dBm і діапазон значень RSSI (від 0 до RSSI_Max). В роботі [55] показано, що RSSI не завжди забезпечує вимірювання, які є досить точним, щоб правильно визначити місце розташування рухомого об'єкта.

Метод визначення поточного місця розташування об'єктів по «відбитку пальців» (fingerprint) радіосигналу від оточуючих точок доступу Wi-Fi знайшов популярність в останні 10-15 років з появою системи RADAR. Привабливістю підходу з використанням технології WiFi є те, що система локалізації об'єктів, побудована на цьому методі, використовує точки доступу WiFi, які досить широко поширені в багатьох будинках і закладах, а

також те, що сучасні мобільні телефони і планшетні комп'ютери мають пристрої зв'язку з даними точками доступу. Принцип дії даного методу полягає у використанні характеристик сигналу в кожній точці простору (характеристики сигналу, як правило, представляють собою потужність сигналу від оточуючих точок доступу) в якості радіо-сигнатури для визначення місця розташування об'єкта. У загальному випадку, побудова системи локалізації об'єктів з використанням методу *fingerprinting* складається з двох етапів. Перший етап передбачає створення бази даних відбитків радіосигналу або побудови карти радіосигналів шляхом вимірювання сигналу в кожній точці простору. Цей етап також називається етапом навчання. На другому етапі радіосигнали, отримані пристроєм одержувача від оточуючих точок доступу, використовуються для пошуку найбільш відповідного зразка радіосигналу в базі даних або на карті радіосигналів. Якщо отримані радіосигнали збігаються зі зразками з бази даних, поточне місце розташування об'єкта виводиться на екран пристрою.

Принцип роботи систем локалізації об'єктів з використанням методу *fingerprinting*, таких як RADAR і Horus [56] складається з етапу навчання системи для побудови бази даних відбитків пальців радіосигналів та використання еталонів на етапі позиціонування. Однак, етап навчання може потребувати досить велику кількість часу, а також великих фінансових витрат. Більш сучасні системи локалізації об'єктів, побудовані на методі *fingerprinting*, використовують автоматизацію навчального етапу за допомогою краудсорсинга, використовуючи різні механізми зі збільшенням складності розрахунків даних, що надходять до системи. Прикладом даних систем є Redpin, OIL і Zee [57].

На початку використання методу потрібно виділити масив середніх значень потужності прийнятих сигналів від оточуючих точок доступу WiFi і встановити його в якості «відбитка пальця» для поточного положення в просторі. Однак слід зазначити, що дане визначення не кращим чином впливає на точність у визначенні поточного місця розташування об'єкта в

порівнянні з іншими, більш «короткими» визначеннями цього поняття, які засновані на індикації рівня потужності прийнятого сигналу.

Рівень потужність прийнятого сигналу від таких передавальних пристроїв, як точки доступу Wi-Fi, є ключовою особливістю в побудові систем локалізації об'єктів з використанням даного методу. Виділяють три різних визначення поняття «відбитку пальців» радіосигналу, заснованих на індикації рівня потужності прийнятого сигналу: потужність сигналу, стабільність та різноманітність.

У визначенні потужності сигналу для кожного місця розташування об'єкта, відповідного елементу масиву, отриманого на етапі навчання, набір точок доступу з найвищими середніми показниками рівня потужності сигналу зпівставляється з даними про точки доступу і рівні потужності сигналу від них в поточний момент часу для визначення місця розташування об'єкта з використанням відповідного алгоритму розрахунку.

Визначення стабільності зосереджено на наборі точок доступу з найбільш стабільним рівнем потужності сигналу на основі знань про відхилення рівнів потужності сигналів даних точок доступу. Підставою для розгляду даного визначення є два аргументи: по-перше, так, як рівень потужності сигналу змінюється в часі, сигнали, які змінюються менше, можна вважати більш придатними для визначення поточного місцезнаходження; по-друге, закономірність у відхиленні і загасанні прийнятого сигналу є найбільш важливим завданням в області, пов'язаній з точністю визначення місця розташування об'єкта.

Визначення різноманітності ґрунтується на тому спостереженні, що найкращими "відбитками пальців" радіосигналу є ті, що ні за яких умов не збігаються з іншими "відбитками пальців" радіосигналу в усьому масиві даних про них, тобто "відбитки пальців" радіосигналу є унікальною інформацією про поточне місцезнаходження об'єкта. Ще одна характеристика заснована на видимості точки доступу, яка є важливим аспектом при побудові системи локалізації об'єктів. Деякі дослідники

припускають, що однаковий набір точок доступу може бути знайдений по всьому простору роботи даних точок, в той час як інші дослідники неявно припускають, що видимість точок доступу постійна в часі. Дані припущення часто не збігаються з тими процесами, які відбуваються на практиці. Для визначення впливу видимості точок доступу на точність визначення місця розташування об'єктів, можна виділити поняття сталості. Слід зазначити, що найкращим процесом збору даних на першому етапі є той процес, при якому відбираються тільки ті точки доступу, сталість видимості яких є найбільшим. Середнє значення рівня потужності сигналу даного набору точок доступу потім порівнюється з поточними даними про потужності сигналу, що надходить від тих же точок доступу для визначення поточного місця розташування об'єкта.

Визначення покриття відображає різні просторові аспекти видимості точок доступу. Для кожної точки в просторі слід підбирати набір точок доступу, який має найбільшу площу видимості в усьому просторі роботи системи для подальшого зіставлення даних в процесі визначення місця розташування об'єкта. Ідея цього методу базується на створенні масиву векторів, що складаються з рівнів сигналу від точки доступу (access point = AP) до бездротової мережі. Кожен вектор відповідає координаті, що визначає положення рухомого об'єкту в просторі. Ці вектори використовуються для локалізації рухомого об'єкту. Одним з основних переваг даного методу є те, що для його реалізації не потрібна інформація про місцезнаходження точок доступу до бездротової мережі. Крім того, в разі відмови однієї з точок доступу метод залишається працездатним.

Рівень сигналу зазвичай вимірюється в dBm і відповідає рівню сигналу, одержуваного рухомим об'єктом від точки доступу до бездротової мережі.

Розглянемо можливості використання бездротової технології Bluetooth для локалізації рухомого об'єкту. Бездротова технологія Bluetooth є технологією, яка була спочатку розроблена для вирішення задач підключення особистих, портативних і кишенькових електронних пристроїв. Bluetooth

легше використовувати, ніж стандартну локальну мережу, вона вбудована в більшості телефонів, персональних цифрових помічників (PDA) і підтримує інші мережеві служби. Bluetooth мітки є прийомопередавачами невеликого розміру. Як будь-який інший пристрій Bluetooth, кожна мітка має унікальний ідентифікатор. Цей ідентифікатор може бути використаний для визначення місцезнаходження Bluetooth мітки.

Радіозв'язок Bluetooth здійснюється в ISM-діапазоні, який використовується в різних побутових приладах і бездротових мережах (вільне володіння від ліцензування діапазон 2,4-2,48 ГГц). Спектр сигналу формується за методом FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum - широкопasmовий сигнал по методу частотних стрибків). Метод FHSS простий в реалізації, забезпечує стійкість до широкопasmових перешкод.

Відповідно до алгоритму FHSS, в Bluetooth несуча частота сигналу стрибкоподібно змінюється 1600 разів в секунду (всього виділяється 79 робочих частот). Послідовність перемикання між частотами для кожного з'єднання є псевдовипадковою і відома тільки передавачам і приймачам, які кожні 625 мкс (один тимчасовий слот) синхронно перебудовуються з однієї несучої частоти на іншу. Таким чином, якщо поруч працюють кілька пар приймач-передавач, то вони не заважають один одному.

Цей алгоритм є також складовою частиною системи захисту конфіденційності інформації, що передається: перехід відбувається по псевдовипадковому алгоритму і визначається окремо для кожного з'єднання. При передачі цифрових даних і аудіосигналу (64 Кбіт / с в обох напрямках) використовуються різні схеми кодування: аудіо-сигнал не повторюється, а цифрові дані в разі втрати пакета інформації будуть передані повторно. Без завадостійкого кодування це забезпечує передачу даних зі швидкостями 723,2 Кбіт / с зі зворотним каналом 57,6 Кбіт / с, або 433,9 Кбіт / с в обох напрямках [58].

Bluetooth SIG затвердив специфікацію Bluetooth 4.0 30 червня 2010 року. Bluetooth 4.0 включає в себе протоколи Класичний Bluetooth,

Високошвидкісний Bluetooth і Bluetooth з низьким енергоспоживанням. Високошвидкісний Bluetooth заснований на Wi-Fi, а Класичний Bluetooth складається з протоколів попередніх специфікацій Bluetooth. Протокол Bluetooth з низьким енергоспоживанням призначений, перш за все, для мініатюрних електронних датчиків (використовуються в тренажерах та мініатюрних сенсорах, що розміщуються на мобільних об'єктах).

Низький рівень споживання енергії досягається за рахунок використання особливого алгоритму роботи. Передавач включається тільки на час відправки даних, що забезпечує можливість роботи від однієї батарейки типу CR2032 протягом декількох років. Стандарт надає швидкість передачі даних в 1 Мбіт / с при розмірі пакета даних 8-27 байт.

У новій версії два Bluetooth-пристрої можуть встановлювати з'єднання менш ніж за 5 мілісекунд і підтримувати його на відстані до 100 м. Для цього використовується вдосконалена корекція помилок, а необхідний рівень безпеки забезпечує 128-бітове AES-шифрування. Датчики температури, тиску, вологості, швидкості пересування і т. Д. На базі цього стандарту можуть передавати інформацію на різні пристрої контролю: мобільні телефони, ПК тощо. Перший чіп з підтримкою Bluetooth 3.0 і Bluetooth 4.0 був випущений компанією ST -Ericsson в кінці 2009 року. В даний час випускається велика кількість мобільних пристроїв з підтримкою цього стандарту.

Специфікація Bluetooth з низьким енергоспоживанням доступна широкому загалу в рамках специфікації ядра Bluetooth версії 4.0. Споживаючи менше енергії, технологія Bluetooth з низьким енергоспоживанням пропонує тривалий забезпечення зв'язку і з'єднує маленькі пристрої типу датчиків і мобільні пристрої в межах персональних мереж (PAN). Технологія Bluetooth з низьким енергоспоживанням спроектована з двома однаково важливими альтернативними реалізаціями: однорежимний (single-mode) і двухрежимний (dual-mode).

Маленькі пристрої, такі як годинник і спортивні датчики на основі

однорежимні модулів Bluetooth будуть користуватися перевагами низького енергоспоживання, і підтримувати високу інтеграцію і компактний розмір пристрою. У дворежимної реалізації функціональність Bluetooth зі зниженим енергоспоживанням інтегрується в існуючий класичний (Classic) Bluetooth. Ця реалізація поліпшить існуючі чіпи новим стеком Bluetooth з низьким споживанням енергії, при цьому додаючи нові можливості в класичні пристрої Bluetooth.

Система RFID – це метод автоматичної ідентифікації об'єктів, в якому за допомогою радіосигналів зчитуються або записуються дані, що зберігаються в так званих транспондерах або RFID-мітках. Будь-яка RFID-система складається з пристрою, що зчитує (зчитувач або інтеррогатор) і транспондера (він же RFID-мітка, іноді також застосовується термін RFID-тег). За дальністю зчитування RFID-системи можна поділити на такі системи:

- ближньої ідентифікації (зчитування на відстані до 20 см);
- ідентифікації середньої дальності (від 20 см до 5 м);
- дальньої ідентифікації (від 5 м до 100 м).

Більшість RFID-міток складається з двох частин. Перша – інтегральна схема (IC) для зберігання і обробки інформації, модулювання і демодулювання радіочастотного (RF) сигналу і деяких інших функцій. Друга – антена для прийому і передачі сигналу.

За типом джерела живлення RFID-мітки діляться на пасивні, активні і напівпасивну.

Найбільше поширення мають пасивні мітки. Електричний струм, індукований в антені електромагнітним сигналом від зчитувача, забезпечує достатню потужність для функціонування кремнієвого CMOS-чіпу, розміщеного в мітці, і передачу сигналу у відповідь.

Зчитувач RFID – це прилад, який читає інформацію з міток і записує в них дані. Це пристрій може або працювати при підключенні до облікової системи або працювати автономно (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Зчитувач RFID

RFID-мітка (транспондер, RFID-тег) – це прийомопередаючий пристрій, що посиляє сигнал у відповідь на прийнятий сигнал, та зазвичай виглядає як картка, брелок або фішка. За типом використовуваної пам'яті дані мітки відносяться до типу Read Only (RO) – дані записуються тільки один раз, відразу при виготовленні. Вони придатні тільки для ідентифікації. Ніяку нову інформацію в такі мітки записати не можна і їх практично неможливо підробити.

Робочу частоту дані RFID-мітки мають у діапазоні LF (125-134 kHz). У зв'язку з низькою довжиною хвилі існують проблеми зі зчитуванням на великі відстані, а також проблеми, пов'язані з появою колізій при зчитуванні.

Переваги радіочастотної ідентифікації:

- можливість перезапису. Дані RFID-мітки можуть записуватись і доповнюватися багато разів, тоді як дані на штрих-кодів не можуть бути змінені ;

- відсутність необхідності в прямої видимості. RFID-зчитувачу не потрібно пряма видимість мітки, щоб використовувати її дані. Мітки можуть читатися через упаковку, що робить можливим їх приховане розміщення. Для читання даних мітці досить хоча б ненадовго потрапити в зону реєстрації, переміщаючись на досить великій швидкості. Навпаки, зчитувачу штрих-коду завжди необхідна пряма видимість штрих-коду для його читання;

- більша відстань читання. RFID-мітка може зчитуватися на значно

більшій відстані, ніж штрих-код. Залежно від моделі мітки і зчитувача, радіус зчитування може становити до декількох сотень метрів. У той же час подібні відстані потрібні не завжди;

- великий обсяг зберігання даних. RFID-мітка може зберігати значно більше інформації, ніж штрих-код;

- підтримка читання декількох міток. Промислові зчитувачі можуть одночасно зчитувати більше тисячі RFID-міток за секунду, використовуючи так звану антиколізійну функцію. Пристрій зчитування штрих-коду може одноразово сканувати тільки один штрих-код;

- зчитування даних мітки при будь-якому її розташуванні. З метою забезпечення автоматичного зчитування штрихового коду, комітети по стандартам (в тому числі EAN International) розробили правила розміщення штрих-міток на товарній і транспортній упаковці. Єдина умова – перебування мітки в зоні дії зчитувача;

- стійкість до впливу навколишнього середовища. Існують RFID-мітки, що володіють підвищеною міцністю і опірністю жорстким умовам робочого середовища, а штрих-код легко пошкоджується (наприклад, вологою або забрудненням). У тих сферах застосування, де один і той же об'єкт може використовуватися необмежену кількість разів (наприклад, при ідентифікації контейнерів або зворотної тари), радіочастотна мітка виявляється більш прийнятним засобом ідентифікації, так її не потрібно розміщувати на зовнішній стороні упаковки. Пасивні RFID-мітки мають практично необмежений термін експлуатації;

- інтелектуальне поведінка. RFID-мітка може використовуватися для виконання інших завдань, крім функції носія даних. Штрих-код є лише засобом зберігання даних;

- високий ступінь безпеки. Унікальне незмінне число-ідентифікатор, що привласнюється мітці при виробництві, гарантує високий ступінь захисту міток від підробки. Також дані на мітці можуть бути зашифровані. Радіочастотна мітка має можливість закрити паролем операції запису і

зчитування даних, а також зашифрувати їх передачу. В одній мітці можна одночасно зберігати відкриті і закриті дані.

Недоліки радіочастотної ідентифікації:

- вартість системи перевищує номінальну вартість системи обліку, заснованої на штрих-кодах;
- складність самостійного виготовлення. Штрих-код можна надрукувати на будь-якому принтері;
- чутливість до перешкод у вигляді електромагнітних полів;
- недовіра користувачів, можливості використання її для збору інформації про людей;
- встановлена технічна база для зчитування штрих-кодів істотно перевершує за обсягом рішення на основі RFID;
- недостатня відкритість вироблених стандартів.

Один із варіантів методів локалізації рухомих об'єктів, заснованих на технології RFID, представлено в роботі [59]. Дана система дозволяє відстежувати рухомі об'єкти, що використовують технологію RFID. Результатом дослідження є можливість відстеження рухомих об'єктів. Архітектура даної системи представлена на рис. 1.11.

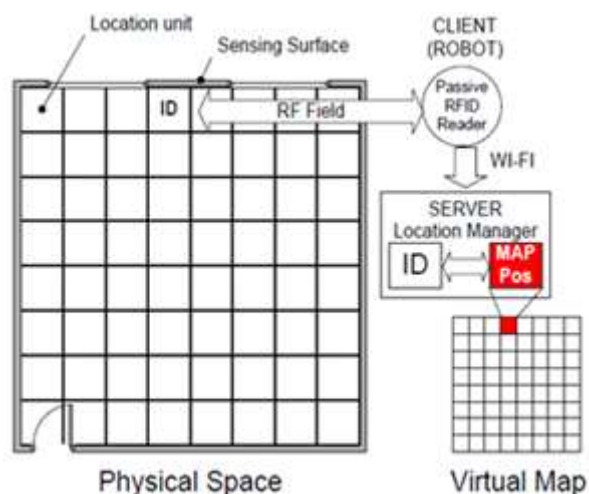


Рисунок 1.11 – Архітектура RFID-системи

Розглянемо можливості використання технології NFC для локалізації рухомих об'єктів.

Near Field Communication (NFC) – технологія бездротового високочастотного зв'язку малого радіусу дії, яка дає можливість обміну даними між пристроями, що знаходяться на відстані близько 10 сантиметрів. Ця технологія – просте розширення стандарту безконтактних карт (ISO 14443), яка об'єднує інтерфейс смарт-карти і зчитувача в єдиний пристрій. Пристрій NFC може підтримувати зв'язок з існуючими смарт-картами, зчитувачами стандарту ISO 14443 та з іншими пристроями. NFC націлена перш за все на використання в мобільних телефонах і планшетах. У NFC зв'язок підтримується за допомогою індукції магнітного поля, де дві рамкові антени розташовуються в межах ближнього поля один одного, ефективно формуючи трансформатор з повітряним сердечником.

Інші застосування NFC в майбутньому можуть передбачати конфігурацію і ініціалізацію інших бездротових з'єднань, таких як Bluetooth, Wi-Fi або Ultra-wideband.

Розглянемо питання використання камер мобільних пристроїв для локалізації рухомих об'єктів.

Смартфони вже давно відібрали велику частку ринку у відео- та фотокамер. У кожному смартфоні встановлені свої відеосенсори. і якість зйомки, теж різний. Також був запропонований варіант застосувати OCR (Optical character recognition) в навігації [60].

Розглянемо питання використання QR-кодів для локалізації рухомих об'єктів. QR-код (quick response - швидкий відгук) – матричний код (двовимірний штрих-код), розроблений і представлений японською компанією «Denso-Wave» в 1994 році. Величезна популярність штрихкодів в Японії призвела до того, що обсяг інформації, зашифрованої в ньому, незабаром перестав влаштовувати індустрію. На відміну від старого штрихкоду, який сканують тонким променем, QR-код визначається сенсором як двовимірне зображення.

Три квадрата в кутах зображення і менші синхронізуючі квадрати по всьому коду дозволяють нормалізувати розмір зображення і його орієнтацію, а також кут, під яким сенсор розташований до поверхні зображення. Точки переводяться в двійкові числа з перевіркою по контрольній сумі. Основна перевага QR-коду – легке розпізнавання скануючим обладнанням (в тому числі і фотокамерою мобільного телефону).

Максимальна кількість символів, які поміщаються в один QR-код: цифри – 7089; цифри і букви (латиниця) – 4296; двійковий код – 2953 байт (отже, близько 2953 літер кирилиці в кодуванні windows –1251 або близько 1450 літер кирилиці. Хоча термін «QR code» є зареєстрованим товарним знаком «DENSO Corporation», використання кодів не обкладається жодними ліцензійними відрахуваннями, а самі вони описані і опубліковані в якості стандартів ISO. Специфікація QR-коду не описує формат даних. Найбільш популярні програми перегляду QR-кодів підтримують такі формати даних: URL, Email (з поміткою), SMS на номер (с темою), MeCard, vCard, географічні координати. Також деякі програми можуть розпізнавати файли GIF, JPG, PNG або MID менше 4 КБ і зашифрований текст, але ці формати не отримали популярності.

Засоби локалізації з використанням QR-кодів складаються з двох основних компонентів – обчислювального пристрою з камерою і міток, розташованих в тих місцях, в яких потрібно визначити поточне місце розташування об'єкта. Процес визначення місця розташування об'єкта відбувається шляхом фотографування мітки з QR-кодом, з подальшим розпізнаванням коду. Якщо розпізнавання коду виявилась успішним, отримані дані звіряються з базою даних всіх кодів. Якщо отриманий код відповідає якомусь коду в базі даних, потрібна інформація виводиться на екран обчислювального пристрою з поточним місцем розташування об'єкта.

Система локалізації з QR-кодом дозволяє інтелектуальним рухомих об'єктам, отримувати інформацію про поточне місцезнаходження, використовуючи фотокамеру обчислювального пристрою.

Розглянемо питання використання технології Wi-Fi для локалізації рухомих об'єктів. Wi-Fi – торгова марка Wi-Fi Alliance для бездротових мереж на базі стандарту IEEE 802.11. Під аббревіатурою Wi-Fi (від англійського словосполучення Wireless Fidelity, яке можна дослівно перекласти як «безпроводна точність») в даний час розвивається ціле сімейство стандартів передачі цифрових потоків даних по радіоканалах. Будь-яке обладнання, що відповідає стандарту IEEE 802.11, може бути протестовано в Wi-Fi Alliance і отримати відповідний сертифікат і право нанесення логотипу Wi-Fi. Зазвичай схема Wi-Fi мережі містить не менше однієї точки доступу і не менше одного клієнта. Також можливе підключення двох клієнтів в режимі точка-точка (Ad-hoc), коли точка доступу не використовується, а клієнти з'єднуються за допомогою мережевих адаптерів безпосередньо. Точка доступу передає свій ідентифікатор мережі (SSID) за допомогою спеціальних сигнальних пакетів на швидкості 0,1 Мбіт / с кожні 100 мс. Знаючи SSID мережі, клієнт може з'ясувати, чи можливе підключення до даної точки доступу. При попаданні в зону дії двох точок доступу з ідентичними SSID приймач може вибирати між ними на підставі даних про рівень сигналу. Стандарт Wi-Fi дає клієнтові повну свободу при виборі критеріїв для з'єднання. Більш докладно принцип роботи описаний в офіційному тексті стандарту.

За способом групування та впорядкування точок доступу в єдину систему можна виділити автономні точки доступу та точки доступу, що працюють під управлінням контролера. За способом організації та управління радіоканалами можна виділити бездротові локальні мережі: зі статичними настройками радіоканалів; з динамічними (адаптивними) настройками радіоканалів; з багат шаровою структурою радіоканалів.

На даний момент найпопулярнішим стандартом є 802.11n зі збільшенням швидкості передачі даних (600 Мбіт / с). 2,4-2,5 або 5 ГГц.

Розглянемо питання використання технології iBeacon для локалізації рухомих об'єктів. iBeacon є технологією, розробленою компанією Apple, яка

працює на базі Bluetooth LE [61]. Пристрої iBeacon передають набір значень для ідентифікації різних пристроїв. Ці значення можуть допомогти користувачам в установці декількох пристроїв iBeacon в навколишньому середовищі. Пристрої iBeacon передають цю інформацію всім пристроям, які підтримують технологію Bluetooth LE. Часовий інтервал передачі даних може бути встановлений користувачем, і варіюється від 100 мс.

1.3 Методи навігації МР

1.3.1 Методи пошуку найкоротшого шляху між заданими точками маршруту

На даний момент існує безліч алгоритмів пошуку найкоротшого шляху, також іменованих як рішення задачі комівояжера. Вона полягає в знаходженні самого вигідного маршруту, що проходить через зазначені пункти хоча б по одному разу з наступним поверненням в початковий пункт. В умовах задачі вказується критерій вигідності маршруту (найкоротший, найдешевший і т.п.) і відповідні матриці відстаней. Як правило маршрут повинен проходити через кожне місто тільки один раз.

Загальна постановка задачі належить до класу NP-повних задач. Для ефективного її вирішення даного завдання привабливо використовувати евристичні методи, які дозволяють знайти задовільне рішення за короткий проміжок часу.

Розглянемо такі алгоритми знаходження найкоротшого шляху, як алгоритм пошуку в глибину, алгоритм пошуку в ширину, алгоритм Дейкстри та алгоритм пошуку шляху по першому найкращому збігу (Best-First Search).

Найпростішим алгоритмом знаходження шляху є пошук в ширину (інша назва – хвильовий алгоритм) [62]. Алгоритм «запускає» хвилю зі стартової точки, яка поступово заповнює простір, в результаті доходючи до цільової точки. Даний алгоритм має високу простоту реалізації та завжди

знаходить найкоротший шлях за умови рівності ваг. До недоліків слід віднести те, що пошук йде рівномірно у всіх напрямках, замість того, щоб бути спрямованим до мети, а також не завжди всі кроки рівні (наприклад, діагональні кроки повинні бути довше ніж ортогональні).

Алгоритм пошуку в глибину протилежний пошуку в ширину. Замість черги він використовує стек, а також дозволяє обійтися без списку за рахунок рекурсії. Пошук в глибину описується наступним чином: для кожної непройденної вершини необхідно знайти все не пройдені суміжні вершини і повторити пошук для них. Алгоритм має тривалий час роботи, а також він ігнорує напрямки до мети.

Алгоритм Дейкстри є одним з найбільш потужних алгоритмів для пошуку найкоротшого шляху по графу, ребра яких мають різну вагу [63]. Кожній вершині у відповідність зіставляється мітка – мінімальна відома відстань від стартової вершини до цільової. Алгоритм працює покроково: на кожному кроці він «відвідує» одну вершину і намагається зменшувати мітки. Робота алгоритму завершується, коли всі вершини будуть відвідані. До переваг слід віднести те, що алгоритм працює у зважених середовищах, оновлює вузли при знаходженні кращого шляху до них. Його недолік – ігнорування напрямку до мети (рис. 1.12).

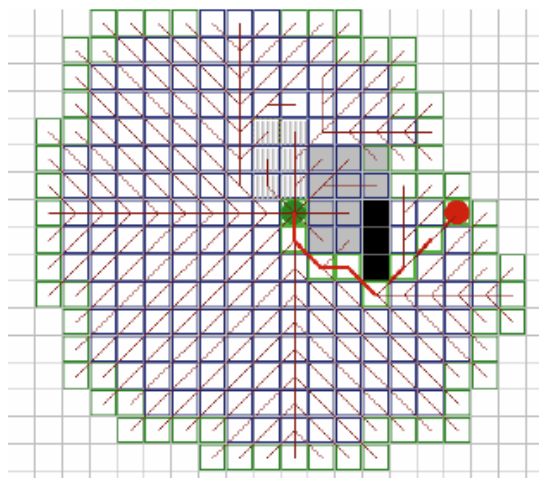


Рисунок 1.12 – Ілюстрація до алгоритму Дейкстри

Складність алгоритму Дейкстри залежить від способу знаходження вершини v , а також способу зберігання сукупності невідвіданих вершин і способу оновлення міток. Позначимо через n кількість вершин, а через m кількість ребер в графі G . У найпростішому випадку, коли для пошуку вершини з мінімальним $d[v]$ проглядається вся безліч вершин, а для зберігання величин d використовується масив, час роботи алгоритму є $O(n^2)$. Основний цикл виконується порядку n раз, в кожному з них на знаходження мінімуму витрачається близько n операцій. На цикли по сусідах кожної відвіданої вершини витрачається кількість операцій, пропорційна кількості ребер m (оскільки кожне ребро зустрічається в цих циклах рівно двічі і вимагає константне число операцій). Таким чином, загальний час роботи алгоритму становить $O(n^2 + m)$.

Алгоритм пошуку шляху по першому найкращому збігу (Best-First Search) – це алгоритм пошуку, який досліджує граф шляхом розширення найбільш перспективних вузлів, які обирають відповідно до зазначеного правила (рис. 1.13) [64]. Він був створений з метою виправити недолік попередніх алгоритмів: ігнорування напрямки до мети. Алгоритм використовує евристичний пошук, має високу швидкість роботи і не ігнорує напрям до мети. Але недоліки його полягають в тому, що BFS не працює у зважених середовищах. Він створює викривлені, а не прямі шляхи навколо перешкоди.

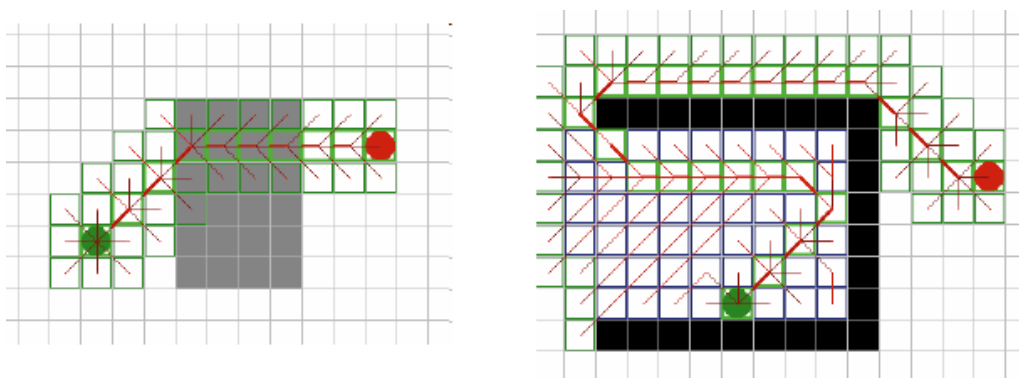


Рисунок 1.13 – Ілюстрація до алгоритму Best-First Search

1.3.2 Методи навігації МР з використанням засобів обчислювального інтелекту

Системи навігації МР можуть мати у своєму розпорядженні модель навколишнього середовища, в якій представлені фіксовані основні елементи: перешкоди, стіни, двері, меблі тощо. Реалізація таких традиційних систем навігації в реальному часі часто пов'язана з певними труднощами, так як вимагає значних обчислювальних ресурсів і великого обсягу пам'яті, пов'язаних з необхідністю здійснення докладної картографії середовища і дотримання при цьому традиційних вимог до швидкості і точності переміщення.

Для складного навколишнього середовища (частково невідомого або середовища, що динамічно змінюється) часто не вистачає технічних можливостей для автоматичного спостереження, аналізу ситуації і прийняття рішень МР без зіткнень з непередбаченими перешкодами. Траєкторія руху МР такого типу розраховується на основі аналізу доступної інформації, після чого реалізуються відповідні керуючі дії. З іншого боку, можна реалізувати стратегії оперативного керування МР з безпосереднім використанням інформації від датчиків робота, щоб досягти мети, уникаючи перешкод в разі динамічної зміни середовища, ґрунтуючись на методах штучного інтелекту [65 – 81].

До найбільш поширених підходів до такого рішення задач навігації МР слід віднести застосування нечіткої логіки, штучних нейронних мереж (ШНМ), машинного навчання і гібридних методів. При нечіткому підході поведінка МР описується лінгвістичними правилами типу «Якщо-То». Ці правила отримують зазвичай із застосуванням оцінок експертів. Слід зазначити, що для складного динамічного середовища виникають складнощі при побудові бази таких правил, так як число розглянутих можливих ситуацій різко збільшується [82].

З іншого боку, проблема навчання та адаптації в задачах навігації МР в останні роки стає все більш важливою. Для вирішення цієї проблеми найбільш часто використовуються методи самонастроювання і ШНМ. Основною ідеєю при цьому є навчання МР на наборі ситуацій, після чого навчена ШНМ дозволяє приймати адекватні рішення в разі виникнення нових ситуацій. Супервізорне налаштування вимагає наявності достатньої кількості пар «ситуація-дія». Незважаючи на швидку збіжність відповідних алгоритмів, часто важко отримати необхідну кількість даних для настроювання.

Можливим вирішенням такої проблеми може виявитися застосування методів машинного навчання з підкріпленням (reinforcement learning (RL)) [83 – 85]. Основна ідея RL-методів полягає в поліпшенні поведінки МР на кожному кроці шляхом максимізації деякої функції виграшу з використанням значень сигналу підкріплення від навколишнього середовища. При цьому робот спочатку досліджує середовище для зв'язку ситуацій і відповідних дій (з отриманням позитивного або негативного результату), а потім проводить прогнозування середнього можливого максимального виграшу. Таким чином, в основі цього методу лежать принципи адаптивної поведінки, які дозволяють мобільним об'єктам пристосовуватися до умов, що змінюються або невідомим умов навколишнього середовища.

Відмінною рисою методів навчання з підкріпленням є наявність скалярного сигналу підкріплення, який отримує агент в процесі взаємодії із зовнішнім середовищем і який характеризує ефективність функціонування агента в даний момент часу. У початковому вигляді RL-метод використовує кінцеве кількість станів зовнішнього середовища і можливих впливів агента на зовнішнє середовище, а також взаємодія агента з зовнішнім середовищем в дискретні моменти часу. Навчання з підкріпленням є методом, який дозволяє знаходити оперативне рішення, яке є оптимальним в сенсі отримання максимального доходу в кожному з станів. При цьому він дозволяє в процесі навчання допускати можливість короточасних втрат,

щоб згодом максимізувати сумарний дохід на тривалому інтервалі. Внаслідок цього, навчання з підкріпленням є методом, концептуально пристосованим для ефективної роботи в інтелектуальних системах, що характеризуються високим рівнем зміни зовнішніх і внутрішніх впливів. Метою RL-алгоритмів є визначення та реалізація стратегії, заснованої на поточний стан, і що відповідає максимальному значенню тривалої суми сигналів підкріплення.

Розглянемо приклади використання RL-алгоритмів в задачах навігації МР.

Однією з найбільш характерних для систем інтелектуального керування стохастичними процесами, пов'язаних з управлінням мобільними об'єктами, є задачі керування роботом в безперервному середовищі [86]. Розглянемо різні можливі варіанти постановки такого завдання для різних типів перешкод.

Варіант 1. Перед роботом ставиться завдання – дістатися до мети, уникнувши зіткнення з перешкодою. Критерієм оцінки ефективності функціонування робота служить середнє значення нагороди, отриманої за час взаємодії з середовищем. Інформацію про навколишнє середовище робот отримує за допомогою семи сенсорів: сенсори 1-5 розташовуються під кутом 15° відносно один одного і надають інформацію про відстань від робота до перешкоди; сенсор 6 - інформацію про відстань до цілі; сенсор 7 - інформацію про кут між напрямком робота і метою. Процес навчання може бути тут розділений на етапи. Наприклад, нагороду робот може отримати тільки в кінці етапу, у всіх інших випадках нагорода буде нульовий. Етап закінчується при досягненні роботом мети, при зіткненні з перешкодою або через таймаут. Для цих трьох випадків може бути задано різне значення нагороди.

Варіант 2. На кожному етапі навчання робот стартує з довільно обраної порожньої області простору (рис. 1.14). Розміщення перешкод і нагороди залишається незмінним для всіх етапів навчання робота. Функція виграшу формується таким чином:

- якщо робот добирається до мети, то отримує винагороду, яка дорівнює одиниці;

- у всіх інших випадках винагорода дорівнює нулю.

Варіант 3. На кожному етапі навчання робот і мета поміщаються в нову точку простору, і відбувається генерація нового розташування перешкод (рис. 1.14). Функція виграшу формується таким чином:

- якщо робот досягає мета, то отримує винагороду рівне одиниці;

- в разі зіткнення з перешкодою значення нагороди обчислюється за заданою формулою;

- при таймауті значення нагороди обчислюється, як і в разі зіткнення з перешкодою плюс 0.3.

- Очевидно, що рішення всіх розглянутих задач управління роботом вимагає застосування спеціальних стратегій його поведінки в умовах невизначеності, безпосередньо пов'язаних з підкріплюється навчанням системи управління.

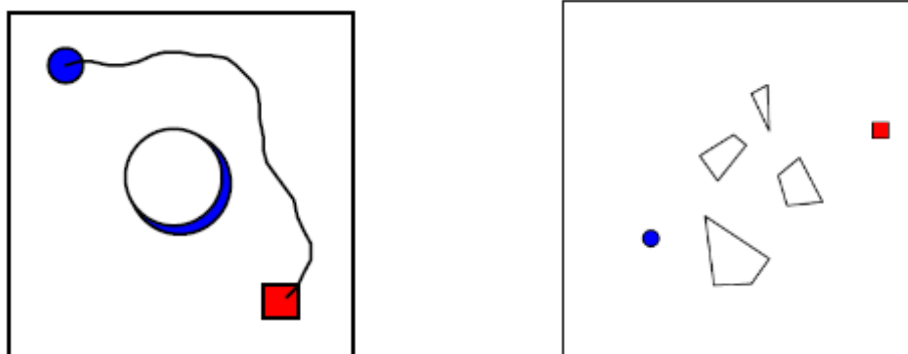


Рисунок 1.14 – Різні типи перешкод для варіантів 2 та 3 (коло – робот, квадрат – ціль)

Слід відзначити, що існують різні варіанти вибору стратегій навігації МР з використанням методів обчислювального інтелекту, зокрема, гібридні методи нечіткого та нейронечіткого керування в поєднанні з RL-алгоритмами [87 – 90].

1.4 Висновки за розділом 1 та постановка задач дисертаційного дослідження

Згідно з результатами аналізу досліджень в галузі локалізації та навігації мобільних об'єктів можна відзначити перспективність підходу, що передбачає можливість перемикання режиму дистанційного керування мобільним роботом в режим автономної навігації. При цьому якість локалізації та навігації автономних МР (АМР) може бути підвищена за допомогою засобів обчислювального інтелекту (зокрема, нечітких та нейромережових моделей), що дозволяє проводити керування МР в складних динамічних середовищах. Відомі методи локальної навігації мають ряд недоліків, зокрема відхилення від оптимального маршруту, досягнення локальних мінімумів та складність локалізації АМР. Тому актуальною задачею є розробка моделей та методів інтелектуальних засобів керування АМР, які забезпечують вихід до цілі та підвищення стійкості маневрування в умовах невизначеності.

Мета дослідження – розробка гібридних методів локалізації та навігації мобільних колісних роботів з застосуванням нечітких та нейромережових моделей, що можуть бути ефективно використані у середовищах зі змінними властивостями.

Для досягнення зазначеної мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити проблему локалізації та навігації мобільних об'єктів з використанням сучасних інтелектуальних технологій та засобів;
- розробити метод локалізації мобільних об'єктів з використанням технології iVeacon та даних акселерометра у просторі з відомими картами приміщень, що дозволяє скоротити кількість необхідних для локалізації передавачів;

– розробити метод локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байєса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота за умов наявності або відсутності пропріоцептивних даних;

– розробити метод визначення маршруту руху мобільних об'єктів з використанням модифікованого алгоритму Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам), що дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами;

– розробити метод автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі, який дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації;

– розробити метод автономної навігації МР в невідомому середовищі з комбінованим застосуванням нечіткої моделі і RL-методів, який дозволяє покращувати набір нечітких правил, використовуючи сигнали підкріплення;

– розробити метод локалізації та навігації МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан автономної навігації;

– здійснити моделювання роботи запропонованих методів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ КЕРОВАНИХ МОБІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Локалізація рухомих об'єктів з використанням технології NFC

В даний час немає чітко встановленої системи визначення місцезнаходження рухомих об'єктів (РО) в приміщеннях, як це є для відкритих просторів (системи GPS і GNSS). Проте існує ряд методів для локалізації об'єктів, які використовують пристрої, основне завдання яких часто принципово відрізняється від проблеми локалізації. Найбільш поширені методи локалізації використовують такі пристрої і технології як RFID, Wi-Fi, Bluetooth, QR-коди, відеокамери та різні типи датчиків.

Передбачається, що процес визначення поточного місцезнаходження рухомого об'єкту в просторі відбувається з використанням тих датчиків, які присутні в більшості переносних комп'ютерів.

Серед таких датчиків можна виділити наступні:

- акселерометр, який використовується для вимірювання прискорення пристрою по трьох осях в тому випадку, коли пристрій переміщається;
- гіроскоп, за допомогою якого можна визначати положення РО в просторі (кут нахилу по трьох осях) навіть в нерухомому стані, на відміну від акселерометра;
- магнітометр, який служить для реакції на магнітне поле Землі, а також визначення сторони світу. Окремим випадком цього датчика є датчик Холла;
- датчик наближення для визначення якої-небудь перешкоди поблизу РО;
- датчик освітленості, за допомогою якого можна визначити рівень освітленості навколишнього середовища.

- компас, що використовується для визначення напрямку руху РО.

За рівнем взаємодії між системою локалізації та об'єктом позиціонування (РО), перераховані пристрої та технології можуть бути розділені на дві групи – активні і пасивні. Пасивним рівнем взаємодії є такий рівень, на якому об'єкту позиціонування потрібно виконати ряд дій в безпосередній близькості від передавального пристрою. Методи локалізації рухомих об'єктів з пасивним рівнем взаємодії включають пасивні RFID мітки, QR-коди, відеокамери, NFC- мітки.

NFC є технологією малої дальності, з низькою пропускнуою здатністю для бездротової передачі даних між двома пристроями, що підтримують дану технологію. Зв'язок між пристроями відбувається на частоті 13,56 МГц [91, 92]. Передача даних відбувається між пристроями, розташованими на відстані до 10 см (тобто між NFC міткою і зчитувачем). Структура NFC мітки показана на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Структура NFC мітки

Для перевірки працездатності методу локалізації рухомих об'єктів з використанням технології NFC було розроблено додаток для пристроїв на базі ОС Android [93, 94]. Для цього у приміщеннях, де має визначатися поточне місце розташування об'єкта, розміщуються NFC-мітки. Ідентифікаційний номер, що зберігається в кожній мітці, може бути отриманий шляхом сканування мітки відповідним пристроєм. Для отримання

інформації про поточне місцезнаходження користувач додатку використовує відповідний пристрій (мобільний телефон або планшетний комп'ютер) з підтримкою технології NFC. Сам процес локалізації об'єктів відбувається наступним чином. Користувачеві потрібно запустити додаток і піднести пристрій до будь-якої NFC-мітки для сканування її ідентифікаційного номера. Якщо отриманий номер збігається з базою даних номерів міток приміщення, то інформація про поточне місцезнаходження об'єкта виводиться на екран пристрою. Додаток був реалізований на мові програмування Java. Для написання програми під Android було використано середовище розробки з необхідними плагінами для роботи з мобільними пристроями Eclipse Android SDK.

В додатку використовується декілька екранів. На головному екрані необхідно вибрати карту, з якою в подальшому буде працювати алгоритм. Кожна з карт зберігається в xml-форматі в додатку і завантажується за потребою. Карта відповідає спеціально створеному для додатку формату (схема опису можна завантажити у додаток на носії).

Другий екран роботи програми призначений для визначення поточного (або стартового) місця розташування. Необхідно піднести NFC-мітку до місця, де знаходиться зчитувач на планшеті (або смартфоні).

Після того, як мітка буде зчитана, і буде визначено, що вона належить до потрібної карті, з'являється наступний екран (рис. 2.2), на якому буде відображена карта з поточним місцем розташування, кнопкою вибору налаштувань і стрілкою компаса. Для визначення місця положення, відбувається считування унікального номера NFC-мітки, іменованого як UID (унікальний ідентифікаційний номер). Цей унікальний номер зберігається у внутрішній базі даних програми SQLite, в якій за унікальним номером можна отримати інформацію про поточне місцезнаходження.

На цьому екрані представлена карта, по якій буде відбуватися пошук шляху, стрілка компаса і кнопка завдання налаштувань. За допомогою налаштувань, можна вибрати точки, які має відвідати РО.

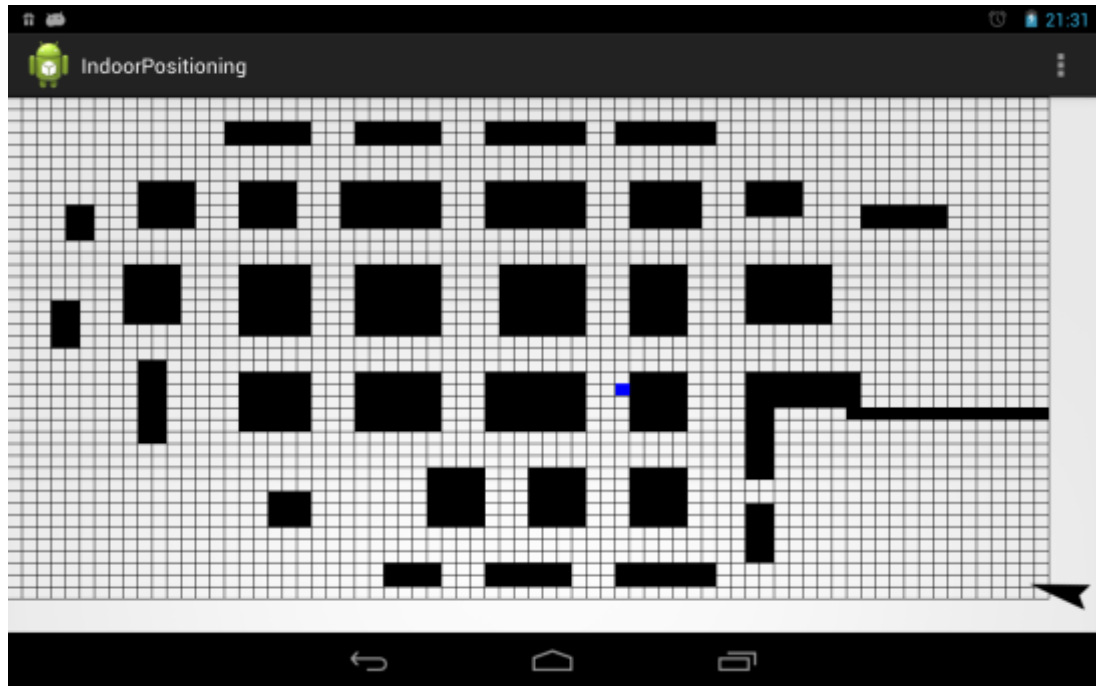


Рисунок 2.2 – Відображення карти та поточного місцезнаходження

Після всіх необхідних налаштувань та вибору точок маршруту МО на пристрої відобразиться екран, на якому буде представлена та ж карта та стрілка компасу. На цій карті, крім стартової точки, яка буде підсвічуватися синім кольором, буде побудований шлях, що проходить через обрані точки. Приклад побудови маршруту наведено на рис. 2.3.

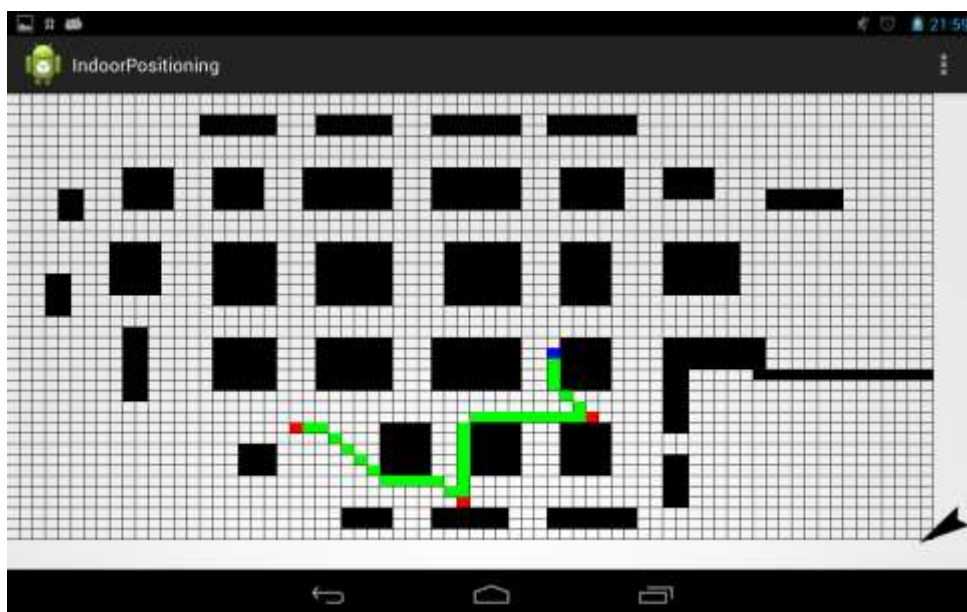


Рисунок 2.3 – Приклад побудови маршруту

Для коригування місцеположення РО можна також використовувати NFC зчитувач, який за унікальним номером мітки визначить поточне місце розташування.

Слід зазначити, що даний метод відноситься до методів з пасивним рівнем взаємодії об'єкта локалізації з системою, тому користувачеві потрібно здійснювати спеціальні операції для отримання інформації про поточне місцезнаходження РО (зокрема, знайти мітку, розташовану в приміщенні, а також розмістити пристрій в безпосередній близькості з нею).

Це є загальним недоліком всіх методів локалізації рухомих об'єктів, що використовують пасивний рівень взаємодії об'єкта локалізації з системою, навіть з огляду на високий рівень точності процесу визначення місця розташування об'єктів.

Тому більш прийнятним є процес локалізації РО з використанням методів і технологій, побудованих на активному рівні взаємодії об'єкта локалізації з системою. При цьому всі операції з обробки вхідних даних здійснюється у фоновому режимі, непомітно для об'єкта. Такий рівень взаємодії може бути досягнутий з використанням таких технологій, як Bluetooth або iBeacon.

2.2 Локалізація рухомих об'єктів з використанням технології iBeacon

Згідно з особливостями застосування технології iBeacon будемо використовувати такі основні поняття і терміни:

- мобільний комп'ютер (MC) – переносний обчислювальний пристрій;
- бездротова точка доступу (AP - AP (A), AP (B), AP (C)) – бездротова базова станція, призначена для забезпечення бездротового доступу до вже існуючої мережі;
- коефіцієнт загасання сигналу (Km) – величина, що характеризує зменшення потужності сигналу від AP при його проходженні в просторі;
- рівень потужності сигналу (RSS, dBm).

При локалізації рухомого об'єкту повинні виконуватися наступні умови (рис. 2.4):

- процес локалізації об'єкту здійснюється у відомому для мобільного комп'ютера просторі. Карта приміщення знаходиться у внутрішній пам'яті мобільного комп'ютера або може бути отримана з сервера, який знаходиться в межах досяжності мобільного комп'ютера;
- калібрування здійснюється при безпосередній близькості мобільного комп'ютера з бездротовою точкою доступу;
- апріорно відомий коефіцієнт загасання сигналу (K_m) від AP в залежності від відстані до МС. Цей коефіцієнт, а отже і відстань від AP до МС в кожній точці простору, в якому відбувається процес локалізації об'єкта, знаходиться шляхом серії визначень RSS. Процес визначення RSS відбувається з кроком в 1 метр;
- AP передає свою MAC-адресу, за якою його можна відрізнити від інших AP в мережі;
- потужність випромінюваного сигналу однакова на всіх AP;
- при невеликій відстані (з мінімальним RSS) з черговою AP потрібно проводити калібрування. Калібрування відбувається шляхом обнулення поточної відстані до AP і зміщення позиції об'єкта до AP.

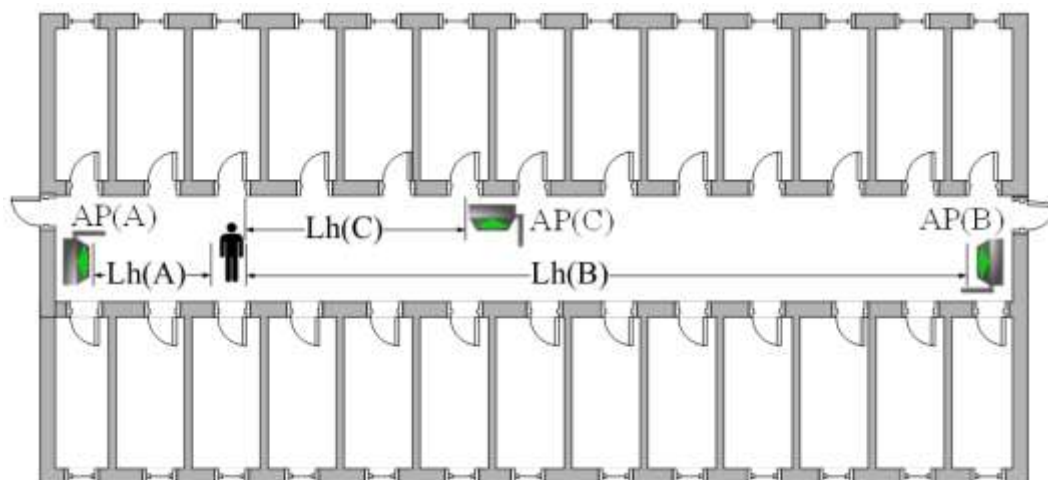


Рисунок 2.4 – Розташування точок доступу

Для визначення коефіцієнта загасання сигналу, що проходить від АР (А) до МС, був проведений ряд вимірів для різних умов, при цьому:

- вимірювання потужності сигналу проводилося кожен метр на всьому відрізку шляху від АР до МС. Одне вимірювання потужності сигналу складалося з 50-ти окремих процесів отримання сигналу з інтервалом з 1 секунду між ними. Відповідно, кожне вимірювання потужності сигналу становило 50 секунд;

- вимірювання потужності сигналу у відкритому просторі з виключенням будь-якого зовнішнього впливу, такого, як стороннє електронне обладнання. Дані вимірювання проводилися в чотири етапи. На кожному етапі вимірювання повторювалися. Перший етап полягав у відсутності бездротового з'єднання між АР і МС і наявності прямої видимості між ними. Другий етап полягав у відсутності бездротового з'єднання між АР і МС і відсутності прямої видимості між ними. Відсутність прямої видимості між АР і МС означає, що між АР і МС знаходиться людина. Третій етап полягав у наявності бездротового з'єднання між АР і МС і наявності прямої видимості між ними. Четвертий етап полягав у наявності бездротового з'єднання між АР і МС і відсутності прямої видимості між ними. Слід зазначити, що також, як наявність або відсутність стороннього електронного обладнання в зоні дії АР, присутність людини і наявність підключення МС до АР істотно впливає на потужність прийнятого сигналу;

- вимірювання потужності сигналу в закритому просторі (в приміщенні). Також, додатковою умовою до даного пункту є вимірювання потужності сигналу на різних поверхах будови, а також повторення вимірювань через деякий час, для досягнення максимальної об'єктивності отриманих даних. Як і в попередньому умови, вимірювання проводилися в чотири етапи;

- процес вимірювання сигналу проводився за допомогою маршрутизатора D-link DIR-300 (АР) і планшетного комп'ютера Asus Google Nexus 7 (МС).

Для автоматизації процесу отримання даних про потужності сигналу використовується спеціальний додаток, за допомогою якого реалізуються чотири етапи вимірювань, описані вище [95, 96]. На кожному запускається відповідна опція. При цьому потрібно встановити планшетний комп'ютер у відповідному місці (від безпосередній близькості до маршрутизатора, яка означає відстань в 0 метрів, до тих пір, коли сигнал, що надходить від маршрутизатора загасає повністю). Після того, як планшетний комп'ютер розміщений в необхідному місці, користувачеві потрібно натиснути відповідну кнопку для запуску процесу отримання сигналів. Далі користувачеві потрібно віддалитися на 1 метр від маршрутизатора і повторити вимірювання. При натисканні кнопки запуску вимірювань додаток формує значення потужності сигналу від певної необхідної точки доступу і заносить його в базу даних вимірювань. В кінці роботи програми база даних складається з 50 стовпців-значень для кожного вимірювання і деякої кількості рядків, що залежить від максимальної відстані, на якій вдається прийняти сигнал від точки доступу. Додатковою функцією додатка є розрахунок середнього значення кожного виміру (тобто загальна сума значень сигналів при кожному вимірі ділиться на 50). Після знаходження середнього значення сигналу на кожному метрі, з'являється можливість побудови графіка загасання сигналу на шляху його поширення від точки доступу до того місця, де він загасає повністю. На рис. 2.5 наведена залежність потужності сигналу прийому від відстані до точки доступу (для 1 поверху будови). Графік відображає результат проведених вимірювань при відсутності будь-якого стороннього електронного обладнання, виконаних за межами міста, у відкритому просторі. Дані графіки відображають чотири етапи вимірювання сигналів, де СПБП означають наявність підключення до точки доступу та відсутність перешкоди на шляху від точки доступу до приймаючого пристрою; СПСП означає наявність підключення до точки доступу та наявність перешкоди у вигляді людини; БПБП означає відсутність підключення до точки доступу та наявність перешкоди.

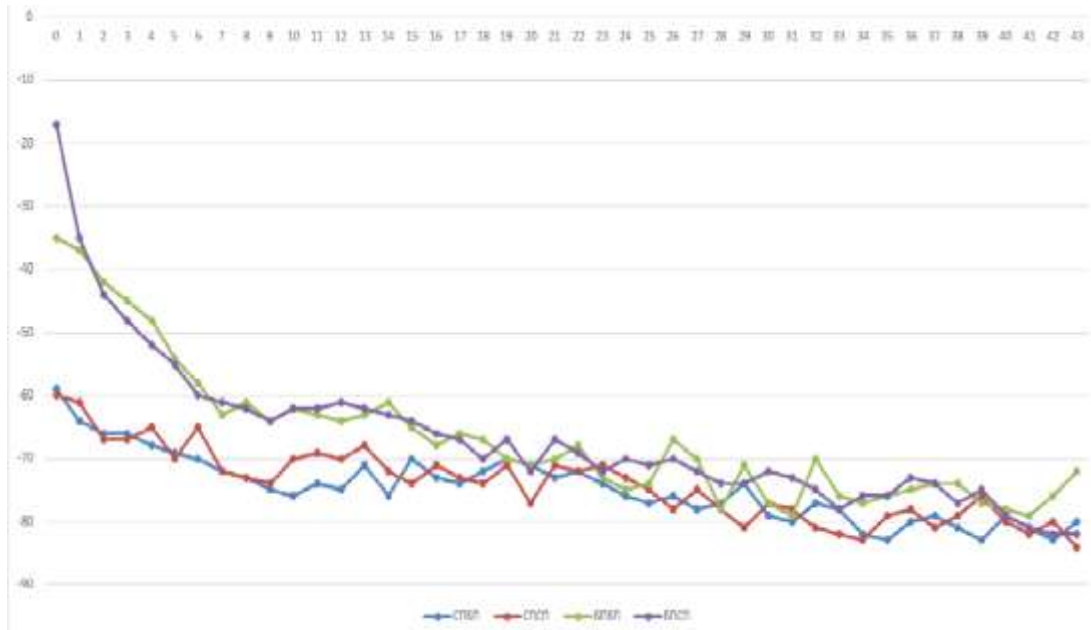


Рисунок 2.5 – Залежність потужності сигналу прийому від відстані до точки доступу (для 1 поверху будови)

На рис. 2.6 відображена залежність потужності сигналу від відстані до точки доступу (для 3 поверху будови)

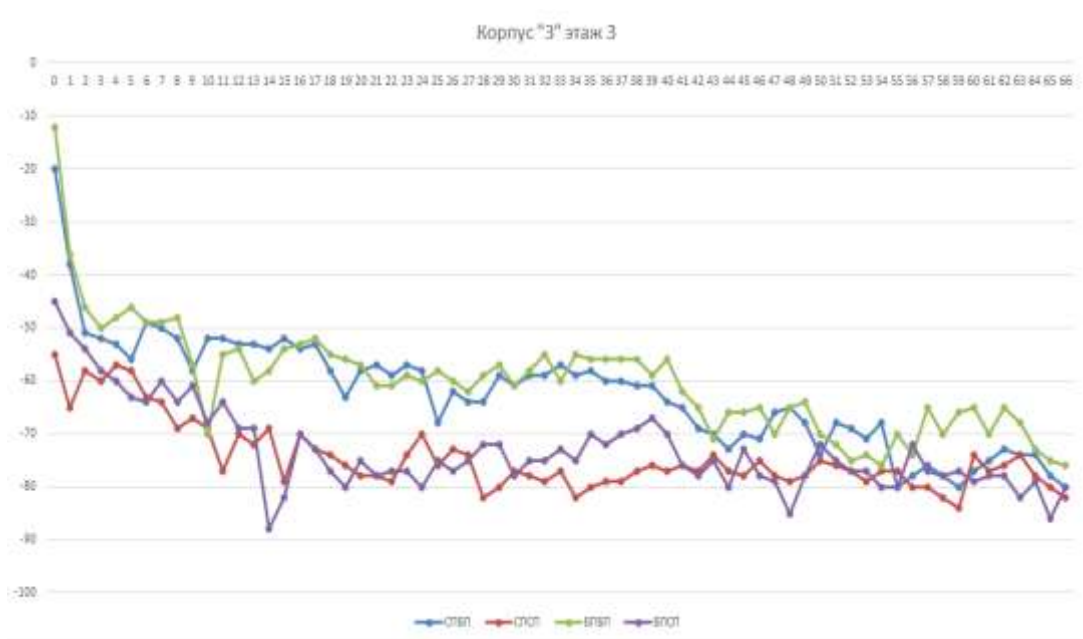


Рисунок 2.6 – Залежність потужності сигналу прийому від відстані до точки доступу (для 3 поверху будови)

Отримані залежності можуть бути використані для оцінювання закономірності загасання сигналу від відстані (за умови наявності підключення до точки доступу та відсутності перешкоди в умовах відсутності стороннього електронного обладнання, а також інших пристроїв, що впливають на поширення сигналу). Це дозволяє коригувати результати актиної локалізації РО (зокрема і МР) в закритих приміщеннях.

Система локалізації рухомих об'єктів за допомогою даної технології може бути заснована на принципі перевірки MAC-адреси найближчого передавача з базою даних доступних адрес, а потім відображає поточного місця розташування об'єкта на екрані пристрою. Визначення найближчого передавача може бути реалізована за допомогою такого параметра як RSS (потужність сигналу) [96].

Якщо відстані між передавачами і пристроєм одержувача відомі, місце розташування об'єкта може бути розраховане за допомогою методу LSE, що дозволяє визначити координати РО:

$$\begin{cases} r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \\ r_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \end{cases}, i, j \in 1 \dots N . \quad (2.1)$$

Периметр місця розташування об'єкта може бути отриманий з використанням наступної формули:

$$r_i^2 - r_j^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - (x - x_j)^2 - (y - y_j)^2 . \quad (2.2)$$

Отримані результати можуть бути використані для побудови системи локалізації керованих рухомих об'єктів в закритих приміщеннях, де застосування спутникової локалізації є ускладненим або неможливим.

2.3 Гібридний метод фільтрації в задачах локалізації мобільних роботів

Останнім часом отримали розвиток методи локалізації та навігації автономних мобільних роботів (АМР) з можливістю використання в них фільтрації Калмана [97 – 100].

Розглянемо три типи завдань локалізації різної складності:

– відстеження положення, метою якого є оцінювання поточного положення (стану) АМР за пропріоцептивними даними (п / п-даними) або за оновлюваними перцептивними даними (п-даними), що отримуються за допомогою датчиків. У разі п / п-даних завдання розглядає переміщення робота і передбачає в загальному випадку підвищити точність поточного оцінювання стану АМР при наявності помилок вимірювання. У разі п-даних завдання полягає у поліпшенні цієї оцінки з урахуванням зв'язку таких даних з навколишнім середовищем. Застосування такого підходу є основним для досягнення оцінок положення, які могли б вважатися правильним положенням робота в реальному середовищі. Інтеграція двох типів даних дозволяє комбінувати їх переваги, щоб краще оцінювати становище робота. На практиці, відстеження стану АР є нетривіальним завданням, так як воно заснована на використанні початкової оцінки стану, яка часто визначається зовнішніми джерелами. Крім того, якщо поточна оцінка положення занадто віддаляється від реального положення робота, часто неможливо скоригувати помилку і визначити реальний стан робота, що призводить до зміщення алгоритму;

– глобальна локалізація: визначення положення АМР без всякого початкового оцінювання. Це важливо з точки зору автономії, так як дозволяє роботу знаходити свою початкову позицію в будь-яких умовах без зовнішнього втручання. Такий підхід, наприклад, дає можливість відключати живлення робота до потрібного моменту, потім переміщати цей робот в будь-яку точку середовища, не турбуючись про правильну ініціалізацію оцінки його положення.

– третій тип локалізації: знаходження реального положення робота при наявності зміщеної оцінки становища. У порівнянні з глобальною локалізацією цей випадок характеризується додатковою складністю, пов'язаною з необхідністю розпізнавати, чи є оцінка поточної позиції правильною. При цьому треба вирішити непросте завдання: розділити випадки, коли п-дані є зашумленими (без фактичного зміщення робота), і випадки, коли робот реально змістився.

Методи відстеження стану та глобальної локалізації мають дуальні властивості. Як зазначено в [86], в разі наявності метричної карти відстеження положення є локальним безперервним методом, який регулярно здійснює невеликі коригування оцінок становища робота. Такі коригування ґрунтуються на характерних об'єктах середовища (мітках) і способах їх виявлення роботом. Ідентифікація цих об'єктів спрощується завдяки початковому оцінюванню положення, яке дозволяє в разі перцептуального аліасинга вирішити, який об'єкт ідентифікується (з усіх можливих об'єктів, що виявляються п-датчиками).

Навпаки, глобальна локалізація є глобальним дискретним методом, який час від часу здійснює коригування великих амплітуд переміщення для оцінюваної позиції. Її першим завданням оцінювання стану є визначення того, яким об'єктам середовища відповідає кожна з перцепцій робота.

Розглянемо гібридний метод локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байєса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації.

Фільтрація Калмана дозволяє оцінювати стан системи на підставі прогнозування своєї еволюції і зашумлених вимірювань цього стану [86]. Це рекурсивний оптимальний фільтр, який передбачає, що розглянута система є лінійною, а шуми білими. У завданнях локалізації АМР станом системи є навігаційні параметри позиції робота (в найпростішому випадку його координати). При цьому прогнозування еволюції стану засновано на

одометричних даних і вимірах, які дозволяють обчислювати положення АМР відповідно до карти. Розглянемо опис фільтра Калмана (ФК) стосовно оцінювання положення АМР. У кожен момент у ФК здійснюється оцінка значення стану системи таким чином, що точність такого оцінювання можна представити у вигляді матриці коваріації P_k . Якщо позначити шум як випадкову змінну N з нульовим середнім, а $\hat{X}_k = X_k + N$, то матриця коваріації задається як $P_k = E\{NN^T\} = E\{(X - \hat{X})(X - \hat{X})^T\}$. Зазвичай, N та X на практиці невідомі, але ФК дозволяє безпосередньо оцінювати P_k .

Еволюцію стану системи можна описати наступним лінійним рівнянням:

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k + \varepsilon_1, \quad (2.3)$$

де A та B – матриці; u_k – вектор керувань; ε_1 – шум оцінювання стану (з нульовим математичним сподіванням і дисперсією $Q = E\{\varepsilon_1 \varepsilon_1^T\}$).

Вимірювання Y_k , здійснюване за станом системи, задається наступним лінійним рівнянням:

$$Y_k = HX_k + \varepsilon_2, \quad (2.4)$$

де H – матриця спостереження; ε_2 – шум вимірювання (з нульовим математичним очікуванням і дисперсією $P_Y = E\{\varepsilon_2 \varepsilon_2^T\}$).

Схему роботи ФК в системі поточної локалізації АМР наведено на рис.2.7 [101].

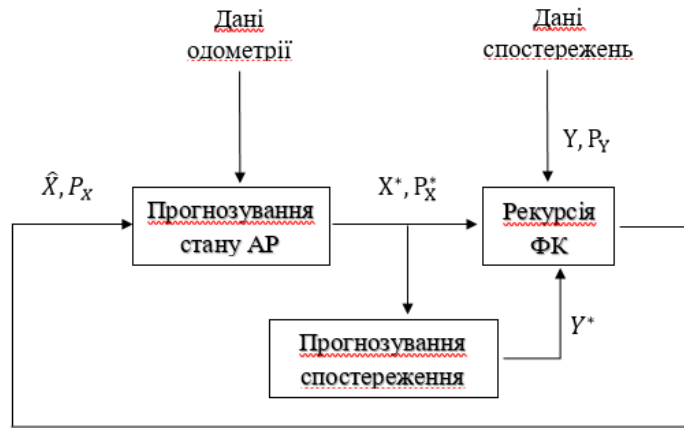


Рисунок 2.7 – Схема функціонування ФК в системі локалізації АМР

Схема передбачає реалізацію наступних етапів:

- передбачення поточного стану по коваріації на основі моделі еволюції, виходячи з оцінок на попередньому кроці часу і керувань для поточного кроку:

$$X_k^* = A \hat{X}_{k-1} + B u_k. \quad (2.5)$$

Паралельно здійснюється предикація коваріації за такою формулою:

$$P_k^* = A \hat{P}_{k-1} A^T + B Q B^T; \quad (2.6)$$

- передбачення спостереження згідно з моделлю спостереження та оцінювання стану:

$$Y_k^* = H X_k^*; \quad (2.7)$$

- спостереження за станом: вимірюється і оцінюється шум;
- корекція прогнозованого стану з урахуванням помилки між прогнозованим і реалізованим спостереженнями:

$$\hat{X}_{k+1} = X_k^* + K(Y_k - Y_k^*), \quad (2.8)$$

$$\hat{P}_{k+1} = P_k^* - KHP_k^*, \quad (2.9)$$

де K – коефіцієнт Калмана, який застосовується для мінімізації помилки за методом найменших квадратів (МНК):

$$K = P_k^* H^T (HP_k^* H^T + P_Y)^{-1}, \quad (2.10)$$

Ці етапи застосовуються на кожному кроці для переоцінки стану системи.

Розглянемо особливості функціонування такого фільтра на тривіальному прикладі: випадок, коли система описується скалярною змінною $X = x$ з дисперсією $P_t = \sigma_x^2$. Якщо припустити, що спостереження дозволяє безпосередньо отримати значення стану $Y_t = y = x$ з дисперсією $P_y = \sigma_y^2$, то коефіцієнт фільтра запишеться наступним чином:

$$K = \frac{\sigma_x^{*2}}{\sigma_x^{*2} + \sigma_y^2}, \quad (2.11)$$

а рівняння корекції приймає такий вигляд:

$$\hat{x} = x^* + \frac{\sigma_x^{*2}}{\sigma_x^{*2} + \sigma_y^2} (y - x^*) = \frac{\sigma_x^{*2} y + \sigma_y^2 x^*}{\sigma_x^{*2} + \sigma_y^2}. \quad (2.12)$$

Очевидно, що корекція зводиться до знаходження середньозваженого значення між дисперсією прогнозування і наглядом. Це середнє значення має бути більшим до величин, які мають найбільш слабку дисперсію. Таким чином, ФК вважає більш важливими величини з низькою невизначеністю і їм віддає перевагу при корекції. На практиці дисперсії засновані часто на емпіричних оцінках (зокрема, в завданнях локалізації АМР – на одометричних даних і значеннях датчиків). При цьому потрібно уважно ставитися до якості таких оцінок, так як рекурсія ФК може до них сходиться, що може привести до розладнання фільтра, якщо вимірювання датчиків не дуже надійні.

Для розглянутого вище фільтра передбачалося, що рівняння еволюції і спостереження є лінійними, що не дотримується в разі навігації АР. Для застосування в нелінійних системах використовують розширений ФК, який лінеаризує рівняння за допомогою розкладання в ряд Тейлора.

Виходячи з таких нелінійних рівнянь:

$$X_{k+1} = f(X_k, u_k) + \varepsilon_1, \quad (2.13)$$

$$Y_k = h(X_k) + \varepsilon_2, \quad (2.14)$$

можна отримати матриці-якобіани, що визначаються як:

$$A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}; \quad H_{ij} = \frac{\partial h_i}{\partial x_j}. \quad (2.15)$$

Принцип роботи ФК при використанні цих матриць не змінюється, а вихідні рівняння ФК замінюються наступними рівняннями:

$$X_k^* = f(X_k, u_k), \quad (2.16)$$

$$P_k^* = A \hat{P}_{k-1} A^T + BQB^T, \quad (2.17)$$

$$Y_k^* = h(X_k), \quad (2.18)$$

$$K = P_k^* H^T (HP_k^* H^T + P_Y)^{-1}, \quad (2.19)$$

$$\hat{X}_{k+1} = X_k^* + K(Y_k - Y_k^*), \quad (2.20)$$

$$\hat{P}_{k+1} = P_k^* - KHP_k^*. \quad (2.21)$$

Розглянемо особливості застосування ФК для локалізації АР при відсутності аліасингу.

Припустимо, що можна керувати швидкістю переміщення v та кутом повороту ω робота. Оцінюваним станом є його положення в просторі: $X_k = (x, y, \theta)$. Вектором керування є $u_k = (v, \omega)$, а рівняння еволюції системи має вигляд:

$$f(X_k, u_k) = \begin{bmatrix} x + v dt \cos(\theta) \\ y + v dt \sin(\theta) \\ \theta + \omega dt \end{bmatrix}.$$

Крім того, припустимо, що шум, що впливає на це оцінювання, є незалежним для кожної змінної і пропорційним швидкості:

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{T\nu} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{T\nu} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{R\omega} \end{bmatrix}.$$

Якщо датчики дозволяють безпосередньо вимірювати положення на карті, то рівняння спостереження набирає вигляду:

$$h(X_k) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix},$$

причому можна оцінити постійний шум для цього виміру:

$$P_y = \begin{bmatrix} \sigma_\theta & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta \end{bmatrix}.$$

Матриці якобіана, відповідні цим рівнянням і одержувані диференціюванням f та h приймають такий вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & \cos(\theta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

З огляду на те, що тут $H = I$, алгоритм розширеного ФК спрощується наступним чином:

$$X_k^* = f(X_k, u_k);$$

$$P_k^* = A \hat{P}_k A^T + B Q B^T;$$

$$Y_k^* = X_k^* ;$$

$$K = P_k^* (P_k^* + P_Y)^{-1} ;$$

$$\hat{X}_{k+1} = X_k^* + K (Y - X_k^*) ;$$

$$\hat{P}_{k+1} = P_k^* - K P_k^* .$$

Для ініціалізації алгоритму необхідно знати позиційну оцінку робота:

$$\hat{X}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} ; \hat{P}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta 0} \end{bmatrix} ,$$

а далі можуть бути застосовані рекурсивні рівняння для кожного нового переміщення або кожного нового виміру.

Розглянемо особливості застосування ФК для локалізації АМР в умовах аліасингу.

У разі істотного аліасингу в процесі спостереження можна отримати безліч різних значень навігаційних параметрів. Отже, треба серед всіх цих значень вибрати значення, відповідне реальному стану робота, яке потім буде використовуватися в рекурсії. Якщо спостереження задають вимірювання положення робота, можна просто вибрати вимір, найбільш близький до попереднього. У загальному випадку краще використовувати відстань Махалонобіса. Ця метрика дозволяє, наприклад, віддати перевагу виміру, більш віддаленому, але менш точному, яке буде мати в дійсності більш

високу ймовірність більшої відповідності до попереднього виміру. Для двох значень x та y з коваріаціями P_x та P_y , відстань Махалонобіса становить:

$$d^2 = \frac{1}{2}(X - Y)^T (P_X + P_Y)^{-1}(X - Y), \quad (2.22)$$

що в скалярному випадку відповідає звичайному зважуванню за допомогою дисперсії:

$$d^2 = \frac{(x - y)^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}.$$

У разі фільтрації Калмана, яка використовується між попереднім спостереженням і іншими спостереженнями, здійснюваними в системі, маємо:

$$d^2 = \frac{1}{2}(Y^* - Y)^T (P_{Y^*} + P_Y)^{-1}(Y^* - Y) = 0.5(HX^* - Y)^T (HP_k^* H^T + P_Y)^{-1}(HX^* - Y).$$

На основі відстаней Махалонобіса між попереднім спостереженням та іншими спостереженнями можна виділити найбільш близьке спостереження або вибрати поріг, який дасть можливість визначити, чи відповідає хоч одне зі спостережень поточному стану. Якщо одне зі спостережень вище цього порогу, воно використовується в рекурсії ФК, в іншому випадку вважається, що стан не може бути вимірним і прогноз не коригується. Один з недоліків ФК при застосуванні для локалізації АМР пов'язаний саме з цією фазою його роботи. Дійсно, в разі невдалого вибору, викликаного поганою предикцією положення АМР або помилкою датчика, помилка оцінювання положення буде підвищуватися. Такий процес може привести до розходження ФК і до втрати положення робота.

Розглянемо особливості локалізації АР з урахуванням початкового оцінювання. Положення АР, яке визначається за допомогою ФК, істотно залежить від його початкового оцінювання. Це ілюструється на прикладі, що наводиться на рис. 2.8.

Тут робот здатний оцінювати свій стан в коридорі (1 і 3), в якому він визначає двері (2 і 4) без здатності їх розпізнати індивідуально (частина а). Система локалізації повинна оцінювати становище АР, об'єднуючи ці дані. Якщо початкова оцінка стану близька до правильного положення, то система локалізації буде здатна точно оцінити реальний стан робота (частина б). Якщо ж початкова оцінка стану АР занадто далека від правильного положення, то система формує оцінку становища, яка є лише локально оптимальною і не відповідає реальному стану робота (частина в).

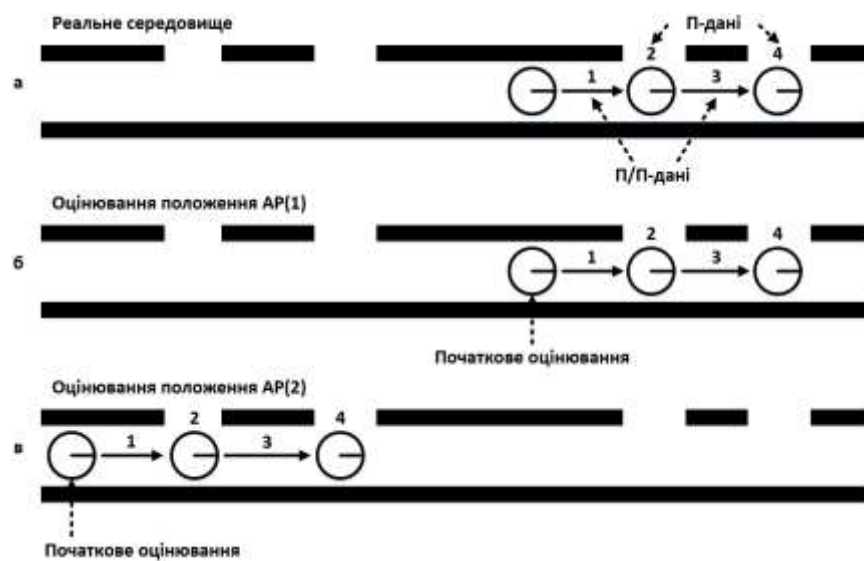


Рисунок 2.8 – Приклад локалізації АР без урахування п / п-даних

Урахування різних гіпотез дозволяє визначити положення на карті, яке в загальному випадку є найкращим за даними, отриманим роботом. Це ілюструється на прикладі, що наводиться на рис.2.9.

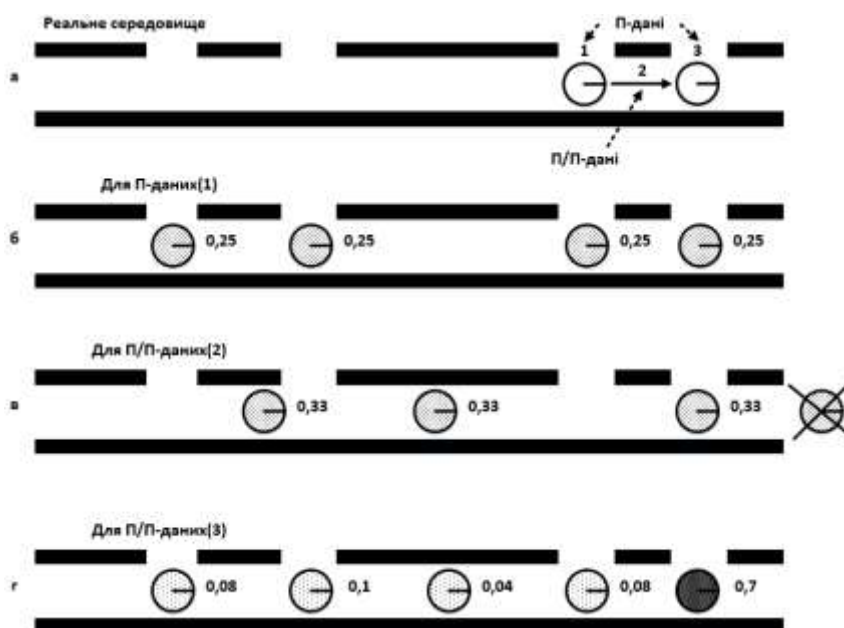


Рисунок 2.9 – Приклад локалізації АМР з урахуванням п / п-даних

У цьому прикладі робот здатний оцінювати своє становище в коридорі (2), в якому він визначає двері (1 і 3) без здатності їх розпізнати індивідуально (частина а). Знаходження двері без будь-якого попереднього оцінювання позиції дозволяє просто сформувані безліч гіпотез по положенню, які могли б відповідати цьому знаходженню. На цій стадії неможливо вирішити, яка з гіпотез є правильною (частина б). Інтеграція пропріоцептивних даних дозволяє стан для кожної з гіпотез, але не дозволяє їх розрізняти (частина в). Нові п-дані дозволяють оцінювати відносну значимість кожної з гіпотез, виділяючи найбільш значущі, позиція яких відповідає поточній перцепції (частина г). Найбільш значуща гіпотеза відповідає позиції, яка вважається найкращою для даних, зібраних до поточного моменту часу роботом.

Методи мультигіпотезної локалізації можуть також використовувати фільтрацію Байеса (ФБ) [102 – 105]. Розглянемо доцільність застосування байесовської фільтрації в задачах локалізації мобільних роботів. ФБ дозволяє об'єднати два типу інформації (одометр і п-дані), але в загальному випадку не веде до єдиної гіпотези положення. Різні гіпотези тут представляються

розподілом ймовірності присутності робота в наборі можливих положень на карті. Таке уявлення дозволяє розглядати кожне з положень на карті як можливий стан робота, ймовірність якого оцінюється. Розглянемо підхід, що дозволяє визначити дані розподілу ймовірності. ФБ об'єднує набір методів оцінювання стану, що використовують ймовірності і, зокрема, закон Байєса:

$$P(X | Y) = \frac{P(Y | X)P(X)}{P(Y)}, \quad (2.23)$$

де x – положення АМР; y – перцепція середовища;

Цей закон дозволяє оцінити ймовірність положень $P(X | Y)$, на основі знання перцепції. Для відповідних розрахунків необхідно знати $P(Y | X)$ - ймовірність перцепції визначення позиції, яка може бути обчислена за допомогою карти середовища і моделі використовуваного датчика. Ми також повинні знати оцінку глобальної ймовірності положення $P(X)$, має цю перцепцію, і глобальну вірогідність $P(Y)$ цієї перцепції. У ФБ ця формула використовується у рекурсивному варіанті і $P(X)$ є попередньою оцінкою ймовірності положення.

У рівнянні (2.23) $P(X)$ та $P(X | Y)$ – апіорна і апостеріорна ймовірності відповідно. Це рівняння дозволяє отримати прості кількісні оцінки: $P(Y | X)$ та $P(X | Y)$. Величину $P(Y | X)$ можна отримати, знаючи карту, а також модель датчика і положення, при цьому можна легко передбачити вимірювання, які повинні бути отримані датчиком. $P(X | Y)$, в свою чергу, є результатом діагностики, складним для оцінювання, так як перцепція y не дозволяє просто визначити унікальне становище, а може відповідати багатьом його значенням, зокрема, в разі аліасинга.

Розглянемо, як закон Байєса може допомогти у визначенні ймовірності положення в функції п-даних. Для локалізації АР треба відстежувати також

ефект зміщення по розподілу ймовірностей. Це просто зробити за допомогою наступного рівняння, що відображає закон маргінальних ймовірностей:

$$P(X | U) = \sum_{X'} P(X | U, X') P(X') \quad (2.24)$$

У цьому рівнянні $P(X | U, X')$ є моделлю відхилення робота, яка задає ймовірність положення, якщо робот здійснює дію U у положенні x' . Ця модель залежить тільки від робота і часто відповідає стандартній моделі одометра. апіорна ймовірність $P(X')$, є результатом оцінювання на попередньому етапі.

Для локалізації АМР необхідно оцінити його стан за кількома зсувів і декільком спостереженнями: $P(x_k | u_1, y_2, \dots, u_{k-1}, y_k)$. Щоб реалізувати рекурсивні обчислення, використовуємо гіпотезу Маркова: передбачається, що перцепції залежать тільки від поточного стану і що положення після переміщення залежить тільки від попереднього стану.

На рис.2.10 наведена схема, яка відображає зв'язки між сигналами процесу локалізації АМР на підставі послідовності п-даних і переміщень.

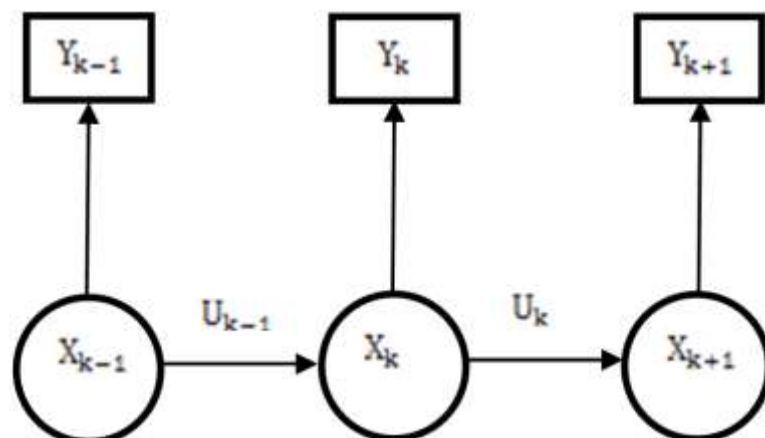


Рисунок 2.10 – Зв'язки між сигналами ФБ в завданні локалізації

Таким чином, байєсовський фільтр дозволяє оцінити рекурсивно стан системи на підставі оцінки її еволюції і вимірювань для цього стану. Щоб

застосувати таку фільтрацію, треба мати такі елементи, які відомі і які можуть бути визначені за моделями робота, датчиків і середовища:

- модель спостереження (датчик) $P(y | x_i)$, яка дає для заданої позиції ймовірність вимірювання y ;
- модель еволюції (дії) $P(x | u, x')$, яка визначає ймовірність того, що робот потрапить в x при впливі u в положенні x' ;
- послідовність управлінь та положень $u_1, y_2, \dots, u_{k-1}, y_k$;
- початкова оцінка стану $P_0(x)$, яка може бути однакової в разі глобальної локалізації або гауссовським розподілом, якщо ми знаємо початкове положення робота;

Фільтр дозволяє оцінити становище в функції вимірюваних даних: $P(x_k | u_1, y_2, \dots, u_{k-1}, y_k)$, яку ми надалі будемо позначати $P_1(x_k)$. Рекурсивне рівняння дозволяє оцінювати $P_1(x_k)$ в функції $P_1(x_{k-1})$. Ця функція може бути представлена по-різному для розглянутих вище законів:

$$P_1(x_k) = P(x_k | u_1, y_2, \dots, u_{k-1}, y_k);$$

$$P_2(x_k) = \eta P(y_k | x_k, u_1, y_2, \dots, u_{k-1}) P(x_k | u_1, y_2, \dots, u_{k-1});$$

$$P_3(x_k) = \eta P(y_k | x_k) P(x_k | u_1, y_2, \dots, u_{k-1}).$$

Очевидно, оцінювання стану за допомогою БФ пов'язане із застосуванням байєсівської рекурсії для перцепції y_k і переміщення u_{k-1} :

Байєсівський фільтр лежить в основі багатьох різних підходів, які розрізняються способом розподілу ймовірностей $P_1(x_k)$. Фільтр Калмана, наприклад, відповідає імплементації цього фільтра з гауссовськими

розподілами ймовірностей і лінійними моделями. ФК з мультигіпотезами відповідає такому уявленню в формі суми гауссіанів.

Розглянемо особливості алгоритмічної реалізації процедур фільтрації в дискретному часі. Для застосування ФК в дискретному часі необхідно вибрати спосіб представлення розподілу ймовірностей. Один з таких способів полягає в дискретизації середовища і завданні для кожної дискретної позиції ймовірності, апроксимуючої величину безперервного розподілу. Цей підхід можна використовувати одночасно з топологічними картами, де ядра застосовуються як можливі положення і метричними картами, для яких можна дискретизувати набір положень [101].

Для будь-якої обраної дискретизації алгоритм залишається одним і тим же. Йдеться про оцінку ймовірності $P_1(x_i)$, відповідної знаходженню робота в стані x_i на карті. Це здійснюється за допомогою двох різних процедур, за якими об'єднуються перцепції або п/п-дані (алгоритми 1 і 2 цих процедур наведені нижче). Для перцепції, використовуємо алгоритм 1. Вірогідність $P(y | x_i)$ формуються або по метричній моделі датчика (з дискретною сіткою), або по моделі, що порівнює п-дані з даними з пам'яті для ядер топологічної карти. Для вибору варіанту переміщення (управління) використовуємо алгоритм 2.

Алгоритм 1 – Процедура перерахунку оцінки стану ($P_1(x_i), y$);

1: $\eta = 0$

2: for all x_i do

3: $P_1'(x_i) = P_1(y | x_i)P_1(x_i)$

4: $\eta = \eta + P_1'(x_i)$

5: end for

6: for all x_i do

7: $P_1(x_i) = P_1'(x_i) / \eta$

8: end for
 9: Return $P_1'(x_i)$

Алгоритм 2 – Процедура перерахунку управліннь ($P_1(x_i, u)$);

1: for all x_i do
 2: $P_1'(x_i) = \sum_{xt} P(x_i | u, x_k) P_1'(x_t)$
 3: end for
 4: Return $P_1'(x_i)$

Практичне застосування цього алгоритму призводить до використання квадратичної функції числа станів, що ускладнює обчислення. Однак, імовірнісна модель зміщення $P(x | u, x')$ визначається величиною зміщення при видаленні від положення, котре повинно бути для управління u починаючи зі стану x' . При цьому алгоритм буде лінійним щодо числа станів на карті.

Таким чином, топологічні методи є досить простими в застосуванні, так як вони засновані, головним чином, на порівнянні п-даних. Однак, для досягнення стійкості ця процедура повинна бути виконана ретельно і може виявитися складним. Дискретна локалізація тільки на основі п-даних є складною в разі нетривіальною середовища. Облік мультигіпотез (п / п-даних) для такого завдання дозволяє поліпшити стійкість досить простим способом. Топологічні карти, однак, забезпечують відносно неточну локалізацію і вимагають наявності ефективних сенсор-моторних пристроїв для переміщень. Серед метричних методів ФК набув найбільшого поширення, але він може бути пов'язаний з труднощами налаштування і забезпечення збіжності. Застосування мульти-ФК дозволяє істотно поліпшити результат, але призводить до додаткових складнощів при реалізації. Розгляд процедури фільтрації були використані в системі

локалізації та навігації мобільного робота-транспортера при роботі в закритих приміщеннях, описаний в [96, 102].

Обчислювальна трудомісткість запропонованого методу дозволяє його реалізувати в реальному масштабі часу, що підтверджується результатами тестового моделювання. Перспективним представляється розвиток запропонованого підходу для комбінованого управління АМР в разі, коли топологічна карта містить як закриті ділянки, так і ділянки, де доступною стає поліпшення якості навігації із застосуванням супутникових систем.

2.4 Висновки за розділом 2

1. Удосконалено метод локалізації мобільних об'єктів з використанням технології NFC та iBeacon у просторі з відомими картами приміщень, що дозволяє скоротити кількість необхідних для локалізації передавачів. Для отримання інформації про поточне місцезнаходження використовується комп'ютерний пристрій з підтримкою технологій NFC та iBeacon. Локалізація мобільних об'єктів з використанням технології iBeacon та даних акселерометра у приміщеннях дозволяє скоротити кількість необхідних для локалізації передавачів.

2. Удосконалено метод локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байеса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота за умов наявності або відсутності пропріоцептивних даних.

Основні результати цього розділу опубліковано в роботах [93 – 96], [101, 102].

3 МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

3.1 Визначення оптимальних маршрутів мобільних керованих об'єктів

Для пошуку найкоротшого шляху руху мобільного об'єкта у просторі з відомими картами приміщень застосовуємо модифікацію алгоритму Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам). Алгоритм JPS прискорює пошук шляху, перестрибуючи деякі точки, які в загальному випадку повинні бути переглянуті. На відміну від подібних алгоритмів JPS не вимагає попередньої обробки і додаткових витрат пам'яті [106].

«Стрибкові» точки дозволяють прискорити алгоритм пошуку шляху, розглядаючи тільки «необхідні» точки. Такі точки можуть бути описані двома простими правилами вибору сусідів при рекурсивном пошуку: одне правило для прямолінійного руху і інше – для діагонального. В обох випадках необхідно довести, що виключаючи з набору найближчих сусідів навколо точки, знайдеться оптимальний шлях з попередньої поточної точки до кожного з сусідів, і цей шлях не буде містити в собі відвідану точку. Алгоритм рекурсивно відсікає список сусідів навколо кожної точки. Таким чином, мета алгоритму полягає в ліквідації «симетрії», рекурсивно «перестрибуючи» через всі точки, в які можна потрапити по оптимальному шляху, який не проходив через поточну позицію. Рекурсія зупиняється при попаданні на перешкоду. Стрибкові точки цікаві тим, що вони мають сусідів, які не можуть бути досягнуті альтернативним шляхом: оптимальний шлях повинен проходити через поточну точку. При цьому задається ціна переміщення між точками x та y :

$$g(y) = g(x) + dist(x, y). \quad (3.1)$$

Далі необхідно визначити, яким чином відсікати сукупність точок, що

безпосередньо прилягають до деякої точки x . Мета полягає в знаходженні таких n сусідів (тобто $\text{neighbours}(x)$), через які не можна досягти мети оптимально. Це здійснюється порівнянням двох шляхів: p , який починається точкою $p(x)$, відвідує x і закінчується в n , та іншого шляху p' , який так само починається з $p(x)$, відвідує x і закінчується в n . Крім того, кожна точка з сукупностей p або p' має бути $\text{neighbours}(x)$.

Існують два випадки, в залежності від того, який перехід до x відбувається з $p(x)$: прямий хід або діагональний. Якщо x є початком $p(x)$, то $p(x)$ порожнє і відсікання не відбувається.

При прямих переходах відсікаються будь-які точки $n \in \text{neighbours}(s)$, які задовольняють наступній умові:

$$\text{len}((p(x), \dots, n) \setminus x) \leq \text{len}(p(x), x, n). \quad (3.2)$$

При діагональних переходах шлях, який виключає x , повинен бути строго домінуючим:

$$\text{len}((p(x), \dots, n) \setminus x) < \text{len}(p(x), x, n). \quad (3.3)$$

Визначення 1: точка $n \in \text{neighbours}(s)$ є вимушеною, якщо:

1. n – не природний сусід x .
2. Виконується умова (3.2).

Визначення 2: точка y є точкою стрибка точки x , в напрямку d , якщо y мінімізує значення k так, що $y = x + kd$, і виконується одна з наступних умов:

1. Точка y – точка призначення.
2. У точки y є хоча б один сусід, який є вимушеним за визначенням 1.
3. d – рух по діагоналі і існує точка $z = y + kd$, яка лежить в k кроках в напрямку $d \in \{d1, d2\}$, таких що z – точка стрибка з y за умов 1 або 2.

На рис. 3.1 наведено приклад точки стрибка, яка визначена умовою 3.

Тут ми починаємо в точці x і закінчуємо рух по діагоналі, поки не натрапимо на точку y . З y в точку z можна потрапити за k шагів по горизонталі. Таким чином, z є наступником точки для стрибка x (за умовою 2), а це в свою чергу визначає y як наступника для стрибка точки x .

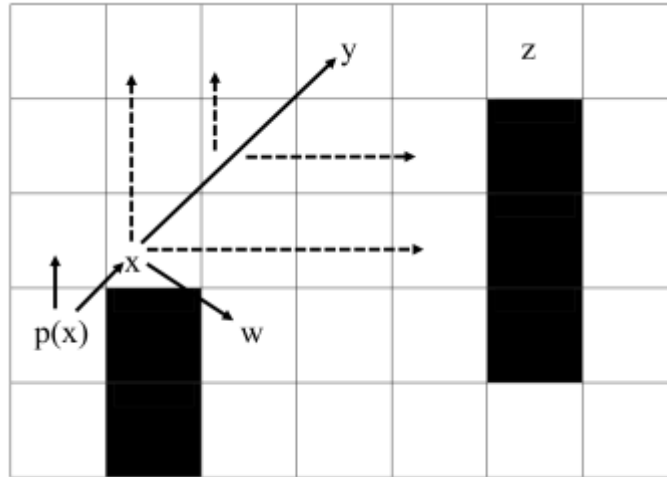


Рисунок 3.1 – Приклад стрибка за алгоритмом JPS

Алгоритм JPS показує, як шукати наступника для поточної точки. Спочатку обрізається множина сусідів, що безпосередньо прилягають до поточної точки x . Потім замість додавання кожного сусіда n в множину successors (наступників) для x , буде проведена спроба «перестрибнути» до точки, яка знаходиться далі, але лежить у напрямку x до n . Наприклад, якщо ребро $(x; n)$ відображує рух по прямій вправо від x , то точка стрибка знаходиться безпосередньо праворуч від x . Якщо знаходиться така точка, то вона додається в набір наступників замість n . Якщо до точки стрибка дійти неможливо, то нічого не додається. Процес триває до тих пір, поки всі сусіди не закінчатся, а потім алгоритм повертає список всіх наступників для x . Для функції стрибка в алгоритмі використовуються наступні позначення: x – поточна точка звіту, d – напрям, s – початок, g – мета.

Пропонована модифікація розглянутого алгоритму JPS полягає у послідовному виконанні наступних операцій [94, 107]:

1. Визначити напрямок руху (північ, північний схід (ПС), південний схід (ПівС), південь, південний захід (ПЗ), захід, північний захід (ПівЗ)).

2. Якщо напрямок руху є строго на південь, захід, північ або схід, то:

2.1 Необхідно виконати підрахунок клітин з перешкодами у напрямках, перпендикулярних руху.

2.2 Вибрати напрямок, по якому підрахунок дасть мінімальну кількість клітин з перешкодами, які необхідно пройти.

3. Якщо напрямок ПС, ПівС, ПівЗ, ПЗ, то:

3.1 Визначити основний напрям (північ, схід, південь або захід) і додатковий напрямок, який буде симетричним вихідному відносно основного.

3.2 Підрахувати, скільки необхідно пройти клітин з перешкодами в основному і додатковому напрямках плюс відстань, яку треба пройти, щоб дістатися до цільової точки в напрямку, перпендикулярному основному.

4. Продовжити будувати шлях за обраним напрямком.

Алгоритм JumpPointSearch дає шлях тільки між двома точками, але побудова маршруту полягає у відвідуванні декількох заданих точок, тому залишається проблема, в якій послідовності їх відвідувати. При цьому слід враховувати апаратні та часові витрати.

Запропонований підхід полягає у формуванні послідовності точок відвідування за модифікованим алгоритмом JPS з використанням манхеттенської відстані. У більшості випадків ця міра відстані приводить до таких же результатів, як і для звичайної відстані Евкліда. Однак при цьому вплив окремих великих різниць (викидів) зменшується (вони не зводяться в квадрат). Манхеттенська відстань визначається наступним чином:

$$l(x, y) = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|. \quad (3.4)$$

Суть підходу полягає в наступному: від стартової точки до кожної точки з множини точок відвідування обчислюється манхеттенська відстань,

вибирається мінімальна, а точка, що входить в цю мінімальну відстань, стає стартовою точкою. Кількість прорахунків манхеттенської відстані дорівнює сумі арифметичної прогресії від кількості точок відвідування. В результаті буде сформована послідовність з точок, і тільки вже потім алгоритм прорахує весь шлях. Так як виконання операцій додавання, віднімання і взяття по модулю є менш трудомістким, ніж виконання базового алгоритму JumpPointSearch, то кількість виконань алгоритму зведеться до кількості точок відвідування.

З метою оптимізації побудови шляху, а саме формування послідовності точок, які повинні бути відвідані, були протестовані різні підходи, а саме: метод визначення мінімальних відрізків, повний перебор та модифікований алгоритм JPS [107 – 109].

У таблиці 3.1 наведено результати порівняння вище зазначених підходів.

Таблиця 3.1 – Порівняння результатів для різних методів (за довжиною шляху)

Визначення мінімальних відрізків	Модифікований алгоритм JPS	Повний перебор
242	242	164
248	255	227
232	232	177
271	294	236
293	304	262
297	255	198
281	281	258
203	204	202
211	211	151
262	262	258

Результати показують, що довжина шляху при використанні модифікованого алгоритму JPS не набагато більше, ніж при повному переборі.

3.2 Стратегії нечіткого керування рухом колісного МР

Нечітке керування показало свою ефективність для задач навігації МР, але синтез нечітких регуляторів (НР), що дозволяють отримати бажану поведінку МР, не завжди є тривіальним. Основним недоліком концепції застосування нечіткої логіки є відсутність узагальненої методології при наявності значного числа визначених параметрів (параметрів функцій належності, правил нечіткого висновку тощо). Доцільною є розробка методу автономної навігації колісного МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі Такагі-Сугено, який дозволяє за допомогою НР реалізувати різні типи (стратегії) поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації. Генерація керуючих сигналів за алгоритмами, що відповідають прийнятним стратегіям, має бути заснована на вимірах датчиків для визначення положення цілі і вимірювання відстані до перешкод.

Розглянемо модель робота, що має 3 колеса (2 задніх і одне переднє), один двигун, що забезпечує кероване переміщення, і один одометричний датчик для вимірювання положення і поздовжньої швидкості. Орієнтація переднього колеса (кут його повороту) регулюється другим двигуном. Це колесо, що забезпечує стійкість МР, оснащено датчиком орієнтації, що дозволяє вимірювати кут повороту шасі робота [110, 111].

Передбачається, що в деяких реальних випадках такий МР може бути оснащений набором датчиків для вимірювання змінних з урахуванням специфіки виконуваного завдання. Основним призначенням МР є досягнення бажаної мети в межах простору навігації, уникаючи зіткнення з перешкодами, які робот автономно обходить. Система автономної навігації

має генерувати такі керуючі дії, як зміна кута повороту переднього колеса α і лінійної швидкості робота v_r .

На рис. 3.2 наведено схему орієнтації у середовищі розглянутого типу МР та змінні, які визначаються в межах такої орієнтації.

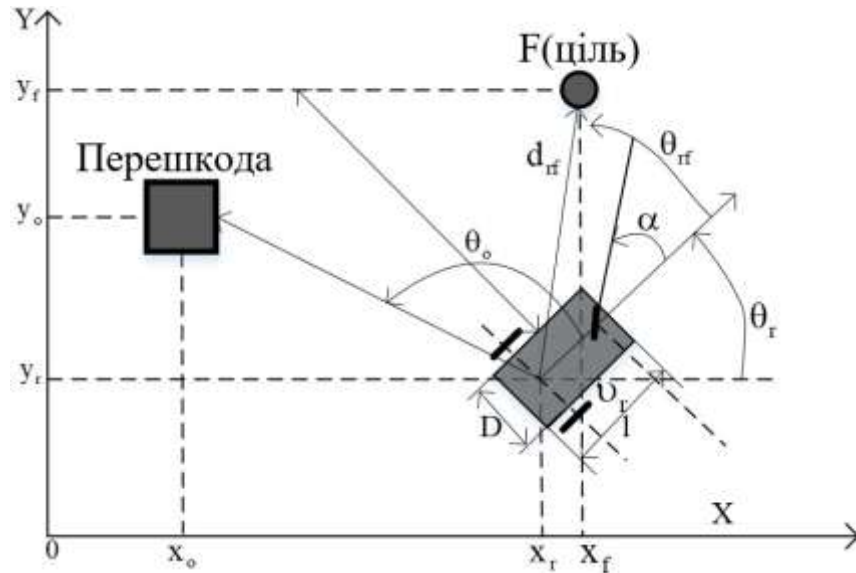


Рисунок 3.2 – Схема орієнтації у середовищі розглянутого типу МР

Кінематична модель розглянутого МР може бути представлена в дискретному часі наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} x_r(k+1) &= x_r(k) + T_0 V_r(k) \cos(\theta_r(k)), \\ y_r(k+1) &= y_r(k) + T_0 V_r(k) \sin(\theta_r(k)), \\ \theta_r(k+1) &= \theta_r(k) + T_0 \frac{V_r(k)}{l} \operatorname{tg}(\alpha(k)), \end{aligned} \quad (3.5)$$

де θ_r – орієнтація МР відносно горизонтальної осі; d_{rf} – відстань між МР і метою; θ_{rf} – кут між поточною орієнтацією МР і поточною орієнтацією мети; l – довжина шасі; D – ширина МР; d_{ro} – відстань від МР до мети; θ_o – кут

між орієнтацією МР і перешкодою; α та v_r - керуючі впливу МР (кут повороту переднього колеса і лінійна швидкість переміщення відповідно); T_0 – період квантування сигналів в часі.

Нехай система керування МР, що розглядається, складається з блоків, які враховують 5 типів нечіткої поведінки з використанням моделі Такагі-Сугено нульового порядку: «рух до мети» (Goal Seeking Behavior – GSB), «обхід перешкод, розташованих прямо» (Front Obstacle Avoider – FOA), «обхід перешкод, розташованих справа» (Right Obstacle Avoider – ROA), «обхід перешкод, розташованих зліва» (Left Obstacle Avoider – LOA) і «зменшення швидкості руху» (Velocity Reducing Behavior – VRB). Припустимо, що МР має 7 ультразвукових датчиків для виявлення перешкод в трьох напрямках (прямо, праворуч і ліворуч). Датчики згруповані у три модулі (за напрямками) і для кожного з модулів використовуються три датчики для вироблення найкращого управління рухом. На рис. 3.3 наведено один з можливих варіантів розташування датчиків на МР і розміщення їх в модулях: модуль МД1 для обходу перешкод, розташованих прямо (FOA), використовує відстані d_1, d_2, d_3 ; модуль МД2 для обходу перешкод, розташованих праворуч (ROA), використовує відстані d_2, d_4, d_6 ; модуль МД3 для обходу перешкод, розташованих зліва (LOA), використовує відстані d_3, d_5, d_7 . Датчики C_i вимірюють відстані $d_i, i = 1, \dots, 7$.

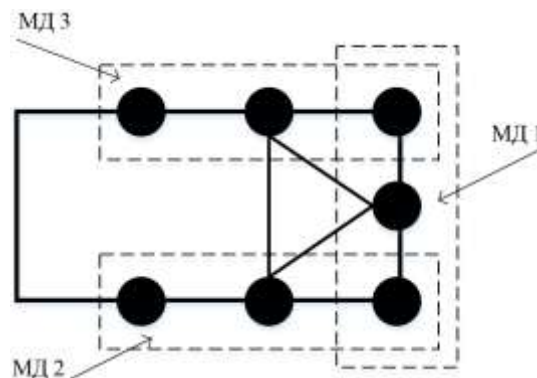


Рисунок 3.3 – Схема розміщення датчиків на МР

Розглянемо метод вирішення задачі автономного переміщення в невідомому середовищі (з обходом перешкод) колісного МР, заснований на концепції нечітких поводжень за правилами Такагі-Сугено (ТС) нульового порядку, для різних структур керування. Цей метод дозволяє синтезувати прості та ефективні регулятори в реальному часі.

Загальна система керування МР заснована на кінематичній моделі (3.5), де нечіткі регулятори (НР) дозволяють керувати рухом зміною куту повороту переднього колеса α і швидкості переміщення МР v_r . Ці керування пов'язані з основними елементарними поведінками для МР: пошуком мети і обходом перешкод. Елементарні поведінки мають фіксовані структури, які містять мінімум нечітких правил для простоти інтерпретації та оперативності керування [111].

Кожна поведінка визначається базою правил з двома входами x_1, x_2 і двома виходами, що має такий вигляд:

$$\langle \text{Якщо } x_1 \in A_1^i \text{ та } x_2 \in A_2^i, \text{ то } \alpha \in B_1^i \text{ та } v_r \in B_2^i \rangle. \quad (3.6)$$

Для НР, що використовує ТС нульового порядку, символічні величини висновків редуковані до констант або чисельних значень для α та v_r .

Сформовані при цьому виходи мають такий вигляд:

$$v_r = \sum_{i=1}^N w_i V_{ri}; \quad \alpha = \sum_{i=1}^N w_i \alpha_i, \quad (3.7)$$

де w_i – значення правдоподібності правила i , що обчислюється за Т-нормою за наступним рівнянням:

$$w_i = \mu_{A_n}(x_1) * \mu_{A_2}(x_2), \quad (3.8)$$

де A_1^i та A_2^i – параметри функцій належності входів x_1 та x_2 .

Розглянемо два типи стратегій керування поведінкою АМР в залежності від наявності або відсутності перешкод в зоні прямого спостереження: С1 – стратегія керування АМР при безпосередньому русі до мети; С2 – стратегія керування АМР при обході перешкод.

Стратегія С1 дозволяє реалізувати дію «рух до мети» АМР на основі знання його положення щодо координат навігаційної середовища (тобто зорієнтувати робот у напрямку до мети). Визначення точки мети здійснюється з двох вхідних змінних – відстані між АМР і метою (d_{rf}) і кута між поточною орієнтацією АМР і поточною орієнтацією мети (θ_{rf}) (рис. 3.2).

Запропоновану структуру системи керування роботом під час руху до мети наведено на рис. 3.4.

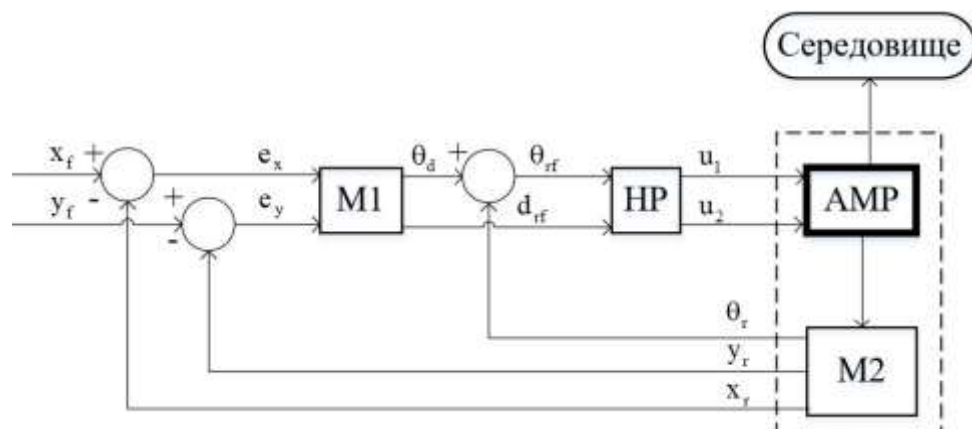


Рисунок 3.4 – Структура системи керування МР для стратегії С1

Модуль М1 порівнює реальні координати АМР з координатами мети, щоб розрахувати відстань «АМР – мета» і кут передбачуваного руху θ_a .

Потім це значення кута порівнюється з поточною орієнтацією АМР для розрахунку кута між віссю АМР і метою (θ_{rf}) за такими формулами:

$$d_{rf} = \sqrt{(x_f - x_r)^2 + (y_f - y_r)^2}, \quad (3.9)$$

$$\theta_d = \operatorname{arctg} \left(\frac{y_f - y_r}{x_f - x_r} \right), \quad (3.10)$$

$$\theta_{rf} = \theta_d - \theta_r. \quad (3.11)$$

Пропонований НР використовує дві змінні (d_{rf} та θ_{rf}) для обчислення двох керувань: u_1 (кут повороту переднього колеса α) та u_2 (швидкість переміщення АМР v_r).

Трикутні функції належності, використовувані для фазифікації вхідних змінних, наведені на рис. 3.5 і 3.6 для d_{rf} та відповідно.

Функції належності для двох керуючих впливів (відстані від АМР до мети і кута між поточною орієнтацією АМР і поточної орієнтацією мети) представлені миттєвими імпульсами (рис. 3.7 і рис. 3.8).

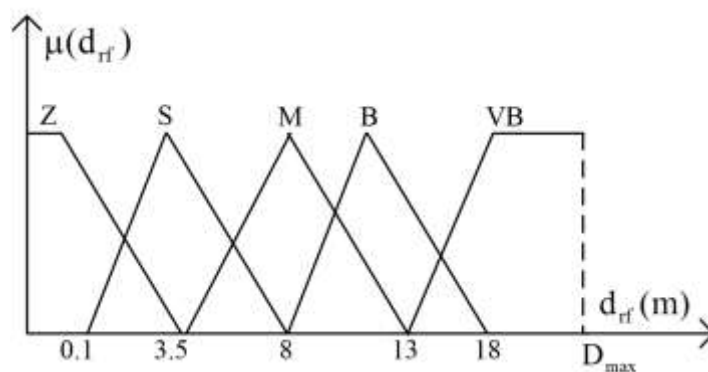
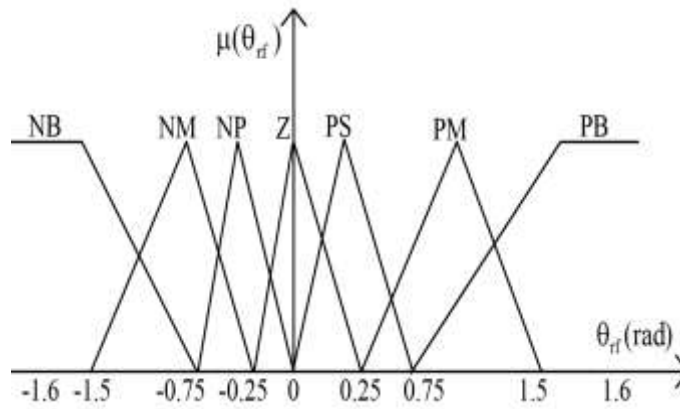
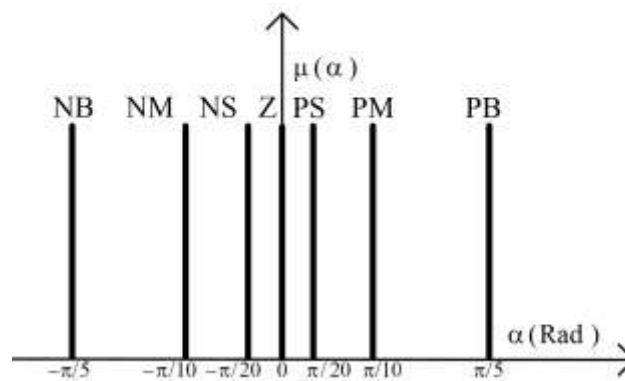
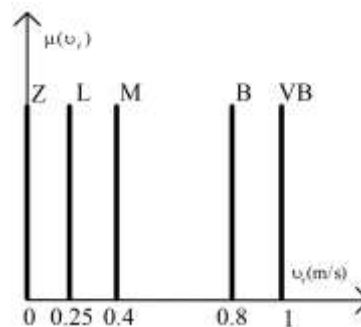


Рисунок 3.5 – Функції належності для d_{rf}

Рисунок 3.6 – Функції належності для θ_r Рисунок 3.7 – Функції належності для α Рисунок 3.8 – Функції належності для v_r

На рис. 3.5 – 3.8 використані наступні позначення лінгвістичних змінних входу і виходу системи: Z (Zero), S (Small), M (Middle), B (Big), VB (Very Big), NG (Negative Big), NM (Negative Middle), NP (Negative Small), PS (Positive Small), PM (Positive Middle) PB (Positive Big), L (Low). На основі системи керування за допомогою лінгвістичних змінних і функцій належності

для змінних входу і виходу можна сформувати правила виведення. Зв'язок між різними змінними входу і виходу системи може бути представлена за допомогою 35 правил.

Таблиця 3.2 описує нечіткі правила для реалізації поведінки МР при безпосередньому русі до мети (стратегія С1).

Ця стратегія дозволяє реалізувати автономну навігацію АМР при русі до мети, якщо робот не отримує ніякої інформації від перцептуальних датчиків, а найближче навколишнє середовище не містить перешкод. Така умова є досить м'якою з точки зору середовища, в якому АМР переміщується.

У разі наявності перешкод (статичних або динамічних), які перешкоджають руху АМР до мети, робот повинен мати ефективну можливість їх обходу.

Таблиця 3.2 – Нечіткі правила для стратегії С1

Дії(α, v_r)			θ_{rf}						
			B	NM	NS	Z	PS	PM	PB
d_{rf}	Z	α	PB	PS	Z	Z	Z	NS	NM
		v_r	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	S	α	PB	PB	PM	Z	NM	NB	NB
		v_r	L	L	L	L	L	L	L
	M	α	PM	PM	PS	Z	NM	NB	NB
		v_r	L	L	M	M	M	L	L
	B	α	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
		v_r	L	M	B	B	B	M	L
	VB	α	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
		v_r	L	M	B	V B	B	M	L

Розглянемо стратегію С2, при якій генеруються адекватні дії для уникнення зіткнень з однотипними (простими) перешкодами, якщо в околі АМР виявляються один або кілька об'єктів за допомогою перцептуальних засобів (прямо, праворуч або ліворуч).

Будемо розглядати дві структури керування для переміщення АМР в просторі з перешкодами. Перша структура заснована на одному типі поведінки під час обходу перешкод і використовує вимірювання відстані і кута між центром АМР і перешкодою. При цьому передбачається, що перешкоди мають форму кола (зона ризику зіткнення визначається околом навколо центру перешкоди). У другій структурі використовується система керування, заснована на наборі з п'яти різновидів поведінок для виконання завдання автономної навігації МР при різних типах навколишнього середовища.

Перша реалізована стратегія заснована на використанні НР, який може після вимірювання відстані D_{ro} та кута θ_o (рис. 3.2) формувати керування, необхідні для обходу помічених перешкод (u_o). Тут D_{ro} – відстань між МР та найбільш близькою перешкодою; θ_o – відносний кут між віссю МР та перешкодою; u_o – вектор, що містить кут повороту (α) і швидкість переміщення (v_r). Це НР з правилами типу Такагі-Сугено нульового порядку, який може бути використаний для менш складних середовищ з однотипними перешкодами. На рис. 3.9 представлена пропонована архітектура автономної навігації АМР. Тут використано система керування, заснована на двох типах поведінки (рух до мети і обхід перешкод) з блоком простої координації для вибору одного з двох регуляторів. Глобальне завдання навігації реалізується активацією однієї з наступних типів поведінок: рух до мети або обхід перешкод в трьох напрямках (прямо, праворуч і ліворуч). Використовуючи вимірювання датчиків (блок М2), блок М1 дозволяє визначити вхідні значення нечітких змінних. Блок М3 виконує функції НР для випадку безпосереднього руху до мети в разі відсутності перешкод в ближньому околі АМР, що відповідає поточній реалізації стратегії С1. Блок М4 виконує функції НР для випадку появи перешкод в ближньому околі МР, що відповідає поточній реалізації стратегії С2.

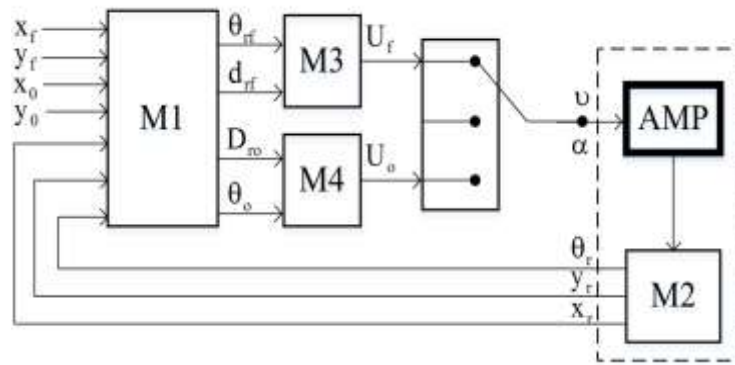


Рисунок 3.9 – Структура системи керування МР для стратегії С2

Функції належності, використовувані для фазифікації кожного з входів, наведені на рис. 3.10 та 3.11 відповідно.

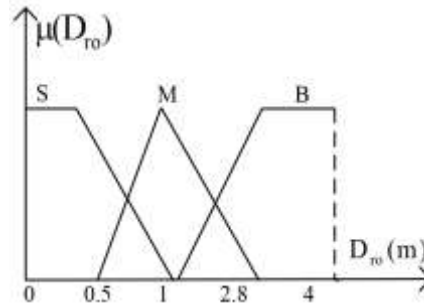


Рисунок 3.10 – Функції належності для D_{ro}

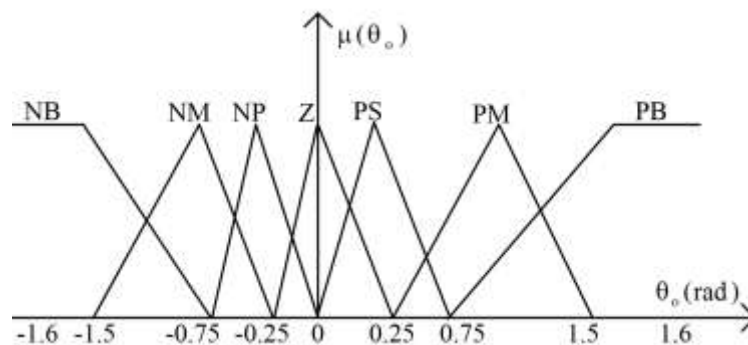


Рисунок 3.11 – Функції належності для θ_o

Тут використані наступні позначення лінгвістичних змінних: Z (Zero), S (Small), M (Middle), B (Big), NB (Negative Big), NM (Negative Middle), NS (Negative Small), PS (Positive Small), PM (Positive Middle), PB (Positive Big).

Відповідна база з 21 нечітких правил наведена в табл. 3.3.

Розглянемо стратегію С3, при якій генеруються адекватні дії в разі, коли навколишнє середовище АМР може містити перешкоди різної форми (багатокутники, стіни, еліпси і т.п.). При цьому АМР повинен мати можливість ефективного обходу цих перешкод без зіткнень.

Таблиця 3.3 – Нечіткі правила для стратегії С2

α / V_r		Кут θ_o							
			NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
D_{ro}	S	α	NM	NM	NB	NB	PB	PM	PM
		v_r	L	L	Z	Z	Z	L	L
	M	α	NS	NM	NB	NB	PB	PB	PS
		v_r	M	M	L	L	L	M	M
	B	α	Z	Z	NM	NM	PM	Z	Z
		v_r	M	M	M	M	M	M	M

Виникає необхідність збору правильної і точної інформації про середовище для здійснення навігації з урахуванням форми перешкод. Архітектура пропонованого навігатора представлена на рис. 3.12.

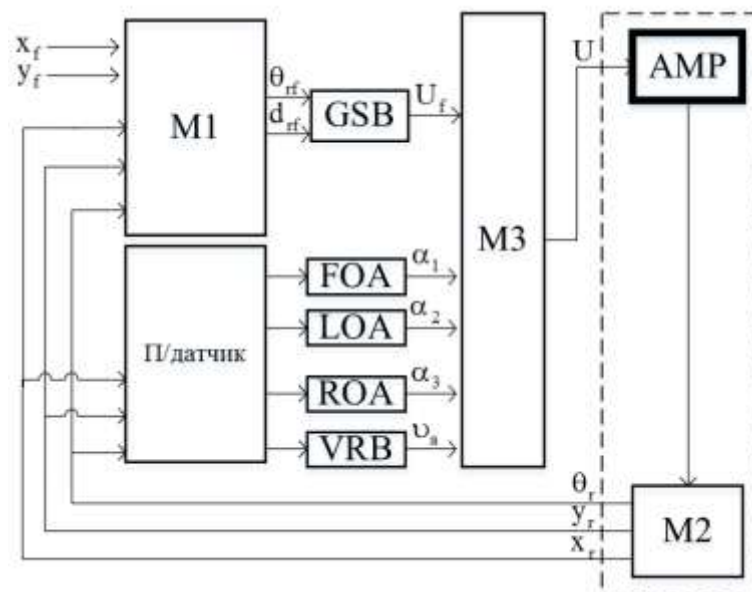


Рисунок 3.12 – Структура системи керування МР для стратегії С3

Він складається з блоків, які враховують 5 типів нечіткої поведінки з використанням моделі Такагі-Сугено нульового порядку: «рух до мети» (Goal Seeking Behavior – GSB), «обхід перешкод, розташованих прямо» (Front Obstacle Avoider – FOA), «обхід перешкод, розташованих справа» (Right Obstacle Avoider – ROA), «обхід перешкод, розташованих зліва» (Left Obstacle Avoider – LOA) і «зменшення швидкості руху» (Velocity Reducing Behavior VRB). Всі ці типи поведінки пов'язано простим блоком координації МЗ для вироблення найкращого керування діями АМР. Для цього припустимо, що МР має 7 ультразвукових датчиків для виявлення перешкод в трьох напрямках (прямо, праворуч і ліворуч), як це показано на рис. 3.3.

Для трьох регуляторів обходу перешкод використовується розглянутий раніше розподіл нечітких діапазонів для різних датчиків, де лінгвістична змінна «відстань» визначається двома нечіткими наборами: S (Small) і L (Low), як показано на рис. 3.13. Визначимо функції належності для трьох параметрів: d_m – мінімальна відстань до об'єкту, що може змінюватися зі змінням швидкості АМР; d_s – відстань безпеки, до якої АМР може переміщатися на високій швидкості; d_{max} – максимальна відстань, що може вимірюватися датчиком.

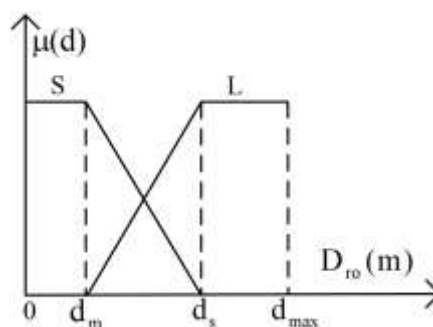


Рисунок 3.13 – Функції належності для D_{to}

Для вихідної змінної «кут повороту» використовуються ті ж набори імпульсів, як і для стратегії С1 «рух до мети» (рис. 3.7). Три вхідних відстані

для кожного регулятора дозволяють визначити 8 ситуацій, для яких вибирається краще з можливих рішень.

Використовувані нечіткі правила для модулів FOA, ROA та LOA представлені в табл.3.4, 4 3.5 та 3.6 відповідно.

Таблиця 3.4 – Нечіткі правила для модуля FOA

Кут α			Відстань d_3			
			S		L	
			Відстань d_1			
			S	L	S	L
d_2	L	α	NB	NM	NB	Z
	S	α	NB	NM	PB	PB

Таблиця 3.5 – Нечіткі правила для модуля ROA

Кут α			Відстань d_6			
			S		L	
			Відстань d_4			
			S	L	S	L
d_2	L	α	PM	Z	PM	Z
	S	α	PB	PM	PB	PM

Таблиця 3.6 – Нечіткі правила для модуля LOA

Кут α			Відстань d_7			
			S		L	
			Відстань d_5			
			S	L	S	L
d_3	L	α	NM	NM	NM	Z
	S	α	NB	NM	NB	NM

Відповідно до обраної структури системи керування АМР (рис. 3.12), якщо середовище є вільним від перешкод, то супервізор МЗ для вибору дій (α и v_r) використовує тільки регулятор руху до мети. У разі наявності

перешкод буде активізуватися відповідно до ситуації одна з можливих дій для уникнення зіткнень, а паралельно з цим активізується завдання швидкості переміщення. АМР повинен знизити швидкість в разі навколишньої перешкоди. Для цього загальна архітектура навігатора модифікується шляхом додавання нечіткого регулятора, який задає зменшення швидкості руху (Velocity Reducing Behavior – VRB). Його завданням є генерування величини настроювання поточної швидкості АМР (v_a). Ця величина додається до поточного значення для зниження швидкості у відповідності з наступним рекурентним рівнянням:

$$V_r(k+1) = V_r(k) + V_a(k). \quad (3.12)$$

Вхідними змінними при цьому є поточна швидкість АМР (v_a) і мінімальна відстань до найближчої перешкоди (D_{\min}). Фазифікації входів здійснюється наступним чином:

- для швидкості використовуються три нечітких набори (рис. 3.14) з наступними лінгвістичними змінними: S (Small), M (Middle) та B (Big).
- відстані фазифікуються за допомогою двох функцій належності: S (Small) та B (Big)), як показано на рис 3.15.

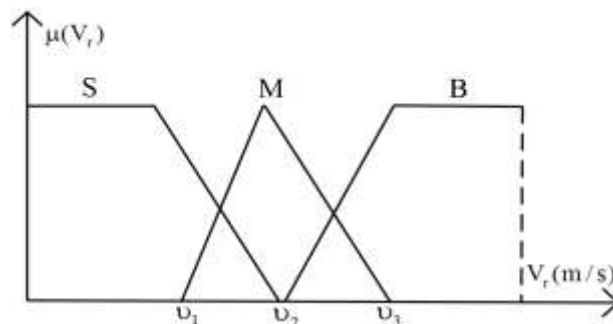
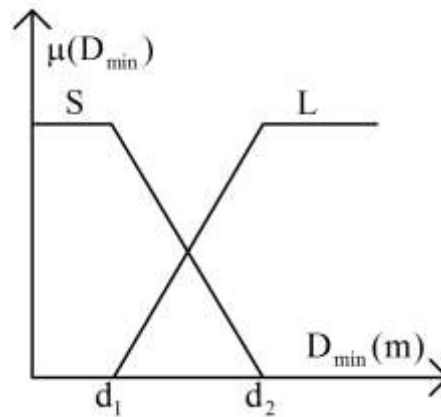
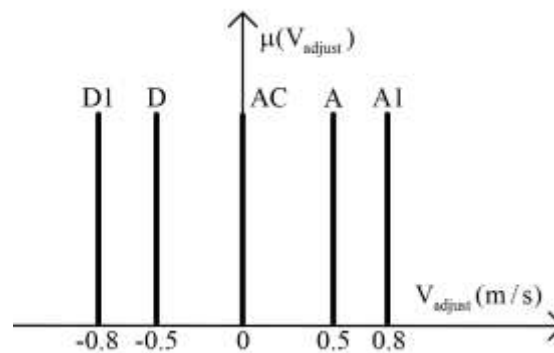


Рисунок 3.14 – Функції належності для v_r .

Рисунок 3.15 – Функції належності для D_{\min}

Величина корекції швидкості розподіляється відповідно до рис. 3.16. Позначення рівнів виходу: DI (суттєве зменшення), D (зменшення), AC (відсутність змін), A (збільшення) і AI (істотне збільшення).

Рисунок 3.16 – Функції належності для v_a

Використання такого розподілу дозволяє сформувати таблицю зміни швидкості із застосуванням шести нечітких правил (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Нечіткі правила для зміни швидкості

Швидкість АМР			Відстань D_{\min}	
			S	L
Швидкість	Низька	v_r	AC	A
	Середня	v_r	D	AC
	Висока	v_r	DI	DI

3.3 Нечітке керування рухом колісного АМР з підкріпленням навчанням

Як було відзначено в розділі 1, в RL-методах використовуються принципи адаптивної поведінки, які дозволяють мобільним об'єктам пристосовуватися до умов навколишнього середовища, що можуть змінюватися [112]. Відмінною рисою методу навчання з підкріпленням є наявність скалярного сигналу підкріплення, який отримує агент в процесі взаємодії із зовнішнім середовищем і який характеризує ефективність функціонування агента в даний момент часу. У початковому вигляді RL-метод використовує кінцеву кількість станів зовнішнього середовища і можливих впливів агента на зовнішнє середовище, а також взаємодію агента з зовнішнім середовищем в дискретні моменти часу. Навчання з підкріпленням є методом, який дозволяє знаходити оперативне рішення, яке є оптимальним в сенсі отримання максимального доходу в кожному з станів. При цьому він дозволяє в процесі навчання допускати можливість короткочасних втрат, щоб згодом максимізувати сумарний дохід на тривалому інтервалі. Внаслідок цього, навчання з підкріпленням є методом, концептуально пристосованим для ефективної роботи в системах, що характеризуються високим рівнем зміни зовнішніх і внутрішніх впливів, зокрема, в системах навігації АМР. Метою RL-алгоритмів є визначення та реалізація стратегії, заснованої на оцінках поточного стану, що відповідає максимальному значенню тривалої суми сигналів підкріплення.

Модель такого завдання може бути описана процесом рішень, алгоритм якого ідентифікує дискретний набір станів навколишнього середовища S і виконує одну з можливих дій з безлічі A [83]. У відповідь на дію a_t в момент t при поточному стані середовища s_t , агент системи отримує відповідний сигнал підкріплення $r_t = r(s_t, a_t)$ від навколишнього середовища, після чого навколишнє середовище переходить в новий стан $s_{t+1} = \delta(s_t, a_t)$.

В алгоритмі використовуються функції переходу $\delta(s_t, a_t)$. Функції переходу і підкріплення залежать тільки від поточних станів і дій.

Розглянемо можливість застосування модифікованих методів машинного навчання з підкріпленням для вирішення завдання нечіткого управління колісним АМР в безперервному середовищі, характерному для систем інтелектуального керування стохастичними процесами. Як і в підрозділі 3.2, для АМР з кінематичною моделлю (3.5) ставиться стандартна задача – дістатися до мети, уникнувши зіткнення з перешкодами. При цьому зберігаються схема розміщення датчиків на АМР (рис. 3.3) та типи нечіткої поведінки за правилами ТС. Нехай критерієм оцінки ефективності функціонування такого АМР є середнє значення нагороди, отриманої за час взаємодії з середовищем.

В загальному випадку синтез нечітких регуляторів, що дозволяють отримати бажану поведінку АМР, не завжди є тривіальним. Основним недоліком застосування таких регуляторів є відсутність узагальненої методології при наявності значного числа визначених параметрів (параметрів функцій належності, правил нечіткого висновку тощо). Існує можливість поліпшення якості нечіткого керування АМР з застосуванням RL-навчання, яке дозволяє використовувати апріорні знання для адаптації нечітких правил керування на основі максимізації середнього значення одержуваних підкріплень.

Розглянемо метод автономної навігації АМР в невідомому середовищі з комбінованим застосуванням розглянутої вище нечіткої моделі і RL-методів. Найбільш поширеним алгоритмом навчання з підкріпленням (RL-навчання), який може бути використаний в системах управління динамічними системами, є базовий алгоритм Q-навчання [83].

У цьому алгоритмі для визначення оптимальної стратегії використовується Q-функція, ітеративну процедуру поновлення якої можна представити в наступному вигляді:

$$Q_{t+1}(s, a) \leftarrow r + \gamma \max_{a \in A} Q(s', a), \quad (3.13)$$

де α – дія, що викликає перехід середовища зі стану s у стан s' ; α ($0 \leq \alpha \leq 1$) – коефіцієнт нормування значень Q-функції.

Q-функція має бути визначена для всіх пар «стан-дія». Для дискретних задач малої розмірності можна наочно показати застосування відповідних таблиць. Табличне представлення Q-функцій стає важким для безперервних просторів станів і дій, а також для випадку безперервного входу з дискретними діями. Для завдання дій тут можуть бути використані штучні нейронні мережі (ШНМ) [113, 114]. Нейромережеве уявлення Q-функцій використовує апроксимуючі властивості ШНМ, але не гарантує збіжність Q до оптимального значення Q*. Така архітектура містить N нейронних мереж типу «багатошаровий перцептрон» (N – число дій α_i), кожна з яких використовується для апроксимації функції $Q(s, \alpha_i)$ для дії α_i . Головним недоліком тут є застосування двох досить повільних підходів: Q-навчання і навчання нейронної мережі. Після застосування дії α_k у стані s , різниця $Q_{t+1}(s, a) - Q_t(s, \alpha_k)$ між еволюцією якості для кроків t та $t+1$ може розглядатися як сигнал помилки в нейронній імплементації. Для оптимізації ШНМ зазвичай використовується алгоритм зворотного поширення, що мінімізує критерій такого вигляду:

$$E_t(s, \alpha_k) = 0.5 [Q_{t+1}(s, \alpha_k) - Q_t(s, \alpha_k)]^2. \quad (3.14)$$

Нечітка версія такого уявлення для безперервного простору станів і дискретних дій, іменована Q-FUZ, запропонована в [90]. Функція якості реалізується тут нечіткою системою з N виходами. Після вибору функцій належності завдання навчання полягає в оптимізації правил виведення. Ці правила дозволяють отримати шукані значення $s \rightarrow Q(s, \alpha_j)$ для $j = 1 \dots N$.

Така структура не використовує властивості інтерполяції нечітких систем і має дискретні виходи. Розглянемо можливість розширення Q-FUZ уявлення для оптимізації нечітких правил виводу Такагі-Сугено (ТС) і його адаптації до задачі навігації МР.

Принцип роботи запропонованого модифікованого алгоритму нечіткого управління з RL-навчанням (Q-FUZM) полягає в отриманні множини висновків для кожного нечіткого правила і асоціації для кожного виводу функції якості, яка буде оцінюватися з застосуванням фіксованої функції приналежності [115]. Під час налаштування за алгоритмом Q-FUZM нечіткий регулятор (НР) мобільного робота має коригувати висновки з правил ТС на основі сигналів підкріплення. Завдання полягає в апроксимації функції якості Q наступної нечіткої функцією SIF (System Inference Fuzzy)::

$$s \rightarrow y = \hat{Q} = SIF(s). \quad (3.15)$$

Якщо вибрати нечітку ТС-систему нульового порядку (ТС0), така функція визначиться правилами такого вигляду:

$$\begin{aligned} &\text{«Якщо } s = S_1, \text{ ТО } y=c_1; \\ &\text{якщо } s = S_2, \text{ ТО } y=c_2; \\ &\dots\dots\dots \\ &\text{якщо } s = S_m, \text{ ТО } y=c_r \text{»}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де m – число правил, а прототипи i -го правила S_i визначаються як: $x_1 \in A_1^i$

та $x_n \in A_n^i$.

Для вхідного вектора s_t еволюція величини дії задається наступним рівнянням:

$$\hat{Q} = SIF(s_t) = \sum_{i=1}^m w_i(s_t) c_i, \quad (3.17)$$

де $w_i(s)$ – SIF-коефіцієнти, що визначаються за функціями належності;
 c_i – висновки нечітких правил типу (3.16).

Висновки нечітких правил $(c_i)_{i=1}^m$ можуть інтерпретуватися як обмеження функції $s \rightarrow \hat{Q}(s, \alpha)$ прототипами s_i , тобто:

$$q[s_i, \alpha] \equiv \hat{Q}(s, \alpha), \text{ якщо } s = s_i \text{ для } i = 1, \dots, r,$$

де $q[s_i, \alpha]$ – функція величини дії α у стані s_i (для правила i).

Підставляючи у (3.17) $c_i = q[s_i, \alpha]$, отримуємо:

$$\hat{Q} = \sum_i w_i(s_t) q[s_i, \alpha]. \quad (3.18)$$

Процес навчання за алгоритмом Q-FUZM із застосуванням процедури поновлення типу (3.18) дозволяє визначити набір правил, що максимізують майбутні підкріплення. Початкова база правил складається з m правил наступного виду:

«Якщо $s = s_i$, то $y = \alpha[i,1]$; при $q[i,1] = 0$; або $y = \alpha[i,2]$; при $q[i,2] = 0$; або $y = \alpha[i,N]$; при $q[i,N] = 0$, де $q[i,j]$ при $i = 1, \dots, m$ та $j = 1, \dots, N$ – потенційні рішення».

В процесі навчання висновок для кожного правила вибирається за середнім значенням сигналів підкріплення $c_r(i) \in \{1 \dots N\}$. В цьому випадку результуючий вихід визначається як:

$$A(s) = \sum_{i=1}^N w_i(s) q[i, C_r(i)]. \quad (3.19)$$

Якість такої дії оцінюється в такий спосіб:

$$\hat{Q}(s, A(s)) = \sum_{i=1}^N w_i(s) q[i, C_r(i)] \quad (3.20)$$

Алгоритм однокрокового нечіткого керування полягає в реалізації наступній послідовності дій:

- 1 Вибрати структуру системи нечіткого виведення (SIF).
- 2 Ініціалізувати $q[i,1] = 0$; $i = 1, \dots, m$ (кількість правил).
- 3 Повторити (для кожного епізоду):
 - 3.1. Спостереження стану s .
 - 3.2. Повторити (для кожного епізоду):
 - 3.2.1. Для кожного правила i обчислити $w_i(s)$.
 - 3.2.2. Для кожного правила i вибрати висновок за допомогою c_r .
 - 3.2.3. Обчислити вихід $A(s)$ та його якість, що відповідає $\hat{Q}(s, A(s))$.
 - 3.2.4. Застосувати дію $A(s)$, що приводить до нового стану s' .
 - 3.2.5. Отримати підкріплення r .
 - 3.2.6. Для кожного правила i обчислити:

$$V^*(s') = \sum_{i=1}^m w_i(s') q[i, \max(i)]$$

- 3.2.7. Обчислити:

$$\Delta Q = \beta [r + \gamma V^*(s') - \hat{Q}(s, A(s))] .$$

3.2.8. Перерахувати для нового стану елементи функції якості для обраних висновків:

$$q[i, j] = q[i, j] + \Delta Q[i, j] .$$

Дії за пунктами 3.1-3.2 повторюються до кінцевого s_r .

Розглянутий алгоритм однокрокового нечіткого Q- навчання може бути використаний для реалізації різних типів поведінки АМР (наприклад, для пошуку мети, обходу перешкод, і руху вздовж стін). У найпростішому варіанті робот використовує вихідну базу даних типу TS0, що визначає можливі ситуації для бажаної поведінки. При цьому реалізація алгоритму полягає в формуванні множини висновків типу «імпульс» для кожного правила і асоціації з кожним висновком функції якості, яка оптимізується в часі. Метою фази навчання є визначення набору висновків правил, що максимізує середнє значення сигналів підкріплень. Після реалізації обраної дії і отримання сигналу підкріплення аналізується нова ситуація.

Як і в підрозділі 3.2, розглянемо три типи стратегій керування поведінкою АМР в залежності від наявності або відсутності перешкод в зоні прямого спостереження: CRL1 – стратегія керування МР при безпосередньому русі до мети; CRL 2- – стратегія керування МР при обході перешкод; CRL 3 – стратегія керування МР при русі вздовж стін.

Стратегія CRL1 дозволяє реалізувати дію «рух до мети» МР на основі знання його положення щодо координат навігаційного середовища (тобто зорієнтувати робот у напрямку до мети). Для досягнення мети в середовищі, вільному від перешкод, МР повинен просуватися вперед, повертати направо або наліво з різною швидкістю відповідно до змінними входу регулятора. У цьому випадку, як показано в попередніх прикладах для одного і того ж типу поведінки, МР повинен вимірювати відстань «робот-ціль» (d_{rg}) і кутової помилки (θ_{rg}). Використовуючи ці дві величини, НР, що оптимізується по RL-алгоритму, буде генерувати два типи дій по пересуванню до мети (кут зміни напрямку і швидкість руху). Для цього поведінка визначається за допомогою нечіткої системи типу TS0.

Для вхідних змінних використовуються функції належності, представлені на рис. 3.17 та 3.18 з наступними лінгвістичними змінними: N

(Near), M (Middle), B(Big), NB (Negative Big), NM (Negative Middle), Z (Zero), PM (Positive Middle), PS (Positive Small), та PB (Positive Big).

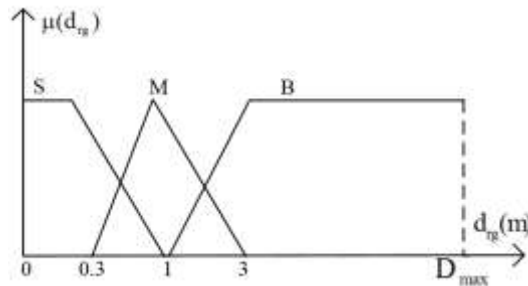


Рисунок 3.17 – Функції належності для d_{rg} (стратегія CRL1)

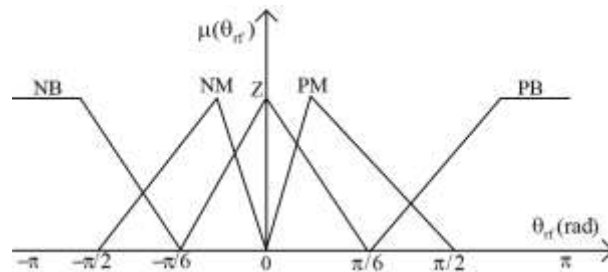


Рисунок 3.18 – Функції належності для θ_{rg} (стратегія CRL1)

При цьому утворюються 15 правил. Для кожного нечіткого правила пропонуються 3 виведення для вихідної змінної «кут повороту» такого вигляду:

«Якщо $s \in s_i$, то $\alpha = \alpha_{i1}$ при якості $q[i,1]$;

$\alpha = \alpha_{i2}$ при якості $q[i,2]$; або $\alpha = \alpha_{i3}$ при якості $q[i,3]$; для $i = 1 \dots 15$;

$$\alpha_1 = \pi/5, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = \pi/5 \rangle. \quad (3.21)$$

У нашому випадку для навчання МР при типі поведінки «рух до мети» використовується алгоритм нечіткого Q- навчання двічі для двох керувань (для кута повороту і для швидкості руху). У першому випадку під час фази настройки МР отримує ті ж значення сигналу підкріплення, що і на

попередньому етапі. При цьому під час переміщення МР формує такі сигнали підкріплення (виграшу або штрафу): 4, якщо робот досягає мети; 3, якщо d_{rg} зменшується та $\theta_{rg} = 0$; 2, якщо d_{rg} та θ_{rg} зменшуються; -1, якщо d_{rg} зменшується, а θ_{rg} збільшується; -2, якщо d_{rg} збільшується; -3, якщо МР наштовхується на стіни середовища.

Після фази навчання МР вибирає для кожного правила висновок з найкращим значенням функції якості $q[i, j]_{j=1}^N$.

Якщо МР може дійти до кінцевої мети з фіксованою швидкістю, застосовується другий алгоритм для оптимізації регулятора швидкості, при цьому передумови правил є тими ж, що використовуються при розрахунку кута повороту, але в частині висновків є відмінності.

База правил представляється тут наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} &\text{«Якщо } s \in s_i, \text{ то } v_r = v_{i1} \text{ при якості } q[i,1]; \\ &v_r = v_{i2} \text{ при якості } q[i,2]; \\ &\text{або } v_r = v_{i3} \text{ при якості } q[i,3]; \text{ для } i = 1 \dots 15 \text{ »} . \end{aligned} \quad (3.22)$$

В процесі навчання швидкості МР отримує такі сигнали підкріплення r (виграшу або штрафу): -1, якщо d_{rg} та θ_{rg} зменшуються, а швидкість збільшується; -1, якщо θ_{rg} зменшується, а швидкість и d_{rg} збільшуються; 1, якщо МР досягає мети при малій швидкості; 0 - в інших випадках. У разі наявності перешкод (статичних або динамічних), які перешкоджають руху МР до мети, робот повинен мати ефективну можливість їх обходу.

Розглянемо стратегію CRL2, при якій генеруються адекватні дії для уникнення зіткнень з перешкодами, якщо в околі МР виявляються один або кілька об'єктів за допомогою перцептуальних засобів. Обхід перешкод є основним завданням, розв'язуваним усіма МР, так як він дозволяє роботу

переміщатися в невідомому просторі, уникаючи зіткнень з навколишніми об'єктами.

Будемо припускати, що МР здатний вимірювати відстані до перешкод з трьох сторін (прямо, праворуч і ліворуч) на основі ефективної перцептивної системи. Система автономної навігації, заснована на нечіткому Q-навчанні, використовує в якості входів відстані до перешкод в трьох напрямках і повинна генерувати (після фази навчання) кут повороту переднього колеса (α) і швидкість пересування робота (v_r). Дві лінгвістичні змінні (близько (N) і далеко (F)) використовуються для опису кожної з трьох відстаней. Ці змінні представлені функціями належності (рис 3.5). База нечітких правил, отримана з використанням цих функцій, містить 8 основних ситуацій.

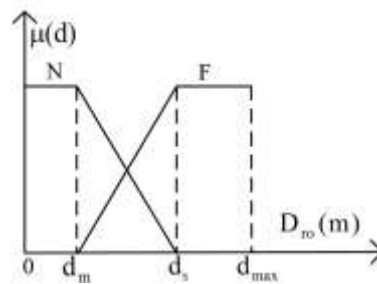


Рисунок 3.19 – Функції належності для d_{rg} (стратегія CRL2)

Алгоритм RL-навчання використовується для оптимізації нечіткого навігатора, що генерує кількість величин-кандидатів для кожного рішення. Для кожного правила і кожного виведення асоціюється функція якості $q[i, j]_{j=1}^J$ для інтерпретації j правила i , с: $i = 1 \dots 8$ и $j = 1, 2, 3$. База правил має тут такий вигляд:

«Якщо $s \in s_i$, то $\alpha = \alpha_{i1}$ при якості $q[i, 1]$;

$\alpha = \alpha_{i2}$ при якості $q[i, 2]$;

або $\alpha = \alpha_{i3}$ при якості $q[i, 3]$; для $i = 1 \dots 8$ та $j = 1, 2, 3$;

$\alpha_1 = \pi / 5$, $\alpha_2 = 0$, $\alpha_3 = \pi / 5$ ».

Глобальна якість виходу нечіткого регулятора визначається наступним

ЧИНОМ:

$$Q(s, \alpha) = \sum_{i=1}^8 w_i(s) q\left[i, j^*(i)\right]. \quad (3.23)$$

Використовуваний сигнал підкріплення r штрафує кожен висновок правила, що активується, коли МР має колізію з перешкодою.

В процесі навчання швидкості МР отримує такі сигнали підкріплення r (виграшу або штрафу): -4, якщо МР стикається з перешкодою; -1, якщо d_i зменшується та $d_i < \frac{D_{max}}{2}$; 0 – в інших випадках.

Альтернативний варіант: значення підкріплення, використовувани для навчання швидкості: -4, якщо МР стикається з перешкодою; -1, якщо $d_i > D_{max}$ и v_r низька для $i = 1 \dots 3$; -1, якщо $d_i < D_{max}$ та v_r збільшується для $i = 1 \dots 3$; 0 – в інших випадках.

Для цього застосування значення підкріплення повинно служити для визначення кращого виведення з трьох висновків, запропонованих для двох керувань.

Завданням навігації МР при русі вздовж стін є збереження безпечної дистанції робота до стін, що фіксується датчиками праворуч або ліворуч, здійснюючи рух типу «вправо» (стратегія CRL3). Для цього МР повинен збирати необхідну інформацію. Будемо використовувати для цього завдання НР Такагі-Сугено 0-го порядку (TS0) з RL-навчанням.

Сигнал підкріплення для МР визначається наступним чином: -2, якщо МР стикається з перешкодою; -1, якщо $d_i < d_m$ для $i = 1 \dots 3$; 0 – в інших випадках. Цей сигнал використовується для визначення найкращої числової інтерпретації використовуваних лінгвістичних термів. Алгоритм нечіткого Q-навчання використовується для здобуття знань, при цьому пропонуються три інтерпретації для кожного рівня виходу (зміни напрямку), наприклад, $\alpha = PG$ може бути інтерпретовано за допомогою $\alpha = 45^\circ$, $\alpha = 55^\circ$ або $\alpha = 35^\circ$. Кількісні

значення підкріплень задаються роботу наступним чином: -2, якщо МР наїжджає на перешкоду; -1, якщо $d_i < d_s$ та v_r підвищується (для $i = 1 \dots 3$); 0 – в інших випадках.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Розвинено метод визначення маршруту руху мобільних об'єктів з використанням модифікованого алгоритму Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам), що дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами.

2. Удосконалено метод автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі, який дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації.

3. Запропоновано метод локалізації та навігації МР в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан автономної навігації з комбінованим застосуванням нечіткої моделі і RL-методів, який дозволяє покращувати набір нечітких правил, використовуючи сигнали підкріплення.

Основні результати цього розділу опубліковано в роботах [94], [107 – 109], [111, 112], [115, 116].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ

4.1 Експериментальне дослідження методів локалізації мобільних об'єктів

Для перевірки працездатності даного методу було проведено кілька експериментів. Як Bluetooth передавача використовувався обчислювальний блок Lego Mindstorms NXT. База даних містила MAC-адреси передавачів і відповідне їм розташування курсора на мапі навколишнього середовища. Експерименти показали, що якщо період сканування навколишнього середовища на наявність Bluetooth пристроїв встановлений на 3,5 секунди, і відстань між передавачами дорівнює 3 метри, процес локалізації працює стабільно, а точність відображуваного розташування об'єкта становить до 95%. Єдиний недолік даного методу полягає в часі сканування навколишнього середовища. В середньому, для подолання відстані між передавачами людині потрібно відносно мало часу. Зменшення відстані між передавачами викликає зниження точності. Це робить систему, не кращим рішенням для процесу локалізації [116, 117].

Також слід зазначити, що метод «fingerprinting» не може бути використаний в парі з передавачами Bluetooth. Це підтверджують вимірювання потужності сигналу, проведені в корпусі «З» Харківського національного університету радіоелектроніки. На рис. 4.1 наведено залежність потужності сигналу від відстані до передавача, де синьою кривою позначена потужність сигналу при відсутності прямої видимості між приймаючим і передавальним пристроями, а червоною кривою – при її наявності.

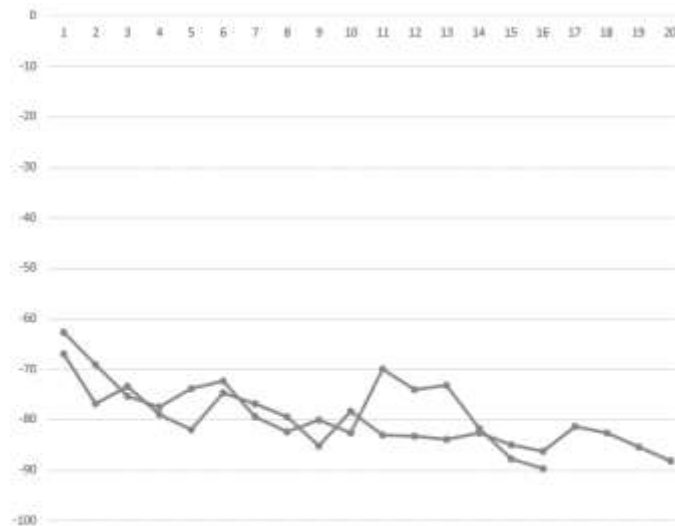


Рисунок 4.1 – Залежність потужності сигналу від відстані (технологія Bluetooth)

З рис. 4.1 видно, що дальність поширення радіосигналу від передавачів, що працюють за допомогою технології Bluetooth залежить від наявності прямої видимості. Також слід зазначити, що при наявності прямої видимості між пристроями загасання сигналу більш стабільно.

Розглянемо результати моделювання завдання визначення поточного місця розташування мобільних об'єктів з використанням технології iBeacon. Пристрої, що використовують цю технологію засновані на Bluetooth v4 LE. Система локалізації з використанням таких пристроїв працює задовільно. Дана система складається з самих передавачів iBeacon, які розміщені в приміщенні (не більше одного iBeacon на один квадратний метр) і обчислювального пристрою (мобільний телефон, планшетний комп'ютер і т.д.), які отримують і обробляють інформацію від передавачів. Дані, які обчислювальні пристрої обробляють в ході процесу локалізації складаються з ідентифікаторів та рівня сигналу, що надходить від передавачів iBeacon. Потужність сигналу використовується для визначення найближчого передавача. Передавач з найкращим сигналом вважається найближчим до об'єкта локалізації. Зазвичай це так, особливо в приміщеннях з відносно малою кількістю людей.

Реалізація методу локалізації об'єктів з використанням технології iBeacon може бути виконана для пристроїв на базі ОС IOS і Android. Реалізація даного методу для пристроїв на базі ОС IOS показана на рис. 4.2. Реалізація даного методу для пристроїв на базі ОС Android показана на рис. 4.3.

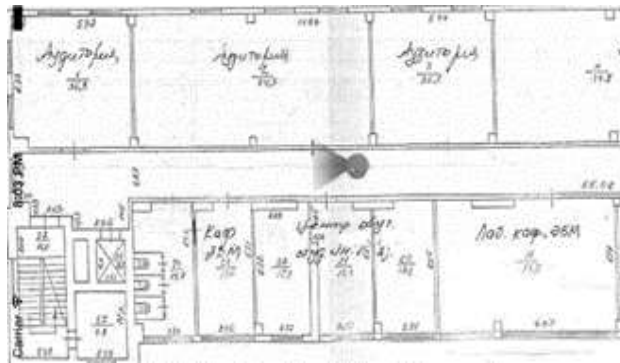


Рисунок 4.2 – Реалізація методу локалізації об'єктів з використанням iBeacon для пристроїв на базі ОС iOS

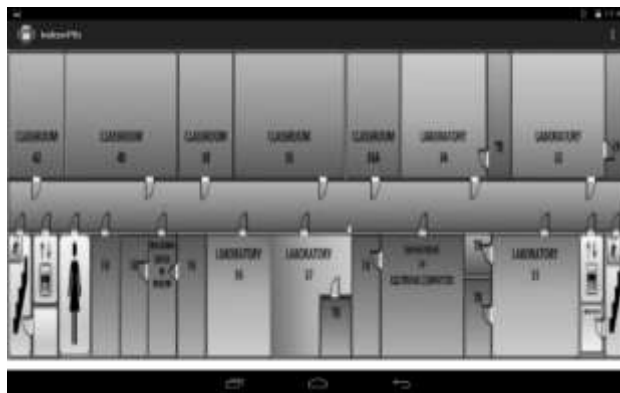


Рисунок 4.3 – Реалізація методу локалізації об'єктів з використанням iBeacon для пристроїв на базі ОС Android

Для перевірки працездатності методу «fingerprinting» були також проведені вимірювання в корпусі «З» Харківського національного університету радіоелектроніки. На рис. 4.4 наведено залежність потужності сигналу від відстані до передавача, де зеленою кривою позначена потужність сигналу при відсутності прямої видимості між приймаючим і передавальним пристроями, а синьою кривою – при її наявності.

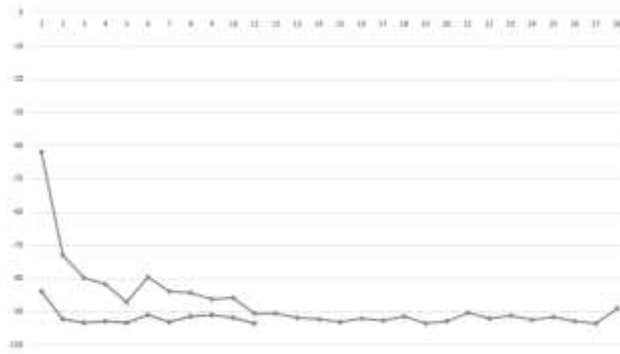


Рисунок 4.4 – Залежність потужності сигналу від відстані (технологія iBeacon)

З рис. 4.4 видно, що радіосигнал від передавачів iBeacon також надзвичайно чутливий до перешкод, а різниця дальності його поширення є більшою, ніж при роботі з технологією Bluetooth. Отже, використання методу «fingerprinting» при роботі з передавачами iBeacon також небажано.

Одним з найбільш затребуваних датчиків є акселерометр. Даний датчик бере участь в різних процесах сучасних переносних комп'ютерів - від ігор до задач визначення поточного місцезнаходження рухомих об'єктів. Процес локалізації рухомих об'єктів за допомогою акселерометра полягає в наступному. Однією з реалізацій сервісів з використанням даного датчика є крокомір. Даний сервіс визначає кроки користувача і також може розрахувати пройдену користувачем відстань. Як наслідок, для процесу локалізації системі потрібно вказати лише початкову позицію користувача. Однак, слід зазначити, що даний метод не враховує напрямок руху користувача. Даний недолік може вирішити використання датчика магнетометр і реалізації сервісу, пов'язаного з ним (компаса). На жаль, коректність роботи практично всіх магнітометрів, так само, як і технології Wi-Fi надзвичайно сильно схильна до спотворення при наявності сторонніх радіохвиль, а також електронного обладнання. Так, випробування компаса з використанням магнітометра показують, що при відсутності будь-яких перешкод, за межами міста, цей датчик показує відносно коректну роботу,

тоді як в середовищі з наявністю досить великої кількості електронних приладів компас показує надзвичайно неточні показання.

Розглянемо результати комбінованого методу локалізації рухомих об'єктів, що полягає в об'єднанні функціоналу технології iBeacon і датчика акселерометра. Даний метод полягає в наступному. В першу чергу, знаходження поточного місця розташування об'єкта провадиться в безпосередній близькості з передавачем iBeacon (в радіусі 1 метра). Даний процес відбувається за участю такого параметра, як потужність сигналу. Припустимо, граничне значення даного параметра, при якому є можливість стверджувати, що об'єкт знаходиться в безпосередній близькості до передавача (не більше -40 dBm). За такої умови система повинна відобразити стан об'єкта в радіусі 1 метра від передавача. Потім, коли об'єкт починає пересування, система запускає два паралельні процеси. Перший процес полягає в вимірі потужності сигналу від всіх передавачів в зоні видимості, другий процес полягає в запуску роботи крокоміра. Протягом тієї частини шляху об'єкта, в якій потужність сигналу від передавачів становить понад -40 dBm відображення поточного місця розташування об'єкта спирається на показання крокоміра. Середня довжина людського кроку дорівнює 70 см. Відповідно, на кожному кроці положення об'єкта буде зрушуватися на 70 см. Однак, за такої умови залишається питання про напрямок руху об'єкта. Вирішення даного питання полягає в скануванні всіх оточуючих передавачів. Той передавач, потужність сигналу від якого зменшується більше за інших передбачається як опорний, тобто, той, в сторону якого рухається об'єкт. Тому з'являється можливість реалізувати компас з відносними сторонами світла. Ілюстрація даного методу показана на мал. 4.5.

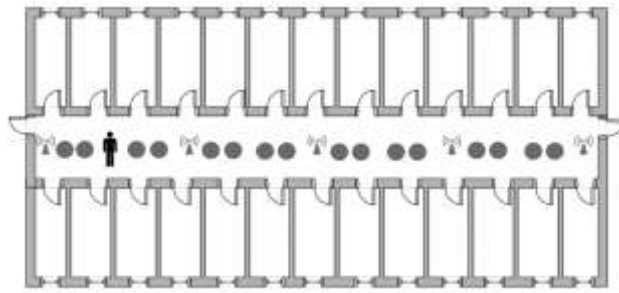


Рисунок 4.5 – Комбінований метод локалізації об'єктів

На рис. 4.5 колами позначено етап локалізації об'єктів за участю крокоміра, значки передавача показують місця коригування положення об'єкта за допомогою передавачів iBeacon.

Важливою проблемою застосування розглянутих підходів до локалізації мобільних об'єктів є розташування передавачів в просторі. Одним з найбільш поширених методів розташування передавачів в просторі є метод «1-coverage method» [116]. Загальну схему такого розташування наведено на рис. 4.6. Відповідно до даного методу, передавачі розташовуються так, щоб місце повного загасання радіосигналу від одного передавача зустрічалось з місцем повного загасання радіосигналу від іншого передавача.

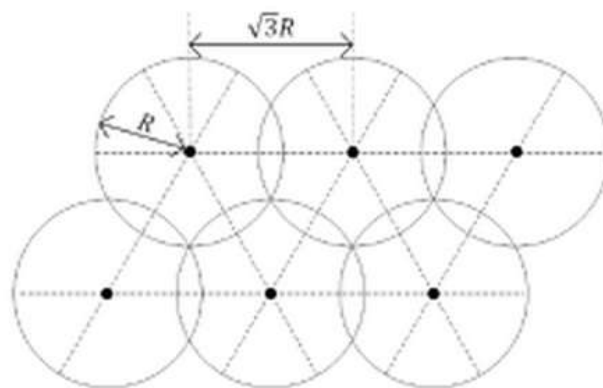


Рисунок 4.6 – Загальна схема розміщення передавачів за методом «1-coverage method»

Схема розміщення передавачів iBeacon згідно з методом «1-coverage method» показана на рис. 4.7.

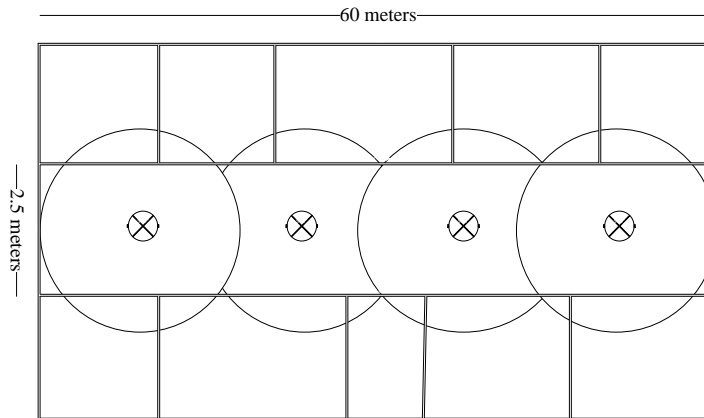


Рисунок 4.7 – Схема розміщення передавачів iBeacon згідно з методом «1-coverage method»

Так, щоб виконати повне покриття радіосигналом коридор одного поверху корпусу «3» Харківського національного університету радіоелектроніки потрібно 4 передавача iBeacon за умови дальності поширення радіосигналу в 15 метрів. Слід зазначити, що заявлена дальність поширення радіосигналу сучасних передавачів iBeacon від таких виробників, як Estimote і Kontakt становить близько 20-30 метрів. Така дальність поширення радіосигналу дозволить істотно зменшити кількість передавачів в просторі, проте за такої умови потрібно збільшити точність показань крокоміра.

4.2 Експериментальне дослідження методів навігації мобільних об'єктів

Для експериментального дослідження запропонованого підходу до локалізації та навігації МР була використана робототехнічна платформа LEGO Mindstorms NXT 2,0 [118 – 119]. Вибір даної платформи обумовлений її доступністю, гнучкістю і різноманітністю устаткування. Програмна реалізація запропонованого підходу в рамках обраної платформи проведена з використанням мови NXT-G. Як експериментальний полігон використано територію першого поверху навчально-виробничого корпусу, що містить

відкриту зону (9 кв. м.) та зону в приміщенні з залізобетонними стінами (загальною площею близько 220 кв. м). На території полігону були розставлені перешкоди (квадрати, прямокутники, перешкоди зопуклими та більш складними формами), що імітували різні типи середовища [120 – 122]. Загалом було використано 14 моделей зовнішнього середовища з різними типами перешкод та їх розташування. Для проведення експерименту використані колісні конструкції АМР, обладнані відповідним набором 7 ультразвукових датчиків. За результатами експерименту отримані численні приклади моделювання навігації колісних МР з використанням нечітких регуляторів та комбінованих регуляторів «НР-QFUZM» (в середовищах з різними типами перешкод) для підтвердження ефективності запропонованих схем керування в режимі В. Використовуване середовище враховує обмеження моделювання та руху МР в різних ситуаціях, в тому числі, у вільному просторі і в просторі зі статичними перешкодами. Взагалі було проведено 200 експериментів для тестування стратегій С1, С2 та С3 [123 – 125].

4.2.1 Моделювання навігації МР з нечіткими регуляторами

Розглянемо приклади моделювання навігації МР з нечіткими регуляторами в різних середовищах для підтвердження ефективності запропонованих схем управління. Використовуване середовище враховує обмеження моделювання та руху МР в різних ситуаціях, в тому числі, у вільному просторі і в просторі зі статичними перешкодами.

Стратегія С1. Коли п-датчики робота не фіксують жодних перешкод перед МР, то задача зводиться до безпосередньої орієнтації до мети для її подальшого досягнення (вільної навігації до мети). Для різних точок старту і фінішу МР були отримані траєкторії МР при різних конфігураціях (рис. 4.8, 4.9).

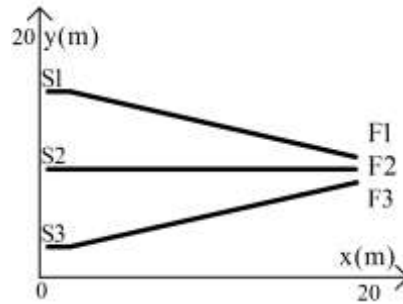


Рисунок 4.8 – Траекторія МР для стратегії С1 (приклад 1)

Як видно з рис. 4.8, МР автономно переміщається з вихідного положення (Start: s_i , $i = 1, \dots, 3$) в цільову точку (Finish: F_i , $i = 1, \dots, 3$) в кожній з ситуацій. Розроблений НР дозволяє генерувати найбільш прийнятні управління для ефективною реалізації стратегії С1. Швидкість МР зменшується при наближенні до мети. На рис. 4.9 представлений інший приклад вільної навігації до мети.

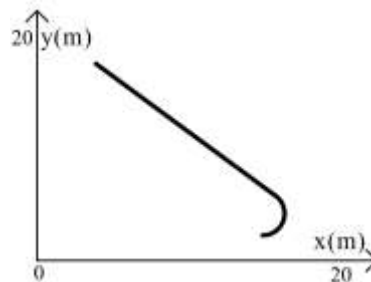


Рисунок 4.9 – Траекторія МР для стратегії С1 (приклад 2)

Якщо спостерігається зміна здійснюваних управлінь (рис. 4.10, 4.11), на старті, коли МР знаходиться далеко від цілі, НР виробляє максимальна дія кута повороту для повороту направо по напрямку до мети.

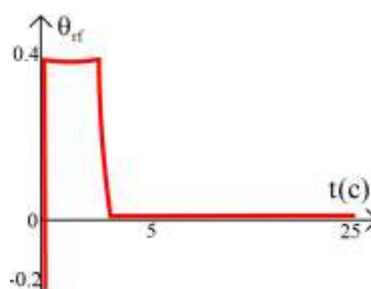


Рисунок 4.10 – Управління кутом повороту МР для стратегії С1 (приклад2)

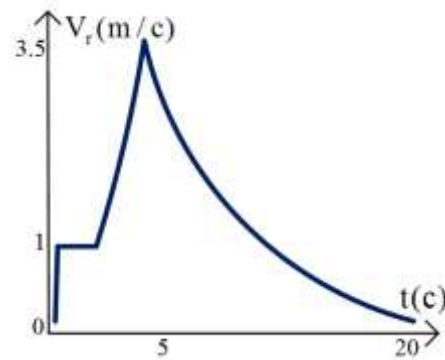


Рисунок 4.11 – Управління швидкістю руху МР для стратегії С1 (приклад 2)

Потім кут зменшується до нуля (МР має одне й те саме напрямком до мети). Швидкість переміщення для перших етапів з поворотом є низькою, вона збільшується до максимуму, поки мета ще далеко, а потім вона зменшується до нуля, коли МР наближається до мети. Отримані результати можна вважати цілком задовільними для розглянутого типу поведінки керованої системи.

Стратегія С2. Якщо середовище МР містить одну або кілька однотипних перешкод, то він повинен мати можливість обійти їх без зіткнень. Як було зазначено вище, система автономної навігації підтримує два елементарних типу поведінки: (рух до мети (тип 1) і обхід перешкод (тип 2)). МР здійснює адекватну дію для досягнення фінального результату, уникаючи зіткнення з перешкодами, вибираючи один з цих двох типів поведінки відповідно до поточної поміченої ситуацією.

На рис. 4. 12 наведено приклад навігації МР в присутності перешкод у довкіллі. МР переміщається до мети, коли одне з перешкод детектувати, з однією з трьох сторін (анфас, направо або наліво). При цьому активізується поведінку «обхід перешкоди» для вироблення відповідних управлінь і реалізації дій, що дозволяють уникнути зіткнення.

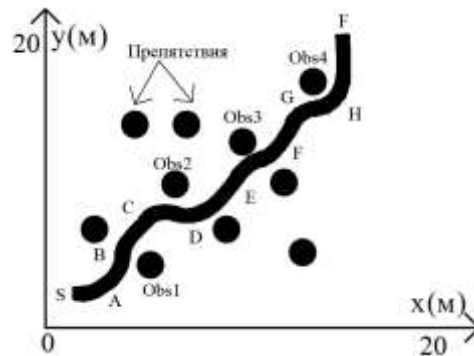


Рисунок 4.12 – Траєкторія МР для стратегії С2 (приклад 1)

Як видно з рис. 4.12, у всіх випадках МР успішно виконує автономну навігацію і може ефективно досягти мети, обходячи перешкоди незалежно від точки старту. Отримана траєкторія руху і дії МР показують, що запропонована система управління забезпечує хороші показники якості.

У прикладі на рис. 4.12 МР повинен досягти мети, стартуючи з початкової точки s_1 . МР починає здійснювати дії відповідно до одним з активізованих типів дій (в залежності від поточної ситуації). Перш за все МР переміщається до мети, активізуючи тип поведінки (і відповідний регулятор) «рух до мети» з максимальною швидкістю до моменту фіксації датчиком перешкоди 1 (Obs 1) з правої від себе боку, потім він в точці А змінює тип своєї поведінки на «обхід перешкод» до точки В. Після точки В МР отримує вільний простір і переміщається до точки С з поведінки «рух до мети». У точці С МР зауважує перешкоду 2 (Obs 2) і реалізує поведінку «обхід перешкод» аж до точки D, повертаючи праворуч. У точках E, F, G і H реалізується аналогічна стратегія МР. В кінцевому підсумку на фінішному відрізку активізується поведінку «рух до мети» зі зменшенням швидкості руху при наближенні до мети. Координація двох типів поведінки здійснюється спеціальним модулем. Використання такого типу регуляторів дає прийнятні результати для середовища з однотипними перешкодами. Але в складних середовищах, де перешкоди можуть мати різні форми, необхідно використовувати інші типи датчиків і регуляторів.

Стратегія С3. Розглянемо стратегію управління С3 для автономної навігації МР, заснована на застосуванні п'яти типів нечіткого поведінки для

обходу перешкод різної форми в трьох напрямках і датчиків іншого типу (ультразвукових або інфрачервоних).

На рис. 4.13 наведено приклад автономної навігації МР в невідомій середовищі. У процесі руху МР повинен досягти заданої мети. Коли МР фіксує перешкоду по дорозі до мети, він повинен мати можливість їх обійти, активізуючи відповідний тип поведінки за результатами вимірювання відстаней.

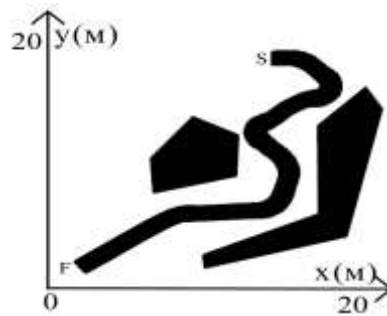


Рисунок 4.13 – Траекторія МР для стратегії С3 (приклад 1)

На рис. 4.14 наведено приклад, коли завданням МР є досягнення мети при наявності навколо її перешкод U-подібної форми. У процесі руху МР проходить паралельно стіні до моменту, коли помилка орієнтування входить в межі інтервалу, що визначає видимість. Далі МР починає рух до мети.

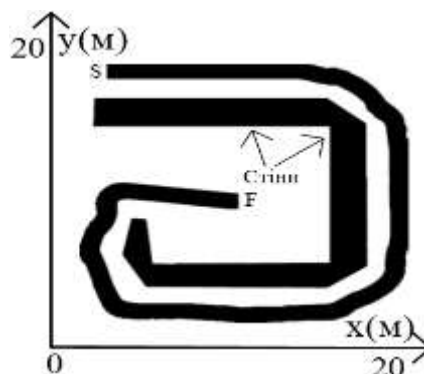


Рисунок 4.14 – Траекторія МР для стратегії С3 (приклад 2)

Рис. 4.13, 4.14 підтверджують, що МР для будь-яких змін перешкод досягав мети з обходом перешкод.

4.2.2 Моделювання навігації МР з нечіткими регуляторами та підкріпленням навчанням

Розглянемо приклади моделювання навігації МР з нечіткими регуляторами та підкріпленням навчанням в різних середовищах для підтвердження ефективності запропонованих схем управління. Використовуване середовище враховує обмеження моделювання та руху МР в різних ситуаціях, в тому числі, у вільному просторі і в просторі зі статичними перешкодами.

Стратегія CRL1. Коли датчики робота не фіксують жодних перешкод перед МР, то задача зводиться до безпосередньої орієнтації в напрямку мети для її подальшого досягнення (вільної навігації до мети). Для різних точок старту (S) і фінішу (F) МР були отримані траєкторії МР при різних початкових положеннях шасі, одна з яких (після етапу RL-навчання) приведена на рис. 4.15.

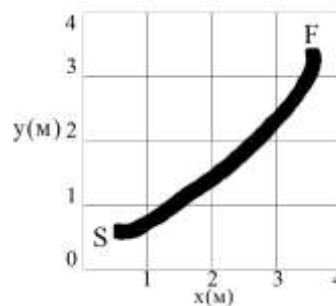


Рисунок 4.15 – Траєкторія МР для стратегії CRL1 (приклад 1)

Відзначимо, що поведінка МР поліпшується в процесі навчання (середні значення сигналів підкріплення отримані для кожного кроку навчання, наближаються до константи 2, починаючи з кроку 180, що свідчить про збіжність до оптимального рішення для початкової позиції). Щоб оптимізувати нечітку систему навігації з RL-навчанням, початкові положення МР повинні бути обрані випадковим чином під час фази навчання. У серії проведених експериментів (для МР з 15 правилами і 3

висновками) кожен епізод починався з випадкового положення і закінчувався, коли МР досягав мети. При цьому поведінка робота поліпшувалася з часом, що підтверджує відповідність використовуваних Q-FUZM-алгоритмів.

Стратегія CRL2. Якщо середовище МР містить одну або кілька перешкод, то МР повинен мати можливість обійти їх без зіткнень. Як було зазначено вище, система автономної навігації підтримує два елементарних типи поведінки: (рух до мети (тип 1) і обхід перешкод (тип 2). МР здійснює адекватні дії для досягнення фінального результату, уникаючи зіткнення з перешкодами, вибираючи один з цих двох типів поведінки в відповідно до поточної ситуації. При цьому значення підкріплення повинно служити для визначення кращого виведення з трьох висновків, запропонованих для двох керувань.

Припустимо, що робот при старті знаходиться в зоні, вільній від перешкод і орієнтується у напрямку до мети для її досягнення, уникаючи колізій. В процесі навчання МР повинен виробляти можливі дії для кожної реєстрованої ситуації. МР переміщається до мети, коли одна з перешкод детектується з однієї з трьох сторін (прямо, направо або наліво). При цьому активізується поведінка «обхід перешкоди» для знаходження відповідних керувань і реалізації дій, що дозволяють уникнути зіткнення.

У серії проведених експериментів (для різних типів перешкод) кожний епізод починався з випадкового положення і закінчувався, коли МР досягав мети. Приклади отриманих траєкторій (після етапу RL-навчання) наведені на рис. 4.16 та 4.17.

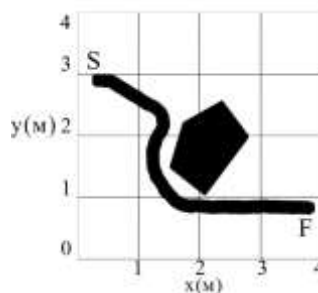


Рисунок 4.16 – Траєкторія МР для стратегії CRL2 (приклад 1)

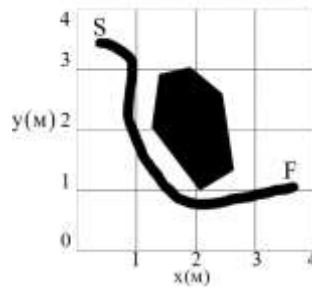


Рисунок 4.17 – Траєкторія МР для стратегії CRL2 (приклад 2)

Стратегія CRL3. Ця стратегія застосовується, якщо МР повинен здійснити обхід стін по контуру або досягти мети, огинаючи стіни. Експерименти з МР без етапу RL-навчання показали, що колісний робот може ефективно рухатися уздовж стін, але в разі, якщо перешкода містить кути, МР не здатний уникати колізій. У серії експериментів для МР, керованих по Q-FUZZM-алгоритмам (для різних типів стін) кожен епізод починався з випадкового положення і закінчувався, коли МР повністю обходив контур або (відповідно до завдання) досягав мети. Приклади отриманих траєкторій обходу роботом стін (після етапу RL-навчання) наведені на рис.4.18 та 4.19.

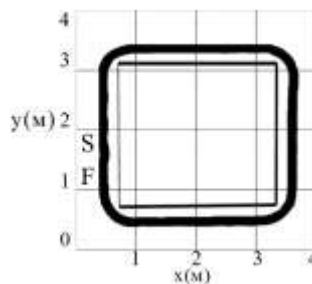


Рисунок 4.18 – Траєкторія МР для стратегії CRL3 (приклад 1)

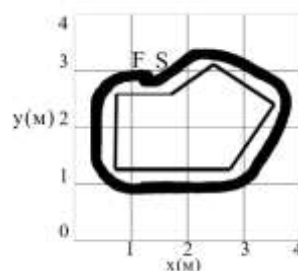


Рисунок 4.19 – Траєкторія МР для стратегії CRL3 (приклад 2)

Приклад траєкторії МР при русі вздовж стін для досягнення мети в закритому просторі наведено на рис. 4.20.

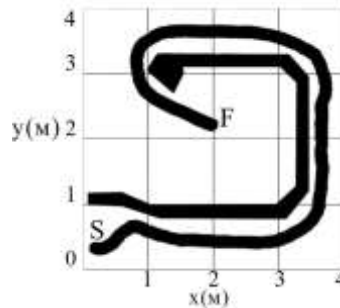


Рисунок 4.20 – Траєкторія МР для стратегії CRL3 (приклад 3)

Результати експериментів показали, що НР та Q-FUZM регулятори дають прийнятні результати для реалізації розглянутих стратегій. Позитивний результат (проходження маршруту АМР з точки S до точки F) було зафіксовано: для стратегії C1 (керування АМР при безпосередньому русі до мети) – 100%; для стратегії C2 (керування АМР при обході однотипних перешкод) – 98%; для стратегії C3 (керування АМР при обході однотипних перешкод) – 92%.

4.3 Використання отриманих результатів в навчальному процесі

Окремі положення дисертаційної роботи використано в навчальному процесі для підготовки та модифікації курсу «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці» [126]. Для експериментального дослідження способів локалізації та навігації в цьому курсі була задіяна робототехнічна платформа LEGO Mindstorms NXT 2,0 (програмне забезпечення Eclipse LEJOS; Lego Mindstorms NXT Tribot). Вибір даної платформи обумовлений її доступністю, гнучкістю і різноманітністю устаткування. Програмна реалізація досліджуваних методів в рамках обраної платформи послідовно було зібрано різні конструкції АМР, що відрізняються набором датчиків і

реалізованими алгоритмами навігації. В ході проведення експериментів також замірявся параметр енергоефективності, виражений в максимально можливій кількості повторів проходження однієї й тієї ж карти на одному заряді акумулятора АМР. Зазначені параметри вимірювалися в двох ситуаціях: при статичній карті місцевості та при динамічно мінливій карті, на якій віддалялися і додавалися перешкоди в ході руху АМР.

В першій частині курсу розглядалися особливості використання для локалізації та навігації АМР датчиків різних типів (зокрема, датчики дотику, ультразвукові датчики, звукові датчики та датчики світла).

Датчики дотику платформи Mindstorms NXT виконують функцію бампера, тобто здійснюють спосіб взаємодії АМР з навколишнім середовищем, дозволяючи виявляти перешкоди та відповідно змінювати його поведінку згідно з формою перешкод, які він зустрине під час руху. Для визначення кроків, необхідних для того, щоб робот рухався вперед, поки він не торкнеться стіни, використовується псевдокод, що здійснює поєднання неформальних структур програмування та словесних описів коду для окреслення програми перед переведенням її у власний синтаксис. Це допомагає в початковому плануванні програми створити логічну основу та послідовність коду. Додатковою перевагою є те, що оскільки псевдокоду не потрібно використовувати конкретний синтаксис, він може бути перекладений на різні мови програмування і тому є дещо універсальним. Він фіксує логіку і потік рішення без більшості суворих синтаксичних правил.

Нижче наведено фрагмент псевдокоду для програми, яка керує рухом АМР до тих пір, поки датчик не зафіксує дотик та не сформує сигнал на зупинку двигунів АМР (рис.4.21). При спрацьовуванні датчика дотику двигуни зупиняються і програма завершується (програмне забезпечення Eclipse LEJOS; Lego Mindstorms NXT Tribot). Для керування АМР необхідно натиснути кнопку «Пуск» та дотримуватися його стрілки вниз до блоку «Рішення». Блок «Рішення» перевіряє стан сенсорного датчика на два можливі результати: датчик натискається або не натискається.

```

package touch;
// Add necessary libraries
public class touchsensor {
public static void main(String[] args) throws Exception {
TouchSensor touch = new TouchSensor(_);
//Port number
while (!touch.isPressed()) {
//Move forward
}}}

```

Рисунок 4.21 – Фрагмент псевдокоду для програми з датчиком дотику

Якщо датчик не натиснуто, програма рухається стрілкою «Ні» до блоку дій справа, який наказує двигунам їхати вперед. Стрілка, що веде з цього блоку, вказує «назад і навколо» і закінчується командою «назад» на блоці рішення. Це утворює цикл, що може закінчитися повторенням багато разів, доки датчик залишатиметься не натисненим. Якщо натиснути на сенсор, програма слідує стрілці «Так» і зупиняє двигуни, після чого завершує програму. Блок NXT має закрити програму після декількох натискань. Також блок NXT вашого робота фіксує кількість перешкод, яких уникнув ваш робот (згідно з картоюперешкод).

Ультразвукові датчики дотику платформи Mindstorms NXT приймають відхилені звукові хвилі, потім обчислюють різницю між часом, коли вони посилають звукові хвилі, та часом, коли вони їх приймають. Нижче наведено фрагмент псевдокоду для програми переміщення АМР до тих пір, поки датчик не зафіксує необхідність зупинки роботу після виявлення перешкоди (рис.4.22).

```

package sonic;
// Add necessary libraries
public class sonic {
public static void main(String[] args) throws Exception {
//Define new US sensor
while (__) { //Min distance to obstacle
//Go forward }
//Stop}}

```

Рисунок 4.22 – Фрагмент псевдокоду для програми з ультразвуковим датчиком

Для програмування АМР може бути задана відповідна карта з перешкодами (рис. 4.23), що розміщена на своєму багатокутнику в розділі завдань (для цього створюється відповідний псевдокод).

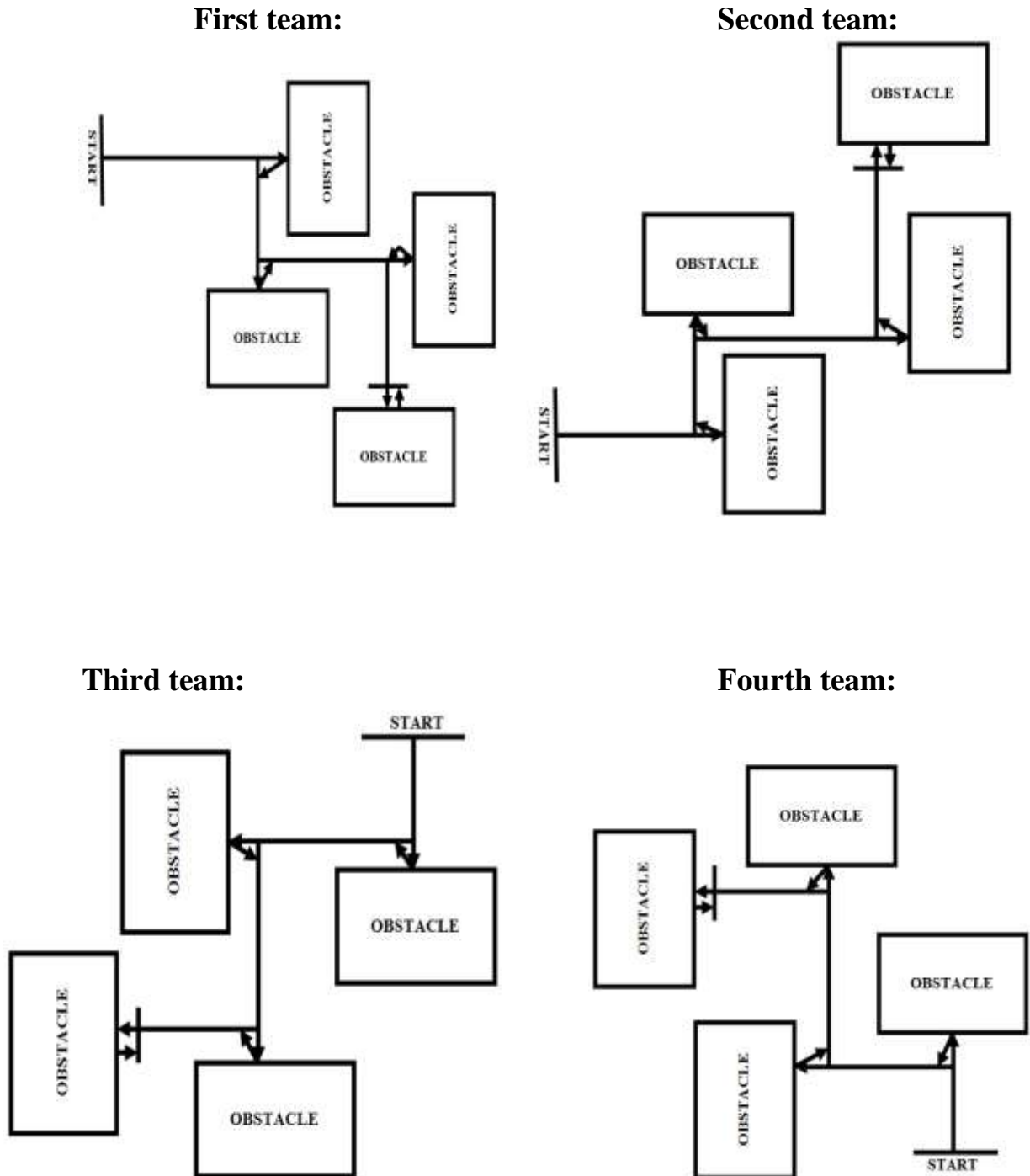


Рисунок 4.23 – Карта з перешкодами для програми з ультразвуковим датчиком

Оскільки хвилі рухаються з відомою швидкістю, то ультразвуковий датчик має обчислити відстань до перешкоди та повідомити роботу, як далеко знаходиться найближчий об'єкт перед ним (рис. 4.24).

```
package sonic;
// Add necessary libraries
public class sonic {
public static void main(String[] args) throws Exception {
//Define new US sensor
while (!Button.ESCAPE.isDown())
{
//Show distance on the screen
//Wait for 100 milliseconds
//Refresh screen
}}}
```

Рисунок 4.24 – Фрагмент псевдокоду для програми визначення відстані до перешкоди з ультразвуковим датчиком

Датчики світла платформи Mindstorms NXT містить два світлодіоди: фотодіод, який отримує світло і використовується для вимірювання його інтенсивності, та світлодіод, який освітлює поверхню, тому перший світлодіод може вимірювати кількість світла, що відбивається від нього. Світлодіоди можна включати та вимикати за допомогою програмного забезпечення. Світлові датчики платформи Mindstorms NXT можна використовувати для слідування АМР по лінії з використанням двох двигунів. Під час руху АМР один двигун активується, коли видно лінію, інший активується, коли лінію не видно. Це працює добре на менших швидкостях, але на високих швидкостях датчик може перетнути іншу сторону лінії, а АМР може повернутися назад у зворотному напрямку або (якщо він втратить лінію) крутитися колами неперервно. Таким чином, датчик світла фіксує один з двох можливих станів: 1 або 0 (бачити лінію чи не бачити лінію). Нижче наведено фрагмент псевдокоду для програми переміщення АМР до тих пір, поки датчик не зафіксує необхідність зупинки роботу після виявлення перешкоди (рис.4.25).

```

package light;
// Add necessary libraries
public class light {
public static void main(String[] args) throws Exception {
//Define new light sensor
while (____)
{ //Run until Escape button not pressed
while (____)
{ // Surface is white
//Stop left motor and go right
while (__)
{ // Surface is black
//Stop right motor and go left
}}}}

```

Рисунок 4.25 – Фрагмент псевдокоду для програми переміщення АМР з використанням датчиків світла

Блок NXT АМР може також показувати кількість перешкод, які уникнув АМР з використанням датчиків світла (згідно з картою середовища, що містить перешкоди).

Датчики звуку (звукові сенсори) платформи Mindstorms NXT призначені для поточної реєстрації звукових сигналів та можуть бути використані в системах локалізації та навігації колісних АМР. Вони реагують на шумові сигнали різного походження та різної амплітуди (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Рівні звукового тиску для різних шумових джерел

Рівні звукового тиску, dB	Джерело
90	Дуже голосні звуки
80	Крики
70	Розмови
60	Офіс / розмови на відстані
50	Тихі розмови в приміщеннях

Звукові датчики платформи Mindstorms NXT можна, наприклад, використовувати для керування рухом АМР за допомогою стандартних

звукових сигналів. Нижче наведено фрагмент псевдокоду для програми переміщення АМР згідно зі звуковими керуючими сигналами (рис.4.26).

```
package sound;
// Add necessary libraries
public class sound {
    public static void main(String[] args) throws Exception {
        //Define new sound sensor
        Thread.sleep(500);
        while (true)
        {
            //Value of sound is less then threshold
            //Show value of sound on the screen
            //Wait for 100 milliseconds
            //Refresh screen
            //Go forward
        }
        //Else stop
    }
}
```

Рисунок 4.26 – Фрагмент псевдокоду для програми переміщення АМР з використанням звукових сигналів

Для платформи Mindstorm NXT використовуються різні методи управління двигунами та датчиками обертання АМР (зокрема, триколісного АМР або триботу) з використанням програмного забезпечення Eclipse LEJOS. При цьому можна вирішувати такі практичні та дослідницькі завдання:

- досліджувати залежність між діаметром колеса АМР та пройденою дистанцією з заданою кількістю обертів двигуна;
- використовувати програмне забезпечення LeJOS для створення програми контролю обертових датчиків двигунів;
- програмувати переміщення АМР вперед, назад, вліво та вправо, використовуючи різні методи (в автономному режимі та за картою);

Датчики обертання (кодери), встановлені для кожного двигуна Tribot, надсилають імпульси до блоку NXT на Tribot, коли вони фіксують навіть незначну зміну обертання колеса. Нижче наведено фрагмент псевдокоду для програми моніторингу обертів двигунів АМР (рис.4.27).

```

package motor;
// Add necessary libraries
public class getAngle {
public static void main(String[] args) throws Exception {
while (____)
{ //Run until Escape button not pressed
LCD.drawString("Motor A", 0, 1);
LCD.drawString("Motor C", 9, 1);
LCD.drawInt(_, 1, 3);
// Return the tachometer count of the motor A
LCD.drawInt(_, 12, 3);
// Return the tachometer count of the motor B
Thread.sleep(200);
//Refresh screen
}}}

```

Рисунок 4.27 – Фрагмент псевдокоду для моніторингу обертів двигунів
AMP

Засоби платформи Mindstorm NXT дають можливість програмувати переміщення AMP, використовуючи різні методи (в автономному режимі та за картою). Нижче наведено фрагмент псевдокоду для програми керування двигунами AMP в процесі його руху (рис.4.28).

```

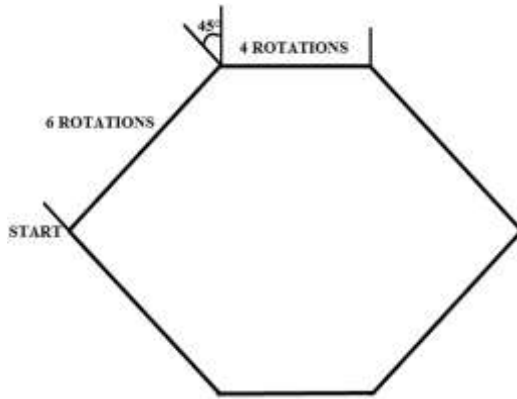
package motor;
// Add necessary libraries
public class getAngle {
public static void main(String[] args) throws Exception {
DifferentialPilot pilot = new DifferentialPilot(____);
//Add //parameters (wheel diameter, track width, left motor, right motor)
pilot.travel(____);
// Add distance to travel forward
pilot.rotate(____);
// Add positive angle to rotate right
pilot.travel(____);
// Add distance to travel forward
pilot.rotate(____);
// Add negative angle to rotate left
pilot.travel(____);
// Add distance to travel forward
pilot.travel(____); // Add distance to travel backward
}}

```

Рисунок 4.28 – Фрагмент псевдокоду для програми керування
двигунами AMP

В програмі керування двигунами можуть графічно задаватися маршрути рухів АМР, приклади яких наведено на рис. 4.29

First team:



Second team:

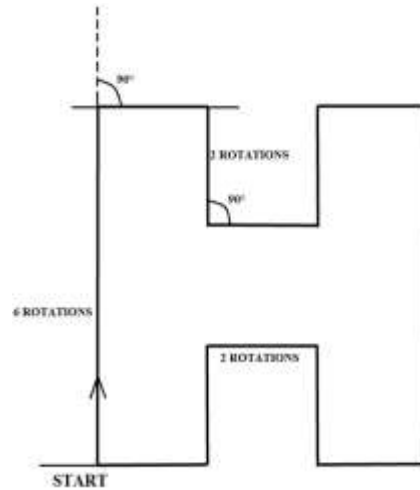


Рисунок 4.29 – Приклади маршрутів руху для програми керування двигунами АМР

Важливим етапом дослідження питань навігації АМР є картографічне відображення середовища його переміщення. Відзначимо, що підлога приміщень є зазвичай плоскою площиною, а всі стіни перпендикулярні до підлоги. Це забезпечує можливість завдання чітких та однозначних цілей для ультразвукових датчиків. Для створення карти середовища використовуються набори ліній, що відображують стіни або деякі інші перешкоди.

Робот може зберігати карту у своїй пам'яті та використовувати геометрію карти для планування серії переходів до нового пункту призначення. Класи карт в API LeJOS призначені в основному для відображення геометрії приміщень та можливих перешкод. Найважливішим форматом файлів для створення карт є формат SVG, що використовує масштабовану векторну графіку та XML-код.

Розглянемо процес створення карти SVG за допомогою редактора SVG-Edit (рис. 4.30).

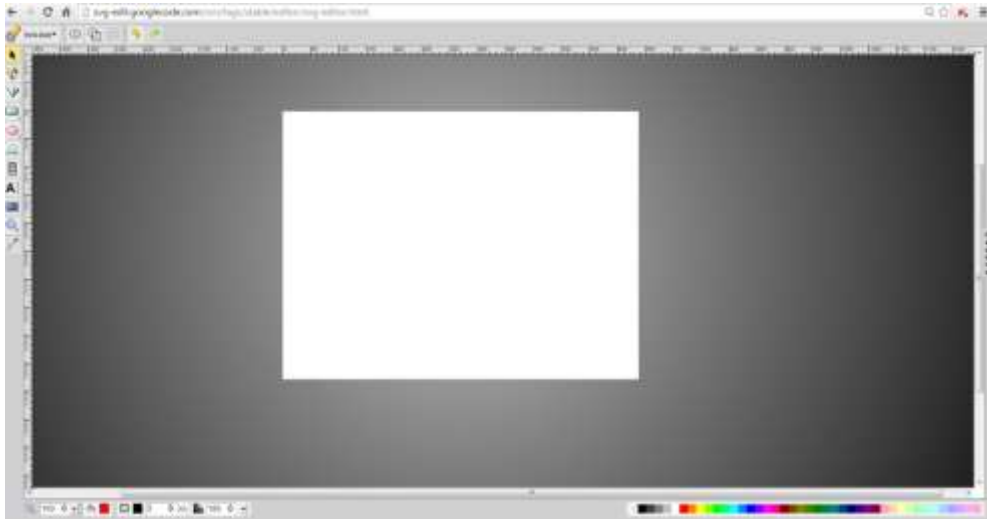


Рисунок 4.30 – Робоча область редагування SVG

Для створення карти мають бути задані її основні властивості (рис. 4.31).

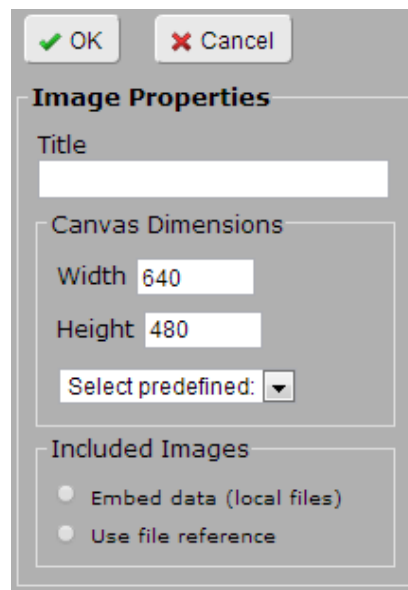


Рисунок 4.31 – Властивості документа для редагування SVG

Зокрема, задаються назва та розміри області карти карти (), а також інструменти для її створення. Крім того, необхідно ввести відповідні значення координат у верхній частині екрана в полях x_1 , y_1 , x_2 , y_2 .

Приклад створення карти наведено на рис. 4.32.

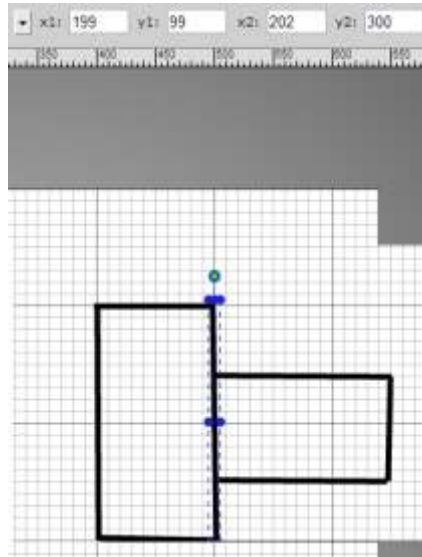


Рисунок 4.32 – Приклад створення карти

Далі необхідно створити додаток, який відображатиме дані карти в режимі реального часу на ПК. Згідно з завданням АМР має відвідати різні пункти маршруту. Відповідна програма створює навігаційні класи (пілот та навігатор). ПК підключається до АМР за допомогою класу `NXTNavigationModel`. Цей клас дозволяє надсилати роботу команди навігації, а також синхронізувати дані з ПК. У наведеному нижче коді показано, як додати пілота та навігатора до `NXTNavigationModel` (рис. 4.33).

```

package motor;
// Add necessary libraries
public class NXTSlave {
public static void main (String [] args) throws Exception {
DifferentialPilot robot = new DifferentialPilot (__);
// Add parameters into the brackets
robot.setAcceleration(__);
// Add parameter into the brackets
Navigator navigator = new Navigator(robot);
Pose start = new Pose(__);
// Add parameters into the brackets
Navigator.getPoseProvider().setPose(start);
NXTNavigationModel model = new NXTNavigationModel();
model.addPilot(robot);
model.addNavigator(navigator);
model.addPoseProvider(navigator.getPoseProvider());
}}

```

Рисунок 4.33 – Фрагмент псевдокоду підключення навігатора до `NXTNavigationModel`

В програмі ПК необхідно визначити початкові координати АМР в межах карти згідно з завданням (рис. 4.34).

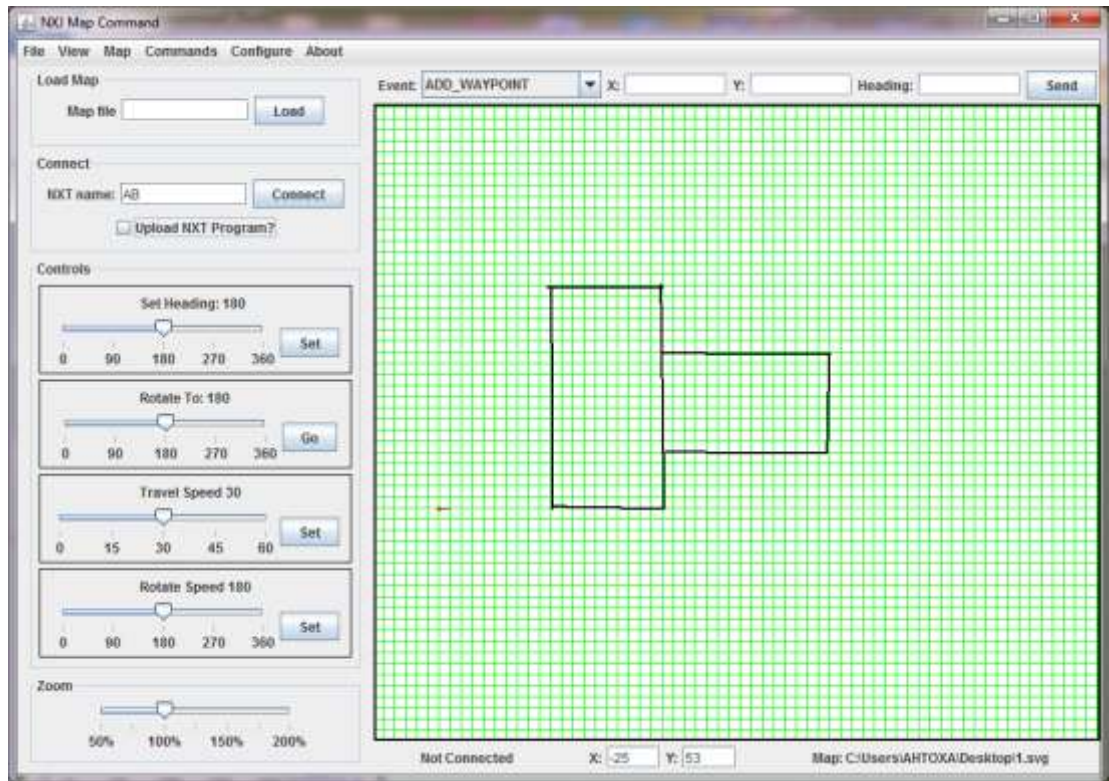
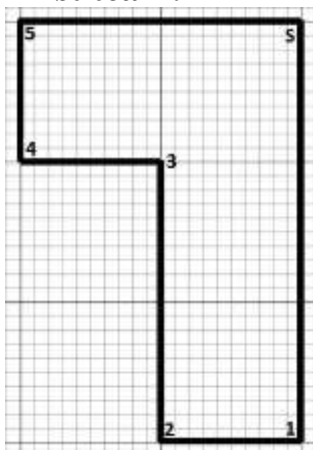


Рисунок 4.34 – Відображення середовища в РС програмі

На рис. 4.35 наведено приклади завдань, згідно з якими АМР має відвідати 5 заданих точок (від початкової точки).

First team:



Second team:

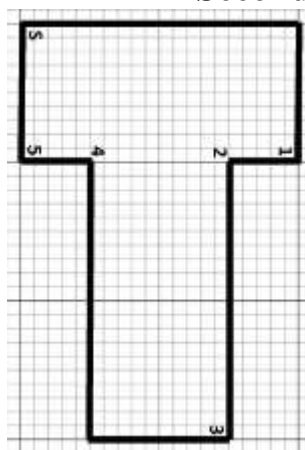


Рисунок 4.35 – Приклади маршрутних завдань

4.4 Висновки по розділу 4

1. Експериментальні дослідження дозволили виявити переваги та недоліки застосування деяких сучасних технологій (зокрема, технологій NFC та iBeacon) в системах локалізації поточного положення рухомих об'єктів (в режимі А). Протестована система складається з передавачів iBeacon і обчислювального пристрою, що отримує і обробляє інформацію від передавачів. В процесі локалізації обчислювальний пристрій оцінює рівень сигналу, що надходить від передавачів iBeacon. Потужність сигналу використовується для визначення найближчого передавача. Передавач з найкращим сигналом вважається найближчим до об'єкта локалізації. Дослідження рівнів сигналів показали, що сигнали від передавачів iBeacon менш чутливі до перешкод, а дальність їх поширення є більшою, ніж, зокрема, при роботі з альтернативною технологією Bluetooth.

2. Отримані результати моделювання дають прийнятні рішення для автономної навігації МР в складних середовищах (режим В). Результати тестування свідчать про можливість автономної навігації колісного мобільного роботу з використанням алгоритмів навчання з підкріпленням та нечітких регуляторів. База правил системи автономної навігації МР покращується в процесі навчання. Застосування наведеного підходу дозволяє враховувати конфігурації перешкод та корегувати стратегію навігації для поліпшення якості системи. Слід зауважити, що отримані результати мають дослідницький характер, а можливість їх практичного використання має бути підтверджена подальшими експериментами з застосуванням більш потужних та функціональних типів АМР.

3. Наведено результати використання результати дисертаційної роботи в навчальному процесі для підготовки та модифікації курсу «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці», які свідчать про можливість залучення студентів до проведення досліджень в області локалізації та

навігації мобільних роботів.

Основні результати цього розділу опубліковано в роботах [116, 117], [123 – 126].

ВИСНОВКИ

В ході виконання дисертаційної роботи були досліджені методи локалізації і навігації рухомих об'єктів (зокрема, мобільних роботів (MR)) в закритих приміщеннях, а також в тих місцях, в яких системи супутникової навігації не є ефективними.

У дисертаційній роботі наведено результати, які відповідно до поставленої мети є вирішенням науково-технічної задачі розробки гібридних методів локалізації та навігації мобільних колісних роботів з застосуванням нечітких та нейромережевих моделей, що можуть бути ефективно використані у середовищах зі змінними властивостями.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі найсуттєвіші результати:

1. Запропоновано метод локалізації та навігації MR в середовищі зі змінними властивостями за умов обмежених можливостей для дистанційного керування, що передбачає можливість перемикання режиму керування роботом в стан автономної навігації з комбінованим застосуванням нечіткої моделі і RL-методів, який дозволяє покращувати набір нечітких правил, використовуючи сигнали підкріплення.

2. Удосконалено метод локалізації мобільних об'єктів з використанням технології iBeacon та даних акселерометра у просторі з відомими картами приміщень, що дозволяє скоротити кількість необхідних для локалізації передавачів.

3. Удосконалено метод локалізації AMR із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байеса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота за умов наявності або відсутності пропріоцептивних даних.

4. Удосконалено метод автономної навігації MR в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі, який

дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації.

5. Розвинено метод визначення маршруту руху мобільних об'єктів з використанням модифікованого алгоритму Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам), що дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами.

6. Розроблені методи було програмно реалізовано та використано для ряду практичних впроваджень. Зокрема, результати тестування свідчать про можливість автономної навігації колісного мобільного роботу з використанням розглянутих в дисертації алгоритмів навчання з підкріпленням та нечітких регуляторів. База правил системи автономної навігації МР покращується в процесі навчання. Застосування наведеного підходу дозволяє враховувати конфігурації перешкод та корегувати стратегію навігації для поліпшення якості системи. Окремі результати досліджень та рекомендації прийнято для використання в ТОВ «Автомейшн Систем» (м. Харків), а також в навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки для підготовки курсу «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці».

7. Дослідження можуть бути продовжені в наступних перспективних напрямках: практичне впровадження запропонованих методів для реальних МР; застосування представлених структур для середовища з динамічними перешкодами.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bobtsov A. A. Navigation and control system for mobile robot / A. A. Bobtsov, D. Dobriborsci, A. A. Kapitonov // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2017. – Vol. 17, Issue 2. – P. 365-367.
2. Черноножкин, В. А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов / В. А. Черноножкин, С. А. Половко // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – №57. – С. 13-22
3. Vantorim B.G., Dal Poz W.R. Performance Evaluation of GPS and GLONASS Systems, Combined and Individually, in Precise Point Positioning / Vantorim B.G., Dal Poz W.R. // Boletim de Ciencias Geodesicas. – 2016. – v. 22, №2, P. 264-281.
4. Дардари Д. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов / Д. Дардари, Э. Фаллетти, М. Луизе // М: Техносфера, 2012. – 528 с.
5. Chew C.C. Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture / C.C. Chew, E.E. Small, K.M. Larson, V.U. Zavorotny // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014, v. 52, №1. – P. 537-543.
6. Dardari D. Ultrawide bandwidth RFID: The next generation / D. Dardari, R. D’Errico, C. Roblin, A. Sibille, M.Z. Win // Proc. IEEE, Special Issue on RFID – A Unique Radio Innovation for the 21st Century. – 2010. – Vol.98 (9) – P. 1570 - 1582.
7. McRoberts M. Beginning Arduino / M. McRoberts // NY: «Apress», 2010. – 433 p.
8. Bellavista P. Location-based services: Back to the future / P. Bellavista, A. Kupper, S. Helal // IEEE Pervasive Comput. 2008. – Vol.7 (2). – P. 85 - 89.
9. Liu H. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems /

H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, J.Liu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews. – 2007. – Vol. 37, no. 6, P. 1067 - 1080.

10. Schmitt S. The Effects of Human Body Shadowing in RF-based Indoor Localization / S. Schmitt, S. Adler, M. Kyas // International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. – 2014. – Vol. 27. – P. 1 - 7.

11. Умінський В.В. Аналіз систем управління переміщенням мобільних роботів / В.В. Умінський // Вісник інженерної академії України. – 2013. – № 3-4. – С. 306 - 308.

12. Юревич Е.И. Интеллектуальные роботы: учебное пособие для вузов / Е.И. Юревич, И.А. Каляев, В.М. Лохин, И.М. Макаров // М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.

13. Fahimi F. Autonomous Robots. Modeling, Path Planning and Control / F. Fahimi –New York : Springer, 2009. – 348 p.

14. Тимофеев А.В. Принципы построения интегрированных систем мульти-агентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами / А.В.Тимофеев, Р.М.Юсупов // International Journal “Information Theories & Applications”. – Vol. 5. № 3, 2011. – С. 237-244.

15. Юревич Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич // – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

16. Цимбал О.М. Адаптивність у прийнятті рішень роботів / О.М. Цимбал, А.І. Бронніков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/4 (52). – С. 4 - 43.

17. Стрембіцький В. Адаптивна система управління мобільним роботом / В. Стрембіцький, М. Стрембіцький, М. Паламар // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“. – Тернопіль: ТНТУ, 2017. – С. 69 - 71.

18. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков

// – Спб.: Наука, 2000. – 325 с.

19. Ющенко А.С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов / А.С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 3. – С. 5-18.

20. Даринцев О.В. Система управления коллективом микророботов // Штучний інтелект. – 2006. – № 4. – С. 391-399.

21. Song, H. Research on Path Planning for the Mobile Intelligent Robot / H. Song, L. Hu // World Congress on Computer Science and Information Engineering. – 2009. – № 1. – P. 121 - 144.

22. Воротников С.А. Интеллектуальная система управления сервисным мобильным роботом / С.А. Воротников, К.В. Ермишин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск «Робототехнические системы». – 2012. – № 6. – С. 285-289.

23. Бабіч К.С. Концепція автономного інтелектуального мобільного робота / К.С. Бабіч, Л.О. Бабіч // Наукові праці ДонНТУ. – 2009. – Вип.. 147, С. 141-146.

24. Мицай Т.С. Синтез структуры интеллектуальной системы управления движениями мобильного робота / Т.С. Мицай // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 2. – С. 227-230.

25. Boskoski P. Neuro-Fuzzy Controllers and Application to Autonomous Robots / P. Boskoski, M. Stankovski // Mechanics, Automatic Control and Robotics. – 2008.– vol. 7, no.1, pp.123-132.

26. Ющенко А.С. Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – Спб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – С. 143-146

27. Gaiduk A. Self-organization in groups of intelligent robots / A. Gaiduk, S. Kapustyayn, I. Shapovalov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – №345, P. 171-181.

28. Beetz M. RPLlearn: Extending an Autonomous Robot Control Language to perform Experience-Based Learning / M. Beetz, A. Kirsch, A. Muller // Proceedings of AAMAS'04, July 19-23. – 2004. – P. 1020- 1027.
29. Бодяньський Є.В. Нейро - фаззі моделі в системах штучного інтелекту / Є. В. Бодяньський, Є. І. Кучеренко // Харків: ХНУРЕ, 2006. – 177 с.
30. Cherroun L. Designing of Goal Seeking and Obstacle Avoidance Behaviors for a Mobile Robot Using Fuzzy Techniques / L. Cherroun, M. Boumehraz // Journal of Automation and Systems Engineering (JASE). – 2012. – vol. 6, no. 4, pp.164-171.
31. Pedrycz W. Fuzzy Systems Engineering. Toward Human-Centric Computing / W. Pedrycz, F. Gomide // John Wiley & Sons, 2007. – 547 p.
32. Киселев Д.В. Обучаемая система нечеткого управления мобильным роботом / Д.В. Киселев, А.С. Ющенко // Штучний інтелект. – 2003. – № 3. – С. 181 - 189.
33. Цимбал О.М. Розробка адаптивного вирішувача інтелектуального робота / О.М. Цимбал // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 6/2 (36). – С. 35-39.
34. Герасимов В.Н. К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 44-51.
35. Nister D. Visual odometry for ground vehicle applications / D. Nister, O. Naroditsky, J. Bergen // Journal of Field Robotics. – 2006. – Vol. 23 (1). – P. 3 - 20.
36. Збруцький О. В. Мобільні роботи: можливості, перспективи, проблеми / О. В. Збруцький, Ю. М. Савенко, Д. С. Мішкін // Механіка гіроскопічних систем : науково-технічний збірник. – 2013. – Вип. 26. – С. 112 - 120.
37. Девятериков Е.А. Визуальный одометр / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спецвыпуск "Робототехнические системы". – 2012. – № 6. – С. 68-82.

38. Hashim S. A new strategy in dynamic time-dependent motion planning for nonholonomic mobile robots / S. Hashim, Tien-Fu Lu // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2009. – P. 1692 - 1697.
39. Коваль В. Спосіб виявлення перешкод мобільного робота з використанням технології злиття показів різнорідних сенсорів // АСУ и приборы автоматики. – Харьков. – 2004. – Вип. 126. – С. 128 – 135.
40. Міхнев С.С. Метод обробки інформації на стратегічному рівні планування в інтелектуальній системі управління мобільним роботом / С.С. Міхнев, С.В. Канаєв // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – № 1. – С.146 - 150.
41. Умінський В.В. Алгоритм оптимального оцінювання координат автономного мобільного робота на основі диференціальних перетворень / В.В. Умінський, О.В. Любжин // Вісник інженерної академії України. 2013. – № 3-4. С. 306 - 308.
42. Banzi M. Getting Started with Arduino/ M. Banzi // S.: «O'Reilly Media, Inc.», 2008. –128 p.
43. Rainer Mautz: Indoor Positioning Technologies [Электронный ресурс] / Mautz Rainer // Zurich: Institute of Geodesy and Photogrammetry, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering – Режим доступа: www/URL: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:5659/eth-5659-01.pdf/> – February 2012 – Загл. с экрана.
44. Каемарунгси К. Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting location fingerprinting / К. Каемарунгси, Р. Krishnamurthy // Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Vol. 2. – 2004. – P. 1012 - 1022.
45. Dhillon S. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks / S. Dhillon // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. – 2010. – P. 1609 -1614.
46. А.С. Дуднік А.С. Методи визначення відстані між об'єктами засобами сенсорних мереж / А.С. Дуднік // Математичне та комп'ютерне

моделирования. –2018. – вып. 176. – С. 40 - 48.

47. Nitaigour P. Sensor Networks and Configuration / P. Nitaigour // Gwangju, Republic of South Korea / Springer Berlin. – New York. – 2007. – 520 p.

48. Pathirana P. Node localization using mobile robots in delay-tolerant sensor networks / P. Pathirana, N. Bulusu, A. Savkin // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2005. – №4(3) – P.285 - 296.

49. Brooks R.R. Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications / R.R. Brooks, S.S. Iyengar // Prentice Hall, Englewood Cliffs. – New York. – 2009. – 120 p.

50. Gustafsson F. Mobile positioning using wireless networks / F. Gustafsson, F. Gunnarsson // IEEE Signal Process. Mag. – 2005. – № 22 (4) – P. 41 - 53.

51. Исследование зависимостей RSS различных WIFI устройств в условиях прямой видимости // Современные проблемы науки и образования - Электронный научный журнал – 2005–2017[Электронный ресурс]. URL: <https://www.scienceeducation.ru/ru/article/view?id=15038> (дата обращения: 10.01.2017).

52. Sun G. Signal processing techniques in network-aided positioning / G. Sun, J. Chen, W. Guo, K.J. Ray Liu // IEEE Signal Process. Mag. 2005. – № 22 (4). – P. 12 - 23.

53. Dardari D. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments / D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, M. Win // Proc. IEEE, Special Issue on UWB Technology & Emerging Applications. – 2009. – №97 (2) – P. 404 - 426.

54. Hightower J. Location systems for ubiquitous computing / J. Hightower, G. Borriello // Computer. – 2001 – Vol. 34 (8) – P. 57 – 66.

55. Feldmann S. An Indoor Bluetooth-based Positioning System: Concept, Implementation and Experimental Evaluation / S. Feldmann, K. Kyamakya, A. Zapater, Z. Lue // International Conference on Wireless Networks. – 2003. – P.

109 - 113.

56. Bahl P. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system / P. Bahl, V.N. Padmanabhan // In: Proceedings of the IEEE Infocom (Tel Aviv, Israel). – 2000. – P. 797 - 806.

57. Sichitiu M. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon / M. Sichitiu, V.Ramadurai // In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2004), FL, October 2010. – P. 174 - 183.

58. Vossiek M. Wireless local positioning / M. Vossiek, L. Wiebking, P. Gulden, J. Wiegardt, C. Hoffmann, P. Heide // IEEE Microwave Magazine. – 2003. – Vol. 4, Issue 4. – P. 77 - 86.

59. Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification / K. Finkenzeller // John Wiley & Sons. – 2004. – 230 p.

60. Idrees A. An efficient indoor navigation technique to find optimal route for blinds using QR codes / Affan Idrees, Zahrid Iqbal, Maria Ishfaq // Proceedings of Industrial Electronics and Applications, 15-17 June 2015, Auckland, New Zealand. – Auckland, 2015. – P. 690 - 695.

61. Иващенко Н.Г. Технология Bluetooth / Н.Г. Иващенко // UA-referat. – Режим доступа: <http://ua-referat.com/Bluetooth>.

62. Cook W.J. In Pursuit of the Traveling Salesman: Mathematics at the Limits of Computation/ W.J. Cook // Princeton University Press, 2012. – 254 p.

63. Кузнецов Н.А. Алгоритм Дейкстры с улучшенной робастностью для управления маршрутизацией в IP-сетях / Н.А. Кузнецов, В.Н. Фетисов // Автоматика и телемеханика. 2008. – № 2. – С. 80 - 85.

64. Клейнберг Дж. Алгоритмы: разработка и применение. Классика Computers Science / Дж. Клейнберг, Е. Тардос / СПб.: Питер, 2016. – 800 с.

65. Девятериков Е.А. Алгоритм описания траектории мобильного робота по данным визуального одометра для автоматического возвращения к оператору // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 12. –

C. 705-715.

66. Ющенко А.С. Маршрутизация движения мобильного робота в условиях неопределенности / А.С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2004. – № 1. С. 31 - 38.

67. Зенкевич С.Л. Управление движением мобильного робота в неподвижную точку / С.Л. Зенкевич, П.В. Космачев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 3. – С. 55 - 60.

68. Siegwart R. Introduction to Autonomous Mobile Robots / R. Siegwart, I R. Nourbakhsh // Massachusetts Institute of Technology, 2004. – 321 p.

69. Leonard Naomi Ehrich. Integrating human and robot decision-making dynamics [Электронный ресурс] / Naomi Ehrich Leonard // Mechanical and Aerospace Engineering. Princeton University. – Режим доступа: http://people.bu.edu/johnb/Ming_Cao_MURIAug08.pdf.

70. Ono Y. A mobile robot for corridor navigation: A Multi-Agent Approach [Текст] / Y. Ono, H. Uchiyama, W. Potter // Proceedings of ACMSE '04. – 2004, Huntsville, Alabama, USA. – P. 379-384.

71. Мартыненко Ю.Г. Управление движением колёсных роботов / Ю.Г. Мартыненко // Фундаментальная и прикладная математика. – 2005. – Т. 11, № 8. – С. 29-80.

72. Siler William. Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning / William Siler, James J. Buckley // John Wiley & Sons. – 2005. – 422 p.

73. Бабич Л.О. Использование методов нечеткой логики в процессе достижения противоречивых целей интеллектуальным мобильным роботом / Л.О. Бабич. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С. 216 - 221.

74. Parasuraman Raja. Adaptive Automation for Human-Robot Teaming in Future Command and Control Systems [Текст] / Raja Parasuraman, Michael Barnes, Keryl Cosenzo // The International C2 Journal. – 2007. – Vol 1, No 2. – P. 43 - 68.

75. Ляшин А.М. Локализация и управление траекторным движением

мобильного робота с танковой компоновкой шасси, оснащенного лазерным даль номером и средствами технического зрения / А.М. Ляшин, И.А. Васильев // Штучний інтелект. – 2008. – № 4. – С. 282 - 290.

76. Сапунов С.В. Определение положения мобильного робота в топологической среде / С.В. Сапунов // Штучний інтелект. – 2008. – № 4. – С. 558 – 565.

77. Даринцев О.В. Использование нейронной карты для планирования траектории мобильного робота / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Штучний інтелект. – 2009. – № 3. – С. 300 - 307.

78. Цымбал А.М. Планирование решений в системе управления роботом / А.М. Цымбал // Вестник СевГТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь. – 2009. – Вып. 95. – С. 124-128.

79. Умінський В.В. Алгоритм оптимального оцінювання координат автономного мобільного робота на основі диференціальних перетворень / В.В. Умінський, О.В. Любжин // Вісник інженерної академії України. 2013. – № 3-4. С. 306 - 308.

80. Адамів О. Метод навігації мобільного робота в неструктурованому середовищі / О. Адамів // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. – Т.124, №3 – С.- 126-131.

81. Макарычев В.П. Метод переменных стратегий построения траекторий движения роботов в среде с препятствиями [Текст] / В.П. Макарычев // Штучний інтелект. – 2008. – № 3. – С. 451 - 461.

82. Мелихов А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Бернштейн, С.Я. Коровин // – М.: Наука: Физматлит, 1990. – 271 с.

83. Sutton R.S. Reinforcement Learning with Replacing Eligibility Traces / R.S. Sutton // Machine Learning. – 1996.– vol. 22. – P. 123 - 158.

84. Khriji L. Mobile Robot Navigation Based on Q-learning Technique / L. Khriji, Al Yahmedi // International journal of advanced Robotic System. – 2012. – vol. 8, no. 1 – P. 45-51.

85. Cang Y. A Fuzzy Controller with Supervised Learning Assisted Reinforcement Learning Algorithm for Obstacle Avoidance / Y. Cang, N. H. C. Yung, D. Wang // IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics,. – 2003. – vol. 33, no.1, P.1-11.

86. Filliat D. Robotique Mobile / D. Filliat // Paris: École Nationale Supérieure de Techniques Avancées ParisTech. –2011 – 175 p.

87. Удовенко С.Г. Гибридные методы машинного обучения в системах управления динамическими объектами / С.Г. Удовенко, А.А. Гришко, Л.Э. Чалая. // Біоніка інтелекту. –2012. –№1(78) – С.78-84.

88. Wang M. Fuzzy Logic based Real-time Robot Navigation in Unknown Environment with Dead Ends / M. Wang, N. K. Liu // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – vol. 56, P.625-643.

89. Zhou Y. A Hybrid Approach for Automatic Generation of Fuzzy Inference Systems without Supervised Learning / Y. Zhou, M. Joo, Y. Wen / Proceedings of the 2007 American Control Conference, USA. – P. 3371-3376.

90. Cherroun L. Fuzzy Logic and Reinforcement Learning based Approaches for Mobile Robot Navigation in Unknown Environment / L. Cherroun and M. Boumehraz / The Mediterranean Journal of Measurement and Control. – 2013. – vol. 9, no. 3. – P. 109 - 117.

91. Ozdenizci B. NFC Internal: An Indoor Navigation System / Busra Ozdenizci, Vedat Coskun, Kerem Ok // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – P. 7571 - 7595.

92. Ezzaldeen E. NFC/INS Integrated Navigation System: the promising combination for pedestrians' indoor navigation / E. Ezzaldeen, M. Bourimi, N. Joram, B. Al-Qudsi, F. Ellinger // Proc. of 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering. –2014. – Bucharest, Romania. –Available online at: <https://www.researchgate.net/publication/270900985>.

93. Рустинов В.А. Система локализации и планирования пути мобильных агентов в зданиях / В.А. Рустинов, А.Р. Сорокин, И.А. Тавадзе, Б.В. Шеховцов // Сборник научных статей «Информатика, математическое

моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2014. – С.3 - 7.

94. Udovenko S. Localization and navigation of mobile robots in the environment with variable properties / S. Udovenko, A. Sorokin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2/9(98). – 2019. – P. 29-36.

95. Рустин В.А. Комбинированный метод локализации подвижных объектов / В.А. Рустин, А.Р. Сорокин // *Радиоэлектроника и информатика.* 2014. – № 4. С. 83 - 88.

96. Рустин В.А. Методы локализации мобильных объектов внутри помещений с использованием IOS платформы / В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, И.А. Тавадзе, Б.В. Шеховцов // *Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2014. – С.106 - 110.*

97. Круш І.В. Застосування фільтру Калмана для вирішення проблеми локалізації робота. / І.В. Круш, В.Г. Михалько // *International Scientific Journal.* – 2016. – №4. – С. 22-25.

98. Negenborn R. Robot Localization and Kalman Filters: On finding your position in a noisy world / R. Negenborn // – Thesis, Utrecht university. – 2003. – 156 p.

99. Забегаев А.Н. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системой навигации / А.Н. Забегаев, В.Е. Павловский // *Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша.* – 2010. – № 82. – 24 с.

100. Умінський В.В. Диференційна модель фільтра Калмана для локалізації автономного мобільного робота / В.В.Умінський // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* – 2014. – №1 (46). – С. 33 - 36.

101. Удовенко С.Г. Гибридный метод фильтрации в задачах локализации мобильных роботов / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // *Системы обработки информации.* – 2015. – Вып. 10(135). – С.248 - 254.

102. Шеховцов Б.В. Оптимальное управление движением робота-

транспортера / Б.В. Шеховцов, В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2012. – С.135 - 141.

103. Fox D. Bayesian filtering for local estimation / D. Fox, J. Hightower, L. Liao, D. Schulz, G. Borriello / IEEE Pervasive Comput. – 2003. – Vol. 2 (3). – P. 109 - 117.

104. Fontanella D. Bayesian localization in sensor networks: Distributed algorithm and fundamental limits / D. Fontanella, M. Nicoli, L. Vandendorpe // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2010. – P. 1 - 5.

105. Wang Chieh-Chih. Simultaneous localization, mapping and moving object tracking / Chieh-Chih Wang, Charles Thorpe, Sebastian Thrun, Martial Hebert, Hugh Durrant-Whyte // The International Journal of Robotics Research. – 2007.–. Vol. 26(9). – P. 889 - 916.

106. Harabor D. Jump Point Search [Электронный ресурс] / D. Harabor // The Australian National University. – 2011. – Режим доступа: <https://harablog.wordpress.com/2011/09/07/jump-point-search/>.

107. Шеховцов Б.В. Оптимальное планирование пути для мобильных объектов / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2013. – С.196 - 199.

108. Шеховцов Б.В. Обоснование выбора алгоритма поиска кратчайшего пути в задачах навигации мобильных объектов / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XVII Междунар. молодежного форума,– Харьков : ХНУРЭ, 2013. – Т. 5 . – С. 238-239.

109. Шеховцов Б.В. Оптимальное управление движением робота / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : матеріали 2-ї міжнар.

наук.-техн. конф., 2011. – Київ : ДП «ЦНДІ НіУ»; Харків: ДП «ХНДІ ТМ» ; Київ : КДАВТ, 2011. – С. 52-53.

110. R.C. Arkin R.C. Motor Schema-based Mobile Robot Navigation / R.C. Arkin // International Journal of Robotic Research. – 1989. – vol. 8, P. 92-112.

111. Удовенко С.Г. Стратегии нечеткого управления колесным мобильным роботом / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 5(142). – С.42-49.

112. Удовенко С.Г. Управление мобильным роботом с RL-обучением при наличии перемещаемых препятствий / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 5 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку-Кировоград- Харьков. – 2015. – С. 25-26.

113. Удовенко С.Г. Нейросетевая аппроксимация Q -функций в трейдинговых системах / С.Г. Удовенко, А.А. Гришко // Системні технології. – №3 (74). – 2011. – С. 118 - 125.

114. Удовенко С.Г. Нейро-нечеткое ANFIS-управление мобильным роботом / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 6 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку- Кировоград- Харьков. – 2016. – С. 29.

115. Удовенко С.Г. Нечеткое управление автономным мобильным роботом с подкрепляемым обучением / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 8(145). – С.56-62.

116. Rustinov V.A.. Selection of technology for building an indoor localization and tracking system / V.A. Rustinov., A.R. Sorokin // 13th International conference «The expierence of designing and application of CAD systems in microelectronics». –Lviv-Poljana. –2015. – P. 178-181.

117. Удовенко С.Г. Оценивание навигационных параметров в системе управления роботом / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции «Информационные

системы и технологии» (ИСТ-2015). - Харьков. –2015. –С. 157-158.

118. Документация LEGO Mindstorms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mindstorms.ru>. – Загл. с экрана.

119. Bagnall B. Intelligence Unleashed: Creating LEGO NXT Robots with Java / В. Bagnall // NY: "Variant Press". – 2011. – 524 p.

120. Квасніков В.П. Інформаційна технологія побудови траєкторії руху інтелектуального мобільного робота в середовищі з перешкодами / В.П. Квасніков, Т.С. Мицай // Збірник науко-вих праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – 2011. – Вип. № 30 – С. 70 - 74.

121. Пепа Ю.В. Планування руху роботоризованого мобільного засобу на місцевості за наявності перешкод / Ю.В. Пепа // VII Міжнародна науково-практична конференція "Військова освіта та наука: сьогодення та майбутнє" (Київ, 24 – 25 листопада 2011 року): тези доп. – Київ, 2011. – С. 65.

122. Мицай Т.С. Алгоритм построения оптимальной траектории движения мобильного робота / Т.С. Мицай // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси: четверта міжнародна науково-практична конференція, 23-25 травня 2011 р.: тези доповіді – Київ, 2011. – С. 36 - 37.

123. Удовенко С.Г. Метод навигации мобильных объектов в среде с изменяемыми свойствами / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин, А.О. Смеркус, С.Г. Удовенко // Матеріали восьмої Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління" – Полтава-Баку-Харків-Жиліна, 2018. – С. 33.

124. Удовенко С.Г. Комбінований метод локалізації та навігації мобільних роботів у середовищі зі змінними властивостями / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Збірник наукових праць за матеріалами II міжнародної науково-практичної конференції «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці» – Харків, ХНАДУ, 2018. – С. 154-156.

125. Udovenko S.G. Modeling of mobile robots adaptative control / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Матеріали 6-ї Міжн. науково-техн. конф. «Проблеми інформатизації». – Черкаси-Баку-Бельско-Бяла-Харків (14-16.11.18). –2018. – С. 51-52.

126. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці» для студентів центру НСІМ, які навчаються англійською мовою за напрямом 6.050102 «Комп'ютерна інженерія» / Упоряд.: В.О. Рустінов, А.Р. Сорокін – Харків: ХНУРЕ, 2013. – 47 с.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Рустинів В.А. Комбинированный метод локализации подвижных объектов [Текст] / В.А. Рустинів, А.Р. Сорокин // Радиоэлектроника и информатика. 2014. – № 4. С. 83-88. (Журнал реферується або індексується міжнародними базами Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJ, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIU Hannover, I2OR, Національною бібліотекою України ім. В. І. Вернадського).

2. Удовенко С.Г. Гибридный метод фильтрации в задачах локализации мобильных роботов [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 10(135). – С.248-254. (Видання індексується міжнародними наукометричними базами Scientific Indexed Service, Index Copernicus, Universal Impact Factor, Open Academic Journals Index, Google Scholar).

3. Удовенко С.Г. Стратегии нечеткого управления колесным мобильным роботом [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 5(142). – С.42-49. (Видання індексується міжнародними наукометричними базами Scientific Indexed Service, Index Copernicus, Universal Impact Factor, Open Academic Journals Index, Google Scholar).

4. Удовенко С.Г. Нечеткое управление автономным мобильным роботом с подкрепляемым обучением [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 8(145). – С.56-62. (Видання індексується міжнародними наукометричними базами Scientific Indexed Service, Index Copernicus, Universal Impact Factor, Open Academic Journals Index, Google Scholar).

5. Udovenko S. Localization and navigation of mobile robots in the environment with variable properties [Text] / S. Udovenko, A. Sorokin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/9(98). – 2019. – P. 29-36. (Журнал індексується міжнародними наукометричними базами Scopus, Index Copernicus, Cross Ref, Electronic Journals Library).

6. Шеховцов Б.В. Оптимальное управление движением робота-транспортера [Текст] / Б.В. Шеховцов, В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2012. – С.135 - 141.

7. Шеховцов Б.В. Оптимальное планирование пути для мобильных объектов [Текст] / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2013. – С.196 - 199.

8. Рустин В.А. Система локализации и планирования пути мобильных агентов в зданиях [Текст] / В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, И.А. Тавадзе, Б.В. Шеховцов // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2014. – С.3 - 7.

9. Рустин В.А. Методы локализации мобильных объектов внутри помещений с использованием IOS платформы [Текст] / В.А. Рустин, А.Р. Сорокин, И.А. Тавадзе, Б.В. Шеховцов // Сборник научных статей «Информатика, математическое моделирование, экономика» – Т.2. – Смоленск, Смоленский филиал РУК. – 2014. – С.106 - 110.

Результати, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Шеховцов Б.В. Оптимальное управление движением робота [Текст] / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : матеріали 2-ї міжн. наук.-техн. конф., 2011. – Київ : ДП «ЦНДІ НіУ»; Харків: ДП «ХНДІ ТМ» ; Київ : КДАВТ, 2011. – С. 52-53.

11. Шеховцов Б.В. Обоснование выбора алгоритма поиска кратчайшего пути в задачах навигации мобильных объектов [Текст] / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Материалы XVII Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков, Украина, 2013. – Т. 5 . – С. 238-239.

12. Удовенко С.Г. Управление мобильным роботом с RL-обучением при наличии перемещаемых препятствий [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 5 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». – Полтава-Баку-Кировоград- Харьков. – 2015. – С. 25-26.

13. Rustinov V.A.. Selection of technology for building an indoor localization and tracking system [Text] / V.A. Rustinov., A.R. Sorokin // Proc. of 13th International Conference Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2015). – Lviv, Ukraine. – 2015. – P. 178-181. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).

14. Удовенко С.Г. Оценивание навигационных параметров в системе управления роботом [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2015). - Харьков. –2015. –С. 157-158

15. Удовенко С.Г. Нейро-нечеткое ANFIS-управление мобильным роботом [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 6 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку-Кировоград- Харьков. – 2016. – С. 29

16. Удовенко С.Г. Метод навигации мобильных объектов в среде с изменяемыми свойствами [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин, А.О. Смеркус, С.Г. Удовенко // Матеріали 8 Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління", (Харків, 26-27 квітня 2018 р.) - Полтава-Баку-Харків-Жиліна, 2018. – С. 33

17. Удовенко С.Г. Комбінований метод локалізації та навігації мобільних роботів у середовищі зі змінними властивостями [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Збірник наукових праць за матеріалами II міжнародної науково-практичної конференції «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці» – Харків, ХНАДУ, 2018. – С. 154-156

18. Udovenko S.G. Modeling of mobile robots adaptative control [Text] / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Матеріали 6-ї Міжн. науково-техн. конф. «Проблеми інформатизації». – Черкаси-Баку-Бельско-Бяла-Харків (14-16.11.18). –2018. – С. 51-52

ДОДАТОК Б
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1 Шеховцов Б.В. Оптимальное управление движением робота [Текст] / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : матеріали 2-ї міжн. наук.-техн. конф., 2011. – Київ : ДП «ЦНДІ НіУ»; Харків: ДП «ХНДІ ТМ» ; Київ : КДАВТ, 2011. – С. 52-53.

2. Шеховцов Б.В. Обоснование выбора алгоритма поиска кратчайшего пути в задачах навигации мобильных объектов [Текст] / Б.В. Шеховцов, А.Р. Сорокин, С.А. Резван // Материалы XVII Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков, Украина, 2013. – Т. 5 . – С. 238-239.

3. Удовенко С.Г. Управление мобильным роботом с RL-обучением при наличии перемещаемых препятствий [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Материали 5 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку-Белгород-Кировоград- Харьков. – 2015. – С. 25-26.

4. Rustinov V.A.. Selection of technology for building an indoor localization and tracking system [Text] / V.A. Rustinov., A.R. Sorokin // Proc. of 13th International Conference Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2015). – Lviv, Ukraine. – 2015. – P. 178-181. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).

5. Удовенко С.Г. Оценивание навигационных параметров в системе управления роботом [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Материали 4-й Міжнародної науко-технічної конференції «Інформаційні системи і технології» (ІСТ-2015). - Харьков. –2015. –С. 157-158

6. Удовенко С.Г. Нейро-нечеткое ANFIS-управление мобильным роботом [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Матеріали 6 Міжнародної научн.-техн.конф. «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку-Кировоград- Харьков. – 2016. – С. 29

7. Удовенко С.Г. Метод навигации мобильных объектов в среде с изменяемыми свойствами [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин, А.О. Смеркус, С.Г. Удовенко // Матеріали 8 Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління", (Харків, 26-27 квітня 2018 р.) - Полтава-Баку-Харків-Жиліна, 2018. – С. 33

8. Удовенко С.Г. Комбінований метод локалізації та навігації мобільних роботів у середовищі зі змінними властивостями [Текст] / С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин // Збірник наукових праць за матеріалами II міжнародної науково-практичної конференції «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці» – Харків, ХНАДУ, 2018. – С. 154-156

9. Udovenko S.G. Modeling of mobile robots adaptative control [Text] / S.G. Udovenko, A.R. Sorokin // Матеріали 6-ї Міжн. науково-техн. конф. «Проблеми інформатизації». – Черкаси-Баку-Бельско-Бяла-Харків (14-16.11.18). –2018. – С. 51-52

ДОДАТОК В

ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Автомейшн Систем»
І.С. Червінський
12» січня 2017 р.



АКТ про використання результатів дисертаційної роботи Сорокіна Антона Романовича

Комісія у складі: директор ТОВ «Автомейшн Систем» Червінський І.С.; професор кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки, д.т.н., доц. Міхаль О.П. склали акт про можливість практичного використання результатів дисертаційної роботи Сорокіна А.Р. «Локалізація та навігація мобільних колісних роботів з використанням методів обчислювального інтелекту».

Аналіз результатів, отриманих здобувачем, свідчить про те, що запропоновані в дисертації методи та моделі локалізації та навігації мобільних об'єктів (та відповідні програмні засоби) є, зокрема, ефективним засобом для удосконалення систем навігації дистанційно керованих або цілком автономних мобільних технічних засобів.

Тестування запропонованих методів на базі модуля «Lego» підтверджує її працездатність та перспективи практичного використання для прийняття рішень в області позиціонування і навігації рухомих об'єктів, зокрема, для локалізації і подальшої навігації рухомих об'єктів в закритих приміщеннях, а також в тих місцях, в яких системи супутникової навігації з тих чи інших причин не є ефективними. Протестовано можливість автономної навігації колісного мобільного робота з використанням навчання з підкріпленням та нечітких регуляторів. База правил системи автономної навігації робота покращується в процесі навчання з використанням сигналу підкріплення. Застосування наведеного підходу дозволяє враховувати конфігурації перешкод та корегувати стратегію навігації для поліпшення якості системи.

Тестування було проведено 18 червня 2016 р. згідно з узгодженою програмою.

Члени комісії:



І.С. Червінський

О.П. Міхаль

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-методичної
роботи Харківського
національного
університету радіоелектроніки


 І.В. Рубан
 « 04 » _____ 2018р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
 Сорокіна Антона Романовича

Комісія у складі начальника навчального відділу доцента Міхнвої А.В., завідувача кафедри електронних обчислювальних машин професора Міхаля О.П., професора кафедри електронних обчислювальних машин Горбачова М.М., підтверджує, що результати дисертаційної роботи Сорокіна Антона Романовича «Локалізація та навігація мобільних колісних роботів з використанням методів обчислювального інтелекту» впроваджені у навчальний процес на кафедрі електронних обчислювальних машин в курсі «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці», а також у курсовому та дипломному проектуванні.

Начальник НВ



А.В. Міхнова

Завідувач кафедри ЕОМ



О. П. Міхаль

Професор кафедри ЕОМ



В.О. Горбачов