

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**СОРОКІН АНТОН РОМАНОВИЧ**

УДК 519.6:004.89

**ЛОКАЛІЗАЦІЯ ТА НАВІГАЦІЯ МОБІЛЬНИХ КОЛІСНИХ РОБОТІВ З  
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2021



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Завдання локалізації та навігації є фундаментальними для ефективної експлуатації таких рухомих об'єктів, як мобільні роботи (МР) 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 МР всередині будівель стала актуальною завдяки розвитку навігації рухомих об'єктів у виробництві, оборонній промисловості, моніторингу надзвичайних 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 МР) 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., Жихарев Д.Н., Бурдаков С.Ф., Гайдук А.Р., Зенкевич С.Л., Капустян С.Г., Каргін А.О., Нейдорф Р.А., Юревич Є.І., Ющенко А.С., 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.

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 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 локалізації і 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 нейромережових 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 Байєса, 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 Байєса – 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 нейромережового 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 на відміну від існуючих методів 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.

*б) удосконалено:*

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

– метод локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байєса, який на відміну від існуючих методів 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 методу Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам), що на відміну від існуючих методів дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичне значення 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. Зокрема, тестування запропонованих методів та відповідних програмних засобів підтверджує її працездатність та перспективи практичного використання для прийняття рішень в області позиціонування і навігації рухомих об'єктів в закритих приміщеннях, а також в тих місцях, де системи дистанційної навігації з тих чи інших причин не є ефективними. 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. (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: [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 Байєса; [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 перемикавання режиму керування роботом в стан автономної навігації; [6] – удосконалення методу керування роботом-транспорттером; [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-транспорттером; [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 методу 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- Кіровоград- 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 (1 конференція у Scopus).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено відомості про зв'язки вибраного напрямку дослідження із планами організації, де виконана робота. Дано стислу анотацію отриманих в дисертації результатів, зазначено їх практичну цінність, обґрунтованість і достовірність. Наведено дані про використання проведених досліджень у практичних додатках.

**Перший розділ** присвячено аналізу стану застосування сучасних методів та засобів в інтелектуальних системах локалізації та навігації мобільних об'єктів за різних умов їх функціонування. Відзначено, що системи керування такими (дистанційні чи автономні) мають бути обладнані засобами визначення місцезнаходження та алгоритмами визначення маршруту, яким потрібно слідувати, щоб досягти поставленої мети. Розглянуто ряд технологій, які використовуються для локалізації рухомих об'єктів всередині будівель, серед яких найбільш привабливим є застосування Wi-Fi - засобів та бездротових локальних мереж, оскільки вони не вимагають додаткових витрат на створення інфраструктури. Актуальність даної проблеми підтверджується створенням у 2012 році міжнародного альянсу InLocation Alliance, метою якого є розробка методів, технологій та програм для позиціонування рухомих об'єктів всередині приміщень. Задачі локалізації керованих рухомих об'єктів щільно пов'язані з задачами їх навігації. Безумовною, наприклад, є необхідність чіткого їх позиціонування в просторі, адже це є передумовою визначення їх маршрутів для досягнення поставленої своєї мети. Для успішної навігації в просторі система навігації мобільних об'єктів (зокрема колісних МР) має визначати 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.

В структурованих середовищах, коли відома глобальна карта середовища, для переміщення АМР до цілі використовують методи глобальної навігації. Проте дані методи вимагають значних обчислювальних ресурсів, для побудови траєкторії руху та для локалізації АМР, і вони, крім того не можуть застосовуватися для складних (неструктурованих) середовищ. Тому слід застосовувати більш прості, з обчислювальної точки зору, методи локальної навігації АМР, які використовують для навігації локальну карту середовища, що відображає тільки об'єкти в межах видимості сенсорів. При цьому підвищена стійкість керування АМР в умовах невизначеності може бути забезпечена засобами штучного інтелекту з використанням адаптивних властивостей штучних нейронних мереж (ШНМ), що дозволяє проводити керування АМР 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 і нових інтелектуальних засобів адаптивного керування АМР, які забезпечують вихід до цілі та підвищення стійкості маневрування в умовах невизначеності.

До таких засобів, насамперед, слід віднести використання нечіткої логіки та методів машинного навчання з підкріпленням (RL-навчання). Теорія нечіткої логіки характеризується здатністю моделювати та обробляти непевну та неточну інформацію в процесі розробки нечітких регуляторів (НР) руху АМР. Сутність RL-навчання, що використовується для завдань навігації АМР, полягає в можливості використання сигналів підкріплення для підвищення якості навігаційних рішень в системах навігації АМР з застосуванням НР. В першому розділі проаналізовано необхідність комбінованого 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.

За результатами такого аналізу сформульовано завдання наукового дослідження, здійсненого в дисертації.

**Другий розділ** присвячено розробці методів локалізації МР в різних режимах їх експлуатації з застосуванням сучасних технологій.

Для перевірки працездатності методу дистанційної локалізації мобільних об'єктів (МО) з використанням технології NFC (у просторі з відомими картами приміщень) було розроблено додаток для пристроїв на базі ОС Android. 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 використовується комп'ютерний пристрій з підтримкою технології NFC.

Для визначення місця положення, відбувається зчитування унікального номера NFC-мітки, іменованого як UID (унікальний ідентифікаційний номер). Цей унікальний номер зберігається у внутрішній базі даних програми, в якій за унікальним номером можна отримати інформацію про поточне місцезнаходження. Після всіх необхідних налаштувань та вибору точок маршруту МО на пристрої відобразиться екран, на якому буде представлена та ж карта маршруту та побудований шлях, що проходить через обрані точки. Приклад побудови маршруту наведено на рис. 1.

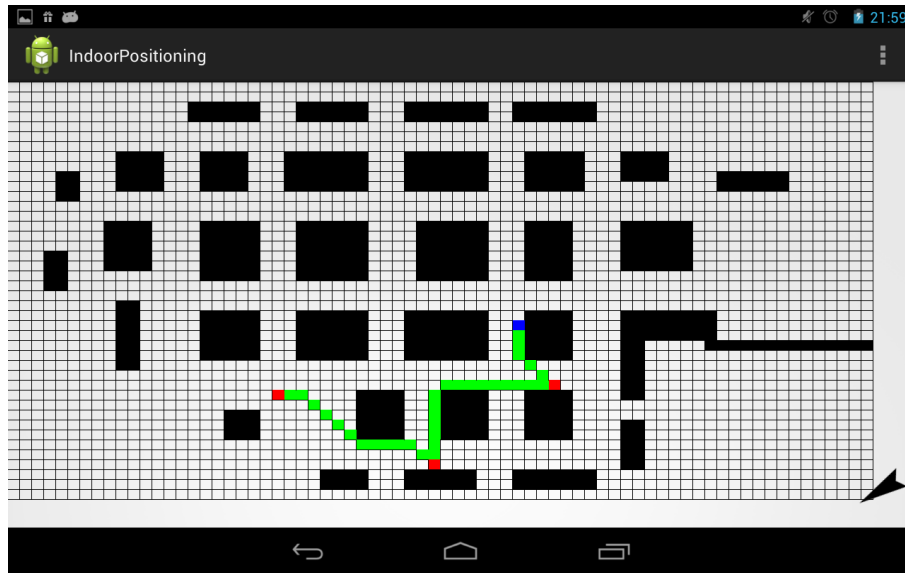


Рисунок 1 – Приклад побудови маршруту МО з використанням технології NFC

Також було досліджено метод дистанційної локалізації МО з використанням технології iBeacon. Запропонована система локалізації рухомих об'єктів за допомогою даної технології заснована на принципі перевірки MAC-адреси найближчого передавача з базою адресних даних з подальшим відображенням поточного місця розташування МО на екрані пристрою. Визначення найближчого передавача реалізується за допомогою параметра RSS (потужність сигналу).

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

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

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

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

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

Останнім часом отримали розвиток методи локалізації та навігації АМР з використанням фільтрації Калмана. Розглянемо завдання локалізації, метою якого є оцінювання поточного положення АМР за пропріоцептивних даними (п/п-даними) або за допомогою оновлюваних перцептивних даних (п-даних), що отримуються з використанням датчиків. У разі п/п-даних завдання розглядає переміщення робота і має метою 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 роботу 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 вона заснована на використанні початкової оцінки стану, яка часто визначається зовнішніми джерелами.

В другому розділі запропоновано гібридний метод локалізації АМР із застосуванням процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байєса, який дозволяє враховувати особливості локалізації положення МР в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації.

Фільтрація Калмана дозволяє оцінювати стан системи на підставі прогнозування його еволюції і зашумлених вимірювань цього стану. Це рекурсивний оптимальний фільтр, який передбачає, що розглянута система є лінійною, а шуми білими. У завданнях локалізації АМР станом системи  $X$  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. У кожен момент у фільтрі Калмана (ФК) здійснюється оцінка значення стану системи таким чином, що точність такого оцінювання на  $k$ -му кроці можна представити у вигляді матриці коваріації  $P_k$ . Якщо позначити шум як випадкову змінну  $N$  з нульовим середнім, а  $X_k = X_k + N$ , 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:

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k + \varepsilon_1, \quad (3)$$

де  $A$  та  $B$  – матриці;  $u_k$  – вектор управління;  $\varepsilon_1$  – 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 рівнянням:

$$Y_k = HX_k + \varepsilon_2, \quad (4)$$

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

Алгоритм роботи ФК в системі локалізації АМР наведено на рис.2.

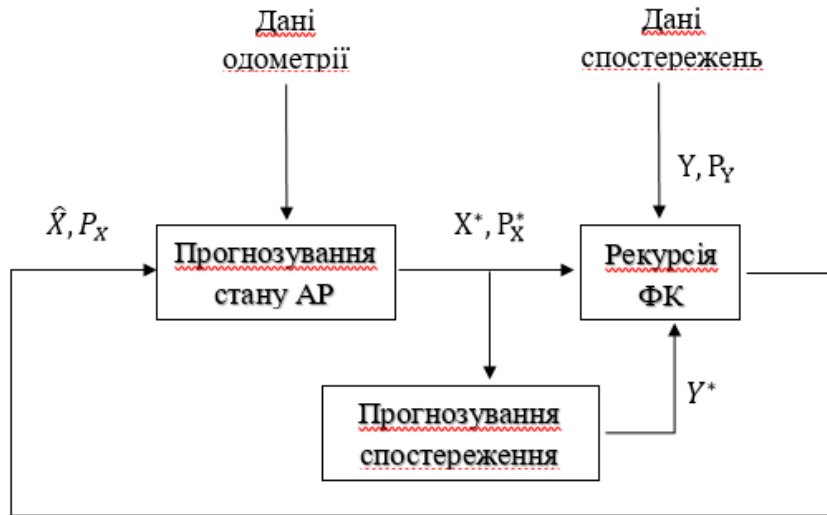


Рисунок 2 – Алгоритм роботи ФК в системі локалізації АМР

Він передбачає реалізацію наступних етапів: прогнозування поточного стану АР на основі моделі еволюції, виходячи з оцінок на попередньому кроці часу і керувань для поточного кроку; прогнозування спостереження з використанням моделі спостереження та оцінювання стану; оцінювання рівня шуму; корекція прогнозованого стану з урахуванням помилки між прогнозованим і реалізованим спостереженнями. Розглянемо особливості застосування ФК для локалізації АМР в умовах аліасингу. У разі істотного аліасингу в процесі спостереження можна отримати безліч різних значень навігаційних параметрів, серед яких необхідно вибрати значення, що відповідає реальному стану робота, яке потім буде використовуватися в рекурсії. Якщо спостереження задають вимірювання положення АМР, можна просто вибрати вимір, найбільш близький до попереднього. Для цього можна використовувати відстань Махаланобіса для двох значень  $X$  та  $Y$  з коваріаціями  $P_x$  та  $P_y$ :

$$d^2 = 0.5(X - Y)^T (P_x + P_y)^{-1} (X - Y), \quad (5)$$

що в скалярному випадку відповідає зважуванню за допомогою дисперсії:

$$d^2 = \frac{(x - y)^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}. \quad (6)$$

У разі фільтрації Калмана з урахуванням попереднього спостереження і інших спостережень, здійснюваних в системі, отримуємо:

$$d^2 = 0.5(Y^* - Y)^T (P_{Y^*} + P_Y)^{-1} (Y^* - Y) = \frac{1}{2} (HX^* - Y)^T (HP_k^* H^T + P_Y)^{-1} (HX^* - Y) \quad (7)$$

На основі відстаней Махалобіса між різними спостереженнями і попереднім спостереженням 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 вимірний і прогноз не коригується.

В роботі розглянуто особливості локалізації АМР з урахуванням початкового оцінювання. Положення АМР, яке визначається за допомогою ФК, істотно залежить від його початкового оцінювання. Показано, що коли початкова оцінка стану близька до реального положення, то система локалізації буде здатна точно оцінити реальний стан робота. В іншому разі система формує оцінку становища, яка є лише локально оптимальною і не відповідає реальному стану робота. Розглянуто також доцільність використання для локалізації АМР фільтрації Байєса (ФБ). ФБ дозволяє об'єднати два типи даних (одометричні і п-дані), при цьому у загальному різні гіпотези щодо реальної локалізації АМР тут представляються розподілом ймовірності присутності робота в наборі можливих положень на карті. Таке уявлення дозволяє розглядати кожне з положень на карті як можливий стан АМР, ймовірність якого оцінюється. Розглянутий підхід, що дозволяє визначити дані розподілів ймовірності та об'єднує набір методів оцінювання стану, які використовують ймовірності і, зокрема, закон Байєса. В загальному випадку це дає можливість дозволяє рекурсивно оцінювати стан системи за оцінкою її еволюції і вимірювань для цього стану. 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.

**В третьому розділі** запропоновано та досліджено методи навігації МР в різних режимах їх експлуатації.

Для пошуку найкоротшого шляху руху мобільного об'єкта у просторі з відомими картами приміщень застосуємо модифікацію алгоритму Jump Point Search (пошук шляху за стрибковими точками). Алгоритм JPS прискорює пошук шляху за рахунок виключення деяких точок маршруту, які в загальному випадку повинні бути переглянуті. На відміну від подібних алгоритмів JPS не вимагає попередньої обробки і додаткових витрат пам'яті. На рис. 3 наведено приклад точки стрибка, яка визначена умовами отримання оптимального маршруту. Тут ми починаємо в точці  $x$  і закінчуємо рух по діагоналі, поки не натрапимо на точку  $y$ . З  $y$  до точки  $z$  можна потрапити за  $k$  шагів по горизонталі. Таким чином,  $z$  є наступником точки для стрибка  $x$ , а це в свою чергу визначає  $y$  як наступника для стрибка з точки  $x$ .

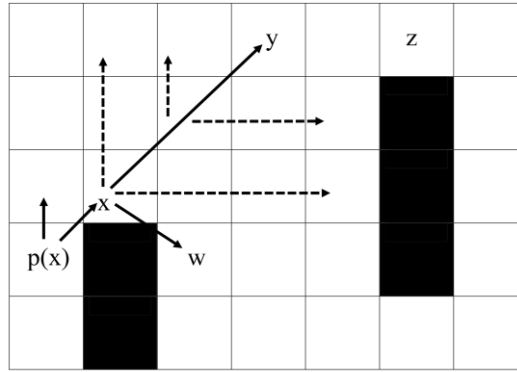


Рисунок 3 – Приклад стрибка за модифікованим алгоритмом JPS

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. Манхеттенська відстань між координатами точок маршруту МР визначається наступним чином:

$$l(x, y) = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|. \quad (8)$$

Для автономної навігації колісного МР в невідомому середовищі з обходом перешкод запропоновано метод із застосуванням нечіткої моделі Такагі-Сугено, який дозволяє за допомогою нечітких регуляторів (НР) реалізувати різні типи (стратегії) поведінки робота в умовах наявності і відсутності пропріоцептивної інформації. Генерація керуючих сигналів за алгоритмами, що відповідають прийнятним стратегіям, заснована на вимірах датчиків для визначення положення цілі і вимірювання відстані до перешкод.

Кінематична модель розглянутого МР представлена в дискретному часі наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} x_r(k+1) &= x_r(k) + T_0 V_r(k) \cos(\theta_r(k)), \\ y_r(k+1) &= y_r(k) + T_0 V_r(k) \sin(\theta_r(k)), \\ \theta_r(k+1) &= \theta_r(k) + T_0 \frac{V_r(k)}{l} \operatorname{tg}(\alpha(k)), \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\theta_r$  – орієнтація МР відносно горизонтальної осі;  $d_{rf}$  – відстань між МР і метою;  $\theta_{rf}$  – кут між поточною орієнтацією МР і поточною орієнтацією мети;  $l$  – довжина шасі;  $D$  – ширина МР;  $D_{r0}$  – відстань від МР до мети;  $\theta_0$  – кут між орієнтацією МР і перешкодою;  $\alpha$  та  $V_r$  – керуючі впливу МР (кут повороту переднього колеса і лінійна швидкість переміщення відповідно);  $T_0$  – період квантування сигналів в часі.

Система керування АМР, 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 АМР 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. Один з можливих варіантів розташування датчиків на АМР і розміщення їх в модулях: модуль МД1 для обходу перешкод, розташованих прямо (FOA), використовує відстані  $d1, d2, d3$ ; модуль МД2 для обходу перешкод, розташованих праворуч (ROA), використовує відстані  $d2, d4, d6$ ; - модуль МД3 для обходу перешкод, розташованих зліва (LOA), використовує відстані  $d3, d5, d7$ . Датчики  $C_i$  вимірюють відстані  $d_i, i = 1, \dots, 7$ . 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 ( $\theta_{rf}$ ). Запропоновану структуру системи керування роботом під час руху до мети наведено на рис. 4.

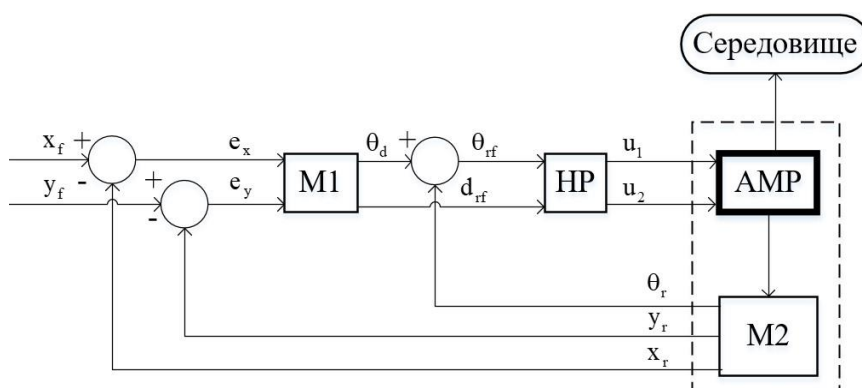


Рисунок 4 – Структура системи керування АМР для стратегії С1

Модуль М1 порівнює реальні координати АМР з координатами мети, щоб розрахувати відстань «АМР – мета» і кут передбачуваного руху  $\theta_d$ . Потім це значення кута порівнюється в блоці М2 з поточною орієнтацією АМР для розрахунку кута між віссю АМР і метою ( $\theta_{rf}$ ). Пропонований НР використовує дві змінні ( $d_{rf}$  та  $\theta_{rf}$ ) для обчислення двох керувань:  $u_1$  (кут повороту переднього

колеся  $\alpha$ ) та  $u_2$  (швидкість переміщення АМР  $V_r$ ). Для лінгвістичних змінних входу і виходу системи прийняті наступні позначення: 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). Для фаззифікації вхідних змінних використано трикутні функції належності (приклад такої функції для  $\theta_{rf}$  наведено на рис. 5). Функції належності для двох керуючих впливів (відстані від АМР до мети і кута між поточною орієнтацією АМР і поточною орієнтацією мети) представлені миттєвими імпульсами.

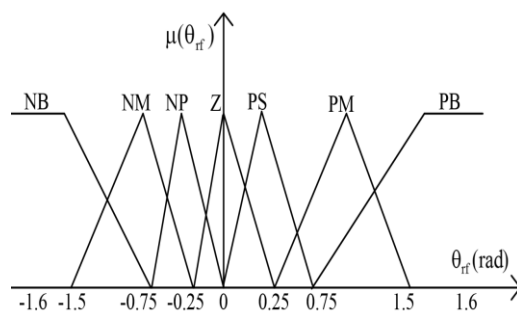


Рисунок 5 – Функції належності для  $\theta_{rf}$

Для реалізації системи керування за допомогою лінгвістичних змінних і функцій належності для змінних входу і виходу сформовано правила виведення. Зв'язок між різними змінними входу і виходу системи був представлений за допомогою 35 правил. Таблиця 1 описує нечіткі правила для реалізації поведінки МР при безпосередньому русі до мети (стратегія С1).

Таблиця 1 – Нечіткі правила для стратегії С1

Дії( $\alpha, V_r$ )		$\theta_{rf}$							
		B	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
$d_{rf}$	Z	$\alpha$	PB	PS	Z	Z	Z	NS	NM
		$V_r$	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	S	$\alpha$	PB	PB	PM	Z	NM	NB	NB
		$V_r$	L	L	L	L	L	L	L
	M	$\alpha$	PM	PM	PS	Z	NM	NB	NB
		$V_r$	L	L	M	M	M	L	L
	B	$\alpha$	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
		$V_r$	L	M	B	B	B	M	L
	VB	$\alpha$	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
		$V_r$	L	M	B	VB	B	M	L

Ця стратегія дозволяє реалізувати автономну навігацію АМР при русі до мети, якщо робот не отримує ніякої інформації від перцептуальних датчиків, а найближчає 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.

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 околom навколо центру перешкоди). У другій структурі використовується система керування, заснована на наборі з п'яти різновидів поведінок для виконання завдання навігації АМР при різних типах навколишнього середовища. Перша реалізована стратегія заснована на використанні НР, який може бути використаний для менш складних середовищ з однотипними перешкодами, та після вимірювання відстані  $D_{ro}$  та кута  $\theta_o$  формувати необхідні керування ( $U_o$ ). На рис. 6 представлена пропонувана структура системи навігації АМР, глобальне завдання якої реалізується активацією одного з наступних типів поведінок: рух до мети або обхід перешкод в трьох напрямках (прямо, направо і наліво). 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 стратегії С1. Блок М4 виконує функції НР в разі появи перешкод в ближньому околі АМР, що відповідає поточній реалізації стратегії С2.

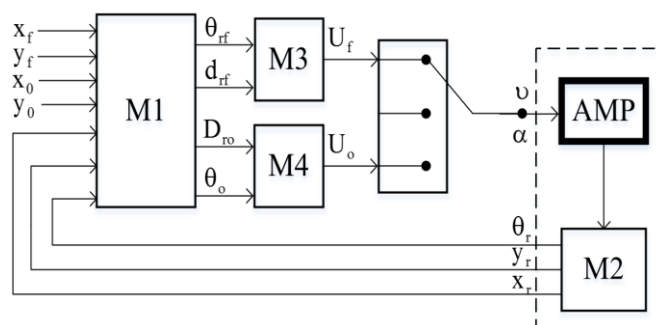


Рисунок 6 – Структура системи керування АМР для стратегії С2

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

правильної і точної інформації про середовище для здійснення навігації з урахуванням форми перешкод. Структура системи навігації представлена на рис. 7.

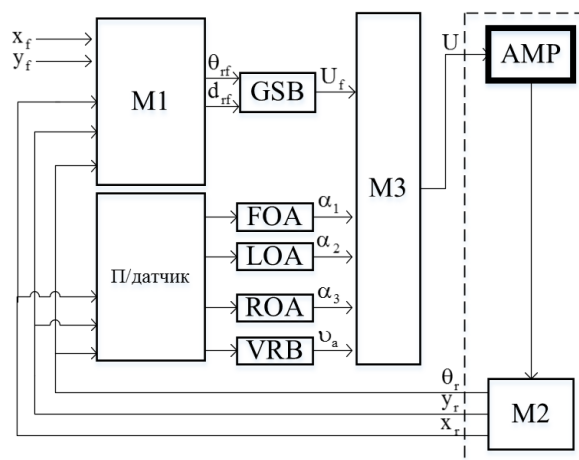


Рисунок 7 – Структура системи керування АМР для стратегії С3

Для вихідної змінної «кут повороту» (регулятор GSB) використовуються ті ж набори імпульсів, як і для стратегії С1 «рух до мети». Для трьох регуляторів обходу перешкод (FOA, ROA та LOA) використовується заданий розподіл нечітких діапазонів для різних датчиків. Відповідно до обраної структури системи керування АМР, якщо середовище є вільним від перешкод, то супервізор М3 для вибору дій ( $\alpha$  і  $V_r$ ) 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:

$$V_r(k+1) = V_r(k) + V_a(k). \quad (10)$$

Вхідними змінними при цьому є поточна швидкість АМР ( $V_a$ ) і мінімальна відстань до найближчої перешкоди ( $D_{min}$ ). Фазифікація входів для  $V_a$  та  $D_{min}$  здійснюється за допомогою заданих функцій належності з лінгвістичними змінними S (Small), M (Middle) та B (Big). Використання такого розподілу дозволило сформулювати таблицю зміни швидкості із застосуванням шести нечітких правил.

В розділі розглянуто 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. Принцип роботи пропонованого модифікованого алгоритму нечіткого керування 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 належності. Під час налаштування за алгоритмом Q-FUZM нечіткий регулятор (НР) мобільного робота має коригувати висновки з правил ТС на основі сигналів підкріплення  $r$ . Завдання полягає в апроксимації функції якості  $Q$  наступної нечіткої функцією SIF (System Inference Fuzzy):

$$\hat{Q} = SIF(s_t) = \sum_{i=1}^m w_i(s_t) c_i, \quad (11)$$

де  $s_t$  – поточний стан руху АМР;  $w_i(s)$  – SIF-коефіцієнти, що визначаються за визначеними функціями належності;  $c_i$  – висновки нечітких правил;  $m$  – кількість нечітких правил.

Процес навчання за алгоритмом Q-FUZM із застосуванням процедури поновлення дозволяє визначити набір правил з урахуванням значень сигналу підкріплення. Наприклад, значення підкріплення, які використовуються для навчання процедури зміни швидкості АМР: -4, якщо АМР стикається з перешкодою; -1, якщо  $d_i > D_{max}$  и  $V_r$  низька для  $i = 1..3$ ; -1, якщо  $d_i < D_{max}$  та  $V_r$  збільшується для  $i = 1..3$ ; 0 – в інших випадках. Цей сигнал використовується для визначення найкращої числової інтерпретації використовуваних лінгвістичних термів. Наприкінці розділу розглянуто можливість комбінованої реалізації двох режимів: дистанційного керування колісним МР за допомогою локалізації його положення в приміщеннях, що знаходяться в межах досяжності датчиків спостереження; та режиму переходу до повністю автономного керування МР (за розглянутими стратегіями CRL1, CRL2 та CRL3) в разі його знаходження в зонах приміщення, які є недосяжними для дистанційної локалізації.

У **четвертому розділі** розглядаються результати моделювання систем локалізації та навігації мобільних об'єктів, що використовують методи, запропоновані в теоретичній частині дисертаційної роботи. Експериментальні дослідження дозволили виявити переваги та недоліки застосування деяких сучасних технологій (зокрема, технологій NFC та iBeacon) в системах локалізації поточного положення рухомих об'єктів. На рис. 8 наведено приклад реалізації метода локалізації на базі технології iBeacon.

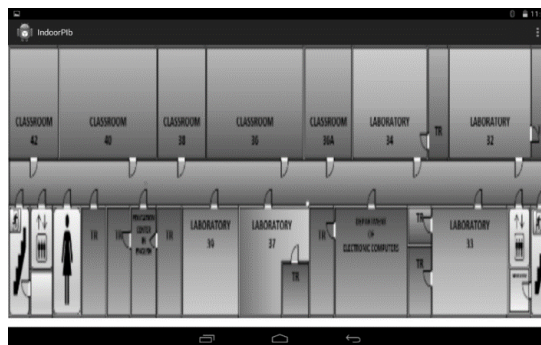


Рисунок 8 – Реалізація методу локалізації МО з використанням iBeacon

Важливою проблемою застосування розглянутих підходів до локалізації мобільних об'єктів є розташування передавачів в просторі. В роботі розглянуто схему такого розташування з використанням методу «1-coverage method» для досліджуваних задач локалізації МО, яка дозволяє зменшити кількість передавачів в просторі.

В розділі наведено численні приклади моделювання навігації колісних МР з використанням нечітких регуляторів та комбінованих регуляторів «НР-QFUZM» в різних середовищах для підтвердження ефективності запропонованих схем керування. Результати експериментів показали, що НР та Q-FUZM регулятори дають прийнятні результати для реалізації розглянутих стратегій. Використовуване середовище враховує обмеження моделювання та руху МР в різних ситуаціях, в тому числі, у вільному просторі і в просторі зі статичними перешкодами. На рис. 9 наведено приклади реалізації метода локалізації на базі технології iBeacon для стратегії С2 (з перешкодами) С3 (зі стінами) з нечітким регулятором.



Рисунок 9 – Приклади траєкторій руху МР для стратегій С2 та С3

Отримані результати моделювання дають прийнятні рішення для автономної навігації МР в складних середовищах. Результати тестування свідчать про можливість автономної навігації колісного мобільного роботу з використанням розглянутих в дисертації алгоритмів навчання з підкріпленням та нечітких регуляторів. Позитивний результат (проходження маршруту АМР з точки S до точки F) було зафіксовано: для стратегії CRL1 (керування АМР при безпосередньому русі до мети) – 100%; для стратегії CRL2 (керування АМР при обході однотипних перешкод) – 98%; для стратегії CRL3 (керування АМР при обході різнотипних перешкод) – 92%. 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».

У додатках наведено акти про впровадження результатів, отриманих у дисертаційній роботі.

## ВИСНОВКИ

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 нейромережових моделей, що можуть бути ефективно використані у середовищах зі змінними властивостями.

Для досягнення поставленої мети в роботі були вирішені завдання, які дозволили отримати результати, що мають наукову новизну:

1. Вперше було запропоновано метод локалізації та навігації МР в середовищі зі змінними властивостями, при умовах, коли дистанційне керування обмежено у своїх можливостях. Метод передбачає можливість керування роботом у стані автономної навігації з комбінованим застосуванням нечіткої моделі, а також RL-методів. Використовуючи сигнали підкріплення, метод дозволяє покращувати набір нечітких правил.

2. Застосування процедур фільтрації Калмана і фільтрації Байєса дозволило удосконалити метод локалізації АМР. Він дозволяє враховувати особливості локалізації положення робота за умов наявності або відсутності пропріоцептивних даних.

3. Метод локалізації мобільних об'єктів на базі технології iVeacon та даних, що поступають від акселерометра у просторі з відомими картами приміщень, було удосконалено. Це дозволяє скоротити кількість передавачів, які необхідні для процесу локалізації.

4 Був удосконалений метод автономної навігації МР в невідомому середовищі з обходом перешкод із застосуванням нечіткої моделі. Метод дозволяє реалізувати різні типи поведінки робота за умов як наявності, так і відсутності пропріоцептивної інформації.

5. Метод пошуку маршруту пересування АМР було розвинено. Він використовує модифікований алгоритм Jump Point Search (пошук шляху по стрибковим точкам) і дозволяє зменшити кількість необхідних обчислень в порівнянні з базовими алгоритмами.

*Практична реалізація результатів досліджень дисертаційної роботи* полягає у програмній реалізації розроблених методів та їх використанні для ряду практичних впроваджень.

Зокрема, результати тестування свідчать про можливість здійснення 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 дисертаційної роботи прийнято для використання в ТОВ «Автомейшн Систем» м. Харків (акт від 12.01.2017), а також в навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки для підготовки та модифікації курсу «Вбудовані системи в інтелектуальній робототехніці» (акт від

12.09.2018.).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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, OAJI, 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. Рустинів, 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. Рустинів В.А. Система локализации и планирования пути мобильных агентов в зданиях [Текст] / В.А. Рустинів, 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. Рустинов В.А. Методы локализации мобильных объектов внутри помещений с использованием IOS платформы [Текст] / 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.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 напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Полтава-Баку-Белгород-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 напрями 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 напрями 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

## 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, 2021.

Дисертацію присвячено розробці гібридних методів локалізації та навігації мобільних колісних роботів з застосуванням нечітких та нейромережевих моделей, що можуть бути ефективно використані у середовищах зі змінними властивостями.

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. Удосконалено 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 Байєса, 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

**Ключові слова:** мобільний робот, локалізація положення мобільних об'єктів, дистанційне керування рухом мобільного роботу; автономна навігація мобільного роботу, фільтрація Калмана, нечіткий регулятор, керування з підкріпленням навчанням.

## АННОТАЦІЯ

Сорокин А.Р. Локализация и навигация мобильных колесных роботов с использованием методов вычислительного интеллекта. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.23 – системы и средства искусственного интеллекта. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2021.

В диссертационной работе предложено решение актуальной научно-практической задачи разработки гибридных методов локализации и навигации мобильных колесных роботов с применением нечетких и нейросетевых моделей, которые могут быть эффективно использованы в средах с переменными свойствами.

Объектом исследования в работе являются процессы локализации и навигации подвижных объектов с применением методов вычислительного интеллекта.

В работе предложен метод локализации и навигации МР в среде с переменными свойствами, который в условиях ограниченных возможностей для дистанционного управления предусматривает возможность переключения режима управления роботом в состояние автономной навигации.

Предложен метод автономной навигации МР в неизвестной среде с комбинированным применением нечеткой модели и RL-методов, который позволяет улучшать набор нечетких правил, используя сигналы подкрепления.

Предложено усовершенствование метода локализации мобильных объектов с использованием технологии iBeacon и данных акселерометра в пространстве с известными картами помещений, что позволяет сократить количество необходимых для локализации передатчиков.

Предложено усовершенствование метода локализации АМР с применением процедур фильтрации Калмана и фильтрации Байеса, который позволяет учитывать особенности локализации положения работа при наличии или отсутствии проприоцептивных данных;

Предложено усовершенствование метода автономной навигации МР в неизвестной среде с обходом препятствий с применением нечеткой модели, который позволяет реализовать различные типы поведения робота в условиях наличия и отсутствия проприоцептивной информации.

Получил дальнейшее развитие метод определения маршрута движения мобильных объектов с использованием модифицированного алгоритма Jump Point Search (поиск пути по прыжковым точкам), который позволяет уменьшить количество необходимых вычислений по сравнению с базовыми алгоритмами.

Практическое значение работы состоит в том, что полученные теоретические результаты реализованы с помощью новых интеллектуальных процедур

локализации и навигации подвижных объектов, обеспечивающих возможность их эффективного использования в системах управления МР в среде с переменными свойствами в условиях ограниченных возможностей для дистанционного управления. Результаты тестирования предложенных методов и соответствующих вычислительных процедур подтверждают их работоспособность и перспективы практического применения

**Ключевые слова:** мобильный робот, локализация положения мобильных объектов, дистанционное управление движением мобильного робота; автономная навигация мобильного робота, фильтрация Калмана, нечеткий регулятор, управление с подкрепленным обучением.

## ABSTRACT

Sorokin A.R. Localization and navigation of mobile wheel robots using computational intelligence methods. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the candidate of technical degree of science on the specialty 05.13.23 – systems and means of artificial intelligence. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2021.

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 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 results of the testing of the proposed methods and the corresponding computational procedures confirm its efficiency and prospects of practical application.

**Key words:** 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, reinforced learning control.

Підп. до друк. \_\_\_\_\_ 2021      Формат 60x80      Папір. друк.  
Умов. друк. арк. 1,2    Облік вид. арк. 1,0      Зам. № \_\_\_\_\_  
Тираж 100 прим.

Надруковано у навчально-науковому видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ  
61166, Харків, просп. Науки, 14