

БАЗОВІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ НЕЙРОНЕЧІТКОГО УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ МОБІЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ

Іван Цмоць¹, Юрій Опотяк², Олександр Олійник³, Володимир Антонів⁴, Андрій Литвин⁵

¹⁻⁴ Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизованих систем управління, Львів, Україна

⁵ Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційних технологій видавничої справи, Львів, Україна

¹ E-mail: ivan.h.tsmots@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4033-8618

² E-mail: yurii.v.opotyak@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-9889-4177

³ E-mail: oleksandr.o.oliinyk@lpnu.ua, ORCID: 0009-0000-5093-7334

⁴ E-mail: volodymyr.y.antoniv@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4544-4612

⁵ E-mail: andriylytvyn123@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4993-7132

© Цмоць І., Опотяк Ю., Олійник О., Антонів В., Литвин А., 2024

Розроблено метод нейронечіткого управління рухом групи мобільних робототехнічних платформ (МРП), який за рахунок використання кожною МРП засобів фазифікації навігаційних даних про стан навколишнього середовища, розроблених баз правил, результатів нечіткого виведення та нейромережевого дефазифікатора забезпечує управління групою МРП у режимі реального часу з підвищеною точністю. Розроблений метод дає змогу зменшити час та вартість розроблення системи нейронечіткого управління рухом групи МРП. Досліджено методи управління мобільними робототехнічними платформами. Визначено, що гібридний метод управління МРП є оптимальним для функціонування групи в умовах динамічно змінюваного оточення. Показано, що для забезпечення гібридного управління групою МРП кожна система нейронечіткого управління рухом окремою МРП повинна мати засоби приймання команд зі спільного пункту управління, а за відсутності такого зв'язку – засоби автономного нейронечіткого управління МРП у групі. Визначено, що для розроблення системи нейронечіткого управління рухом необхідні базові апаратно-програмні компоненти: збору та попереднього опрацювання даних з навігаційних давачів; виявлення перешкод; бездротового зв'язку з безконфліктним обміном даними між МРП у групі; контролери нечіткої логіки з нейроподібною дефазифікацією; обчислення таблиць макрочасткових добутоків для таблично-алгоритмічної реалізації нейромережевих компонентів; планування маршруту руху МРП. Визначено, що інтелектуальні компоненти МРП доцільно реалізувати на базі проблемно-орієнтованого підходу, який поєднує програмні та апаратні засоби для забезпечення високих техніко-експлуатаційних характеристик і роботи в реальному часі. Вибрано апаратну базу для реалізації системи, яка має мікрокомп'ютери Raspberry Pi, мікроконтролери STM8S003F3 та ESP32C3, гіроскоп MPU-6050, цифровий компас QMC5883L, лідар YDLidar X4, трансивер Si4463 та GPS-модуль GP-01-Kit. Розроблено апаратно-програмні засоби на основі мікроконтролера STM8S003F3 для збору та попереднього опрацювання даних із навігаційних давачів, що підвищують точність визначення напрямку та

орієнтації МРП. Використання розроблених базових компонентів забезпечує зменшення часу та вартості розроблення систем нейронечіткого управління групою МРП у реальному часі з урахуванням вимог конкретного застосування.

Ключові слова: управління групою, мобільні робототехнічні платформи, гібридне управління, нейронечітке управління.

Вступ

На сучасному етапі розвитку наземних мобільних робототехнічних платформ (МРП) актуальним завданням є управління множиною (групою) таких МРП, які об'єднані спільним цільовим завданням. Групи наземних МРП ефективно використовуються як у цивільній, так і військовій галузях для перевезення великих обсягів різноманітних вантажів, дослідження великих об'єктів і територій. Під час виконання таких завдань важливою проблемою є організація управління групою МРП, яка передбачає розв'язання задач навігації з урахуванням змін в навколишньому середовищі та розподілу завдань між МРП.

Для управління групою МРП можна використовувати і дистанційне централізоване управління, за якого кожною МРП управляють зі спільного пункту управління, і децентралізоване (автономне) – з використанням кожною МРП власної системи управління. У результаті поєднання централізованого та автономного управління отримуємо гібридне управління групою МРП.

Формулювання проблеми

Сьогодні актуальною задачею є розроблення методів і засобів автономного управління у реальному часі групою МРП в навколишньому середовищі, яке динамічно змінюється. Для розв'язання такої задачі пропонуємо використати методи та засоби нейронечіткого управління, які забезпечать ефективне управління рухом групи МРП в умовах динамічної зміни ситуації та враховують вимоги конкретного застосування. В разі нейронечіткого управління групою МРП необхідно неперервно аналізувати навігаційний стан навколишнього середовища, визначати координати МРП у групі та забезпечити взаємодію окремих МРП із метою виконання поставлених завдань. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває задача розроблення базових компонентів нейронечіткого управління, що просто адаптуються до вимог конкретного застосування і орієнтовані на синтез широкого спектру систем управління групою МРП у реальному часі.

Режим реального часу у системах нейронечіткого управління групою МРП досягається шляхом розпаралелення і конвеєризації процесів опрацювання та використання спеціалізованих апаратних засобів. Забезпечення вимог конкретного застосування в частині масогабаритних характеристик і енергоспоживання досягається способом широкого використання сучасної елементної бази (мікроконтролерів, систем на кристалі, програмованих логічних інтегральних схем тощо) та проблемно-орієнтованого підходу, який передбачає поєднання програмних (універсальних) і апаратних (спеціалізованих) засобів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розроблення систем управління групою мобільних робототехнічних платформ є важливим науковим завданням, яке перебуває у центрі уваги багатьох дослідників. У працях [1–3] розглянуто основні підходи до управління групою МРП. Основна увага авторів зосереджена на системах централізованого, децентралізованого і розподіленого управління як рішення для забезпечення ефективної координації дій МРП у реальному часі. Аналіз публікацій [4–7] показав, що розроблення, вдосконалення і перевірка методів навігації, управління і прийняття рішень для МРП, які працюють в умовах складного середовища, є важливим напрямком досліджень. Наступним етапом досліджень є масштабування методів і алгоритмів управління на групу МРП, що вимагає забезпечення узгодженості дій та ефективної координації між платформами.

У роботах [8–9] розглянуто використання графових нейронних мереж для управління групою МРП, які дають змогу МРП ефективно моделювати складні взаємозв'язки між платформами, забезпечуючи узгодженість дій і точність навігації в реальному часі, результатом чого є підвищення адаптивності і стійкості МРП до динамічних змін навколишнього середовища. Аналіз дослідження [10–11] показав ефективність застосування нечіткої логіки, яка дає змогу адаптивно регулювати швидкість і траєкторії МРП на основі нечітких даних, забезпечуючи синхронізацію дій у невизначеному середовищі.

Автори роботи [12] розглядають підкріплювальне навчання як метод, завдяки якому МРП може самостійно навчатися через досвід, оптимізуючи свої дії на основі зворотного зв'язку від навколишнього середовища без потреби у попередньо визначених моделях. У роботах [13–14] розглядають алгоритми консенсусу як підхід децентралізованого управління, який дає змогу МРП досягати узгоджених рішень без центрального управління.

У працях [15–16] авторами виділено базові компоненти системи управління групою МРП, до яких належать: системи для збору та попереднього опрацювання даних із навігаційних давачів, виявлення перешкод, компоненти для забезпечення бездротового зв'язку, бази даних, засоби фазифікації даних, контролери нечіткої логіки та засоби планування маршруту й управління навігацією МРП у складі групи.

Авторами досліджень [17–19] показано, що архітектура системи нейронечіткого управління рухом окремої МРП у складі групи складається з таких компонентів: процесорної платформи для обчислень і управління, мікроконтролерів для забезпечення роботи сенсорних і виконавчих систем, сенсорів для вимірювання параметрів руху та навігації, як-от гіроскоп і цифровий компас, лазерних або оптичних давачів для виявлення перешкод, а також модулів бездротового зв'язку для забезпечення координації між МРП у реальному часі.

У роботі [20] розглянуто компоненти збору та попереднього опрацювання даних із гіроскопа MPU-6050 як елементи для визначення кутових швидкостей та стабілізації руху МРП. Автори праці [21] запропонували компоненти збору та попереднього опрацювання даних з цифрового компаса HMC5883/QMC5883L для точного визначення орієнтації та напрямку руху МРП. Щоб визначити точне положення об'єктів і перешкод у навколишньому середовищі, дослідники [25] пропонують використовувати компоненти вимірювання відстані до перешкод на основі лідара. У праці [23] описано компонент визначення координат МРП за допомогою глобальної системи позиціонування (GPS).

Також варто проаналізувати та визначити недоліки засобів планування маршруту руху МРП. Автори роботи [24] визначають такі недоліки: складність адаптації до динамічних середовищ, проблеми з оптимізацією маршрутів, можливість потрапляння в локальні мінімуми, низька масштабованість для групових завдань та висока обчислювальна складність.

У дослідженні [28] відзначено, що однією з основних проблем сучасних систем нейронечіткого управління є недостатня увага до фазифікації навігаційних даних. Автори роботи вказують на те, що опрацювання даних про навколишнє середовище часто здійснюється без урахування їхньої нечіткої природи, що призводить до зниження точності управління. Це створює труднощі в адаптації до змін середовища, що негативно впливає на узгодженість та координацію дій групи МРП.

У роботі [26] наголошено на тому, що методи управління, засновані на жорстких правилах, часто не враховують динамічність навколишнього середовища. Автори зазначають, що нечіткі бази правил дають змогу краще працювати з невизначеністю в даних, але їхнє розроблення залишається складним завданням. Часто це призводить до затримок під час прийняття рішень та неточностей в управлінні групою МРП.

Автори дослідження [22] показали, що однією з ключових проблем при розробці систем нейронечіткого управління є недостатня точність сенсорних даних та обмежені обчислювальні ресурси, які використовуються для прийняття рішень. Недосконалість сенсорів або їхня низька

точність призводять до помилок у зборі інформації про навколишнє середовище, що негативно впливає на здатність системи адаптуватися до швидких змін умов та знижують точність виконання завдань. Також опрацювання великого обсягу даних вимагає значних обчислювальних ресурсів, що може призводити до зниження швидкості роботи системи і, як наслідок, до затримок у прийнятті рішень.

У дослідженні [27] підкреслюється важливість нейроподібної дефазифікації для підвищення точності та швидкості управління групою МРП. Автори роботи звертають увагу на те, що більшість сучасних методів дефазифікації працюють повільно і не забезпечують достатньої точності в динамічних умовах. Це часто призводить до несинхронності руху платформ у групі, що ускладнює їхню координацію.

З аналізу публікацій випливає, що побудова систем керування МРП та груп таких платформ вимагає розроблення відповідних базових компонентів, орієнтованих на нечіткі нейромережеві засоби.

Формулювання цілі статті

Виконаний аналіз демонструє, що актуальною задачею є розроблення методу та базових компонентів системи нейронечіткого управління групою МРП.

Об'єкт дослідження – процеси управління рухом МРП, збору, збереження та опрацювання навігаційних даних і розроблення базових компонент систем нейронечіткого управління групою МРП.

Предмет дослідження – методи управління групою МРП, опрацювання навігаційних даних і розроблення базових компонент систем нейронечіткого управління групою МРП.

Мета роботи – розробити метод і базові компоненти нейронечіткого управління групою МРП. Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- виділення базових компонентів системи нейронечіткого управління групою МРП;
- розроблення архітектури системи нейронечіткого управління рухом окремої МРП у складі групи;
- компоненти збору та попереднього опрацювання даних з навігаційних давачів;
- засоби планування маршруту руху МРП;
- метод нейронечіткого управління групою МРП.

1. Розроблення архітектури системи нейронечіткого управління рухом окремої МРП у складі групи

Основною вимогою, яку висувають до системи нейронечіткого управління рухом окремою МРП, є забезпечення її руху в групі під час використання гібридного управління. Для забезпечення гібридного управління групою МРП кожна система нейронечіткого управління рухом окремою МРП повинна мати засоби приймання команд зі спільного пункту управління, а за відсутності такого зв'язку – засоби автономного нейронечіткого управління МРП у групі. Архітектура система нейронечіткого управління рухом окремої МРП для задач гібридного управління групою МРП наведена на рис. 1, де M_k – мікроконтролер.

Основними компонентами системи нейронечіткого управління рухом окремої МРП є:

- мікрокомп'ютер Raspberry Pi;
- мікроконтролери STM8S003F3 та ESP32C3;
- гіроскоп MPU-6050;
- цифровий компас QMC5883L;
- лідар YDLidar X4;
- трансивер Si4463;
- GPS модуль.

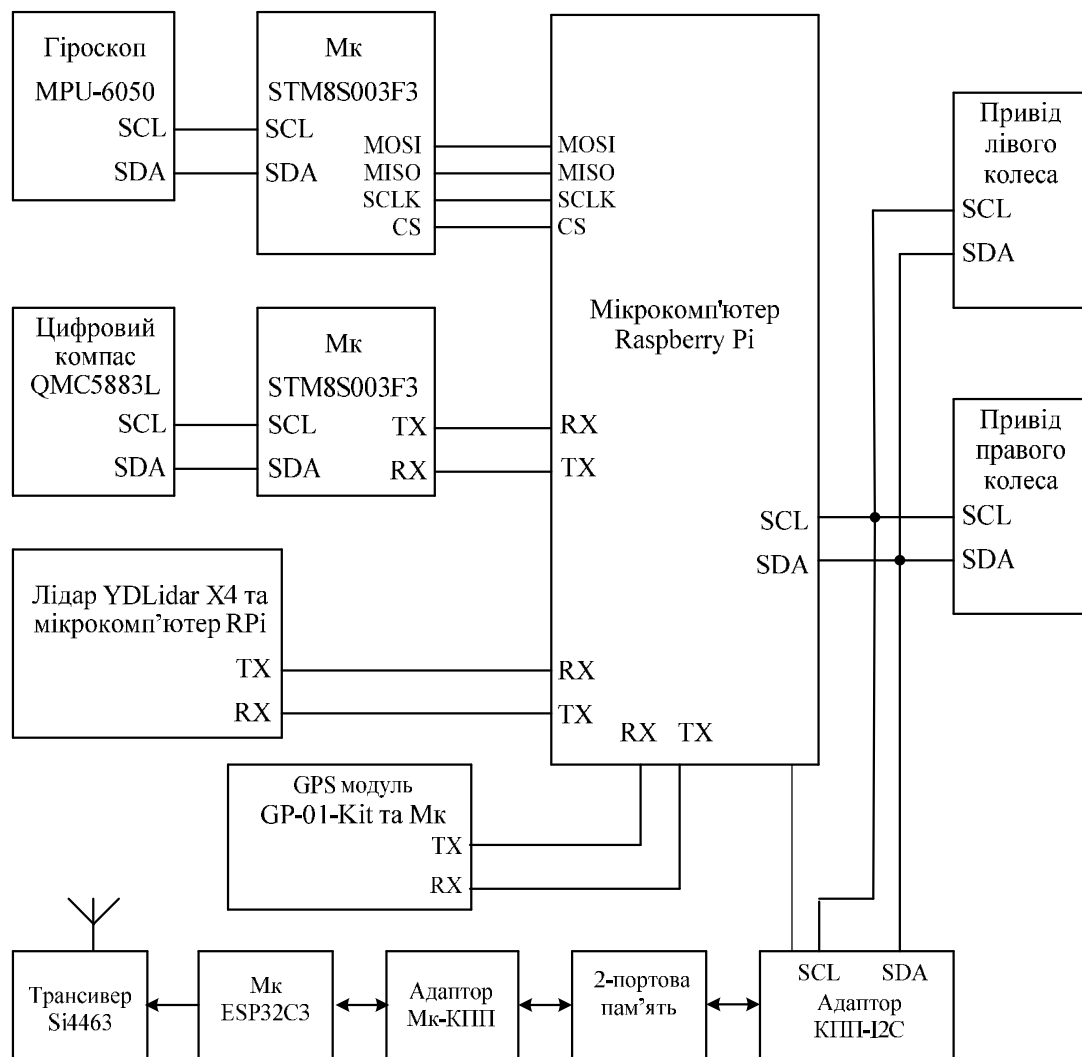


Рис. 1. Архітектура системи нейронечіткого управління рухом окремої МРП

Опрацювання навігаційних даних та управління рухом МРП здійснюється на мікрокомп'ютері Raspberry Pi, основними компонентами якого є: процесор (CPU) Broadcom BCM2711 із чотирма ядрами ARM Cortex-A72, які працюють на частоті до 1.5 ГГц; графічний процесор (GPU); оперативна пам'ять (RAM) об'ємом від 2 ГБ до 8 ГБ; система зберігання даних на картці microSD; порти та роз'єми – USB-порти (від 2-х до 4-х), порт Ethernet, два мікро-HDMI порти, піновий роз'єм GPIO, роз'єм для підключення камери та роз'єм для під'єднання дисплея; бездротові технології (Wi-Fi і Bluetooth).

Для збору та опрацювання навігаційних даних використовують 8-розрядний мікроконтролер STM8S003F3, який побудований на базі ядра STM8, що працює тактові частоті до 16 МГц. До складу мікроконтролера STM8S003F3 входить: пам'ять, яка складається з flash пам'яті – 8 КБ, RAM – 1 КБ та EEPROM – 128 байт; система переривань; модулі таймерів; 10-розрядний АЦП; інтерфейси UART, SPI та I2C.

Для роботи з трансивером використовується розроблений компанією Espressif Systems 32-розрядний мікроконтролер ESP32-C3. Основними компонентами цього мікроконтролера є: одноядерне ядро RISC-V, що працює на частоті до 160 МГц; пам'ять – RAM обсягом 400 КБ, флеш-

пам'ять обсягом 4 МБ; дротові інтерфейси – GPIO, UART, SPI, I2C, I2S, PWM, ADC та DAC; бездротові інтерфейси – Wi-Fi (2.4 ГГц 802.11 b/g/n) та Bluetooth 5.0 (LE).

GPS-модуль GP-01-Kit на мікросхемі AT6558R використовується для визначення координат, швидкості та напрямку руху МРП. Модуль підтримує високу частоту оновлення даних, що забезпечує точне та швидке визначення місцезнаходження. Висока чутливість приймача та оптимізоване енергоспоживання GPS-модуля забезпечує приймання слабких сигналів від супутників і робить доцільним його використання у МРП. Для інтеграції GPS-модуля з мікрокомп'ютером Raspberry Pi використовується дротовий інтерфейс UART.

Пристрій MPU-6050 – це комбінований давач, який об'єднує в собі гіроскоп та акселерометр із високою точністю вимірювання кутової швидкості та прискорення. Висока точність вимірювання забезпечується завдяки використанню 16-розрядних АЦП. Для зберігання цих вимірювань у MPU-6050 використовується вбудована 1024-байтова пам'ять FIFO. Для зв'язку мікроконтролера з пристроєм MPU-6050 використовується дротовий інтерфейс I2C. На основі MPU-6050 будуються ефективні системи стабілізації та відстеження руху МРП.

Для високоточного визначення напрямку та орієнтації в просторі МРП використовується цифровий компас HMC5883/QMC5883L. Висока точність вимірювання у цифровому компасі досягається завдяки використанню 12-розрядного АЦП, автоматичного калібрування, компенсації температури та програмної корекції зсувів. У цифровому компасі для зв'язку з мікроконтролером використовується дротовий інтерфейс I2C.

Лідар YDLidar X4 призначений для побудови систем навігації та уникнення перешкод при русі МРП, а також для створення двомірних і тривимірних карт місцевості. Він має такі основні характеристики: відстань вимірювання до 12 м; точність вимірювання $\pm 1\%$ (на відстані до 3 м) і $\pm 2\%$ (на відстані більш ніж 3 м); кутовий діапазон вимірювання 360 градусів (повне коло); кутова роздільна здатність від 0.45 до 1 градуса; швидкість сканування від 5 до 10 Гц (обертів за секунду).

Для зв'язку лідара YDLidar X4 з керуючим мікрокомп'ютером Raspberry Pi використовується послідовний інтерфейс UART, за допомогою якого передаються розраховані значення віддалі МРП до перешкод у відповідних секторах огляду (лівому та правому). Вказані значення координат отримуються шляхом аналізу “сирих” даних з лідара за допомогою додаткового мікрокомп'ютера Raspberry Pi Zero W.

Для відпрацювання задач забезпечення бездротового зв'язку між МРП у групі застосовано блок трансивера на мікросхемі Silicon Labs Si4463, який забезпечує роботу у діапазоні 433 МГц на основі промислового модуля типу HC-12. Трансивер забезпечує роботу на 100 каналах за допомогою команд налаштування з кроком 400 кГц. Максимальна потужність передачі модуля 100mW (20dBm), чутливість приймача -117dBm при швидкості 5000 бод по ефіру.

За даними виробника відстань зв'язку до 1000 м (режим FU3 4800 біт/с по послідовному порту) до 1800 м (режим FU4 при зниженій швидкості обміну). Модуль має вбудований мікроконтролер для керування роботою трансивера, що виключає необхідність програмування користувачем. Модуль забезпечує прозору напівдуплексну передачу даних по послідовному порту. Середній робочий струм чотирьох режимів FU1, FU2, FU3, і FU4 в стані очікування: 3.6mA, 80uA, 16mA і 16mA відповідно, тоді як максимальний робочий струм у будь-якому режимі становить 100mA (в режимі передавання). Трансивер Si4463 керується через шину SPI мікроконтролером STM8S003F3 (STMicroelectronics). Використання STM8S забезпечує прозорий послідовний інтерфейс і дає змогу використовувати модуль як послідовний TTL інтерфейс без будь-яких додаткових пристроїв.

2. Виділення базових компонентів системи нейронечіткого управління групою МРП

Система нейронечіткого управління групою МРП повинна забезпечувати ефективне управління групою МРП у реальному часі з врахуванням змін в оточуючому середовищі та виконання поставлених завдань. У разі групового використання МРП виникає низка складних завдань,

пов'язаних із управлінням рухом МРП (навігацією) та організацією колективної взаємодії при виконанні поставлених завдань. Виконання таких завдань досягається шляхом використання гібридного управління та нейронечітких алгоритмів. Гібридне управління групою МРП поєднує централізоване та децентралізоване управління, при якому кожна МРП управляється як зі спільного пункту управління, так і за допомогою власної системи управління. Для реалізації гібридної системи нейронечіткого управління групою МРП виділено такі базові апаратно-програмні компоненти:

- збору та попереднього опрацювання даних з навігаційних давачів;
- виявлення перешкод;
- бездротового зв'язку з безконфліктним обміном даними між МРП у групі;
- бази правил;
- фазифікації даних з навігаційних давачів;
- формування нечітких висновків;
- нейроподібної дефазифікації;
- обчислення таблиць макрочасткових добутоків для таблично-алгоритмічної реалізації нейромережових компонентів;
- контролера нечіткої логіки з нейроподібною дефазифікацією;
- планування маршруту руху МРП;
- управління навігацією МРП у групі.

Апаратно-програмні компоненти збору та попереднього опрацювання даних з навігаційних давачів (гіроскоп MPU-6050, цифровий компас HMC5883/QMC5883L, лідар YDLidar X4) реалізуються з використанням мікроконтролерів STM8S003F3, які під'єднуються до навігаційних давачів через послідовний інтерфейс I2C. Отримання даних з лідара YDLidar X4 забезпечується використанням мікрокомп'ютера Raspberry Pi Zero W.

Взаємодія апаратно-програмних компонентів системи нейронечіткого управління групою МРП із використанням операційної системи Linux наведена на рис. 2, де АПК – апаратно-програмна компонента.

Апаратно-програмні компоненти бездротового зв'язку з безконфліктним обміном даними між МРП у групі реалізуються на базі багатоканального пристрою безконфліктного обміну даними, трансиверів і мікроконтролерів типу ESP32 та Atmega.

Апаратно-програмні компоненти фазифікації даних з навігаційних давачів і формування нечітких висновків реалізуються на базі мікроконтролерів типу ESP32 та Atmega.

Контролер нечіткої логіки з нейроподібною дефазифікацією реалізується на базі мікроконтролера типу ESP32 та Atmega доповненого таблично-алгоритмічними засобами на FPGA.

Планування і відслідковування маршруту руху МРП виконується на мікрокомп'ютерній платформі.

Для управління апаратно-програмними компонентами запропоновано використовувати мікрокомп'ютерну платформу та операційну систему Linux. Вибір мікрокомп'ютерної платформи та версії операційної системи Linux здійснюється відповідно до вимог продуктивності, енергоспоживання та конструктивних особливостей системи нейронечіткого управління групою МРП.

Апаратно-програмні компоненти взаємодіють між собою та з керуючим мікрокомп'ютером використовуючи операційну систему Linux, дротові (послідовні інтерфейси) та бездротові технології. Операційна система Linux забезпечує одночасно виконання багатьох процесів, підтримує одночасний доступ декількох користувачів і адаптування до вимог конкретного застосування, оскільки вихідний код Linux доступний для всіх. Операційна система орієнтована на роботу з мікрокомп'ютером з обмеженими обчислювальними ресурсами та дотриманням жорстких часових обмежень для виконання завдань.

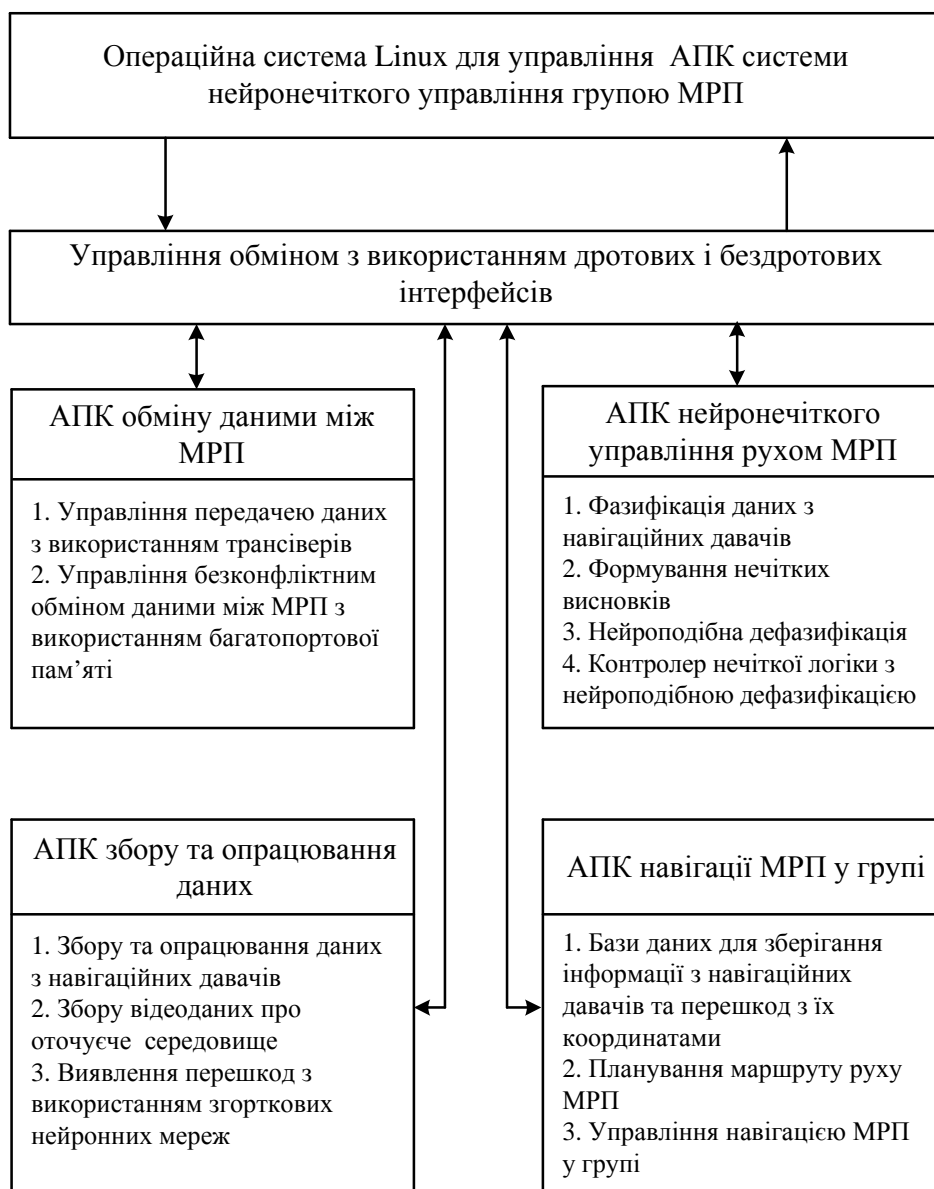


Рис. 2. Схема взаємодії компонентів системи нейронечіткого управління групою МРП

3. Компоненти збору та попереднього опрацювання даних із навігаційних датчиків

Компонента збору та попереднього опрацювання даних з гіроскопа MPU-6050. Датчик кутового прискорення, або акселерометр кутового прискорення, на основі електронного гіроскопу – це пристрій, який вимірює зміну швидкості обертання об'єкта навколо певної осі.

Цей пристрій використовується для контролю кутового положення МРП під час нейронечіткого управління її рухом. Основні компоненти датчика кутового прискорення: гіроскоп, який вимірює кутову швидкість обертання навколо однієї або кількох осей; акселерометр, який вимірює лінійне прискорення вздовж однієї або кількох осей; процесор сигналів, який приймає сигнали від гіроскопів і акселерометрів, обробляє їх та обчислює кутове прискорення. Перевагами датчика кутового прискорення є висока точність, широкий діапазон вимірюваних кутових швидкостей надійність та довговічність. Недоліком датчика кутового прискорення є необхідність опрацювання результатів вимірювання для зменшення шуму та похибок.

У системі нейронечіткого управління рухом МРП використано датчик кутового прискорення на основі електронного гіроскопу MPU-6050, який містить три осьові гіроскопи, що вимірюють

кутову швидкість по трьох осях: X, Y, і Z та акселерометричні дані, які використовуються для корекції напрямку руху.

Схема під'єднання гіроскопа MPU-6050 до мікроконтролера STM8S003F3 із використанням інтерфейсу I2C наведена на рис. 3. Апаратно-програмна компонента збору та попереднього опрацювання акселерометричних даних складається з гіроскопа MPU-6050 та мікроконтролера STM8S003F3, які з'єднанні між собою інтерфейсом I2C.

Мікроконтролер STM8S003F3 серії STM8S компанії STMicroelectronics. Мікроконтролер має гарвардську архітектуру та 8-розрядне ядро з тактовою частотою до 16 МГц. Для під'єднання зовнішніх пристроїв мікроконтролер STM8S003F3 має інтерфейси: UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) з асинхронною передачею і прийомом даних; SPI (Serial Peripheral Interface) із синхронним послідовним протоколом обміну даними; I2C (Inter-Integrated Circuit).

У гіроскопі MPU-6050 використовуються додаткові регістри, які пов'язані з алгоритмом роботи датчика та його параметрами. Наприклад, регістри можуть містити адресу датчика, стан датчика, частоту вимірювань, результат самотестування, прапорці виникнення стандартних помилок, кількість даних у FIFO тощо. Для того, щоб користувач довіряв виміряним даним, цифровий датчик MPU-6050 має регістри самотестування.

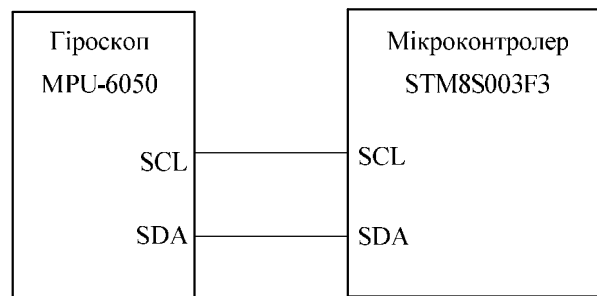


Рис. 3. Схема під'єднання гіроскопа MPU-6050 до мікроконтролера STM8S003F3 із використанням інтерфейсу I2C

Для перевірки датчика підсистема самотестування генерує спеціальний сигнал, який безпосередньо діє на елемент, що робить вимірювання, очікуючи від нього певного виміряного значення цього сигналу. Рішення про працездатність датчика приймає користувач, порівнявши виміряне значення зі стандартним значенням, яке діяло на датчик. У разі точних вимірювань необхідно виконувати індивідуальне коригування та враховувати особливості кожного конкретного датчика.

Алгоритм доступу до MPU-6050 з використанням протоколу I2C. Для отримання кутового прискорення та акселерометричних даних потрібно насамперед здійснити ініціалізацію MPU-6050. Така ініціалізація передбачає виконання таких кроків:

- налаштувати MPU-6050 для вимірювання даних;
- під'єднати MPU-6050 до мікроконтролера STM8S003F3;
- налаштувати регістри для читання даних.

З регістрів гіроскопа MPU-6050 зчитуються дані кутової швидкості.

Компонента збору та опрацювання даних із цифрового компасу HMC5883/QMC5883L. Модуль із цифровим компасом HMC5883/QMC5883L вимірює магнітне поле по трьох осях. Це дає змогу отримувати тривимірну картину спрямованості магнітного поля і його величину. Для доступу до цифрового компаса використано мікроконтролер STM8S003F3, який під'єднується через інтерфейс I2C. Схема під'єднання цифрового компаса до мікроконтролера STM8S003F3 з використанням інтерфейсу I2C наведена на рис. 4.

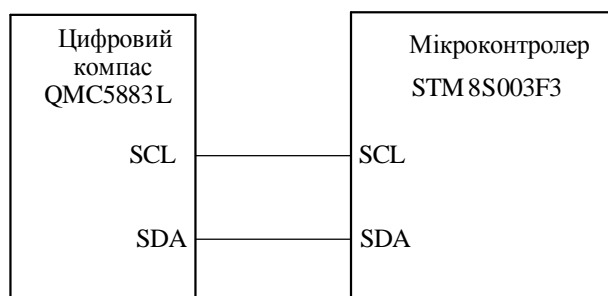


Рис. 4. Схема під'єднання цифрового компаса HMC5883/QMC5883L до мікроконтролера STM8S003F3 із використанням інтерфейсу I2C

Програма визначення напрямку руху МРП за допомогою цифрового компаса QMC5883L та мікроконтролера STM8S003F з'єднаних через інтерфейс I2C передбачає виконання таких кроків:

- ініціалізація мікроконтролера та HMC5883/QMC5883L;
- зчитування даних з HMC5883/QMC5883L;
- обчислення напрямку руху;
- виведення результату.

На рис. 5. показано дані вимірів із давача HMC5883 щодо спрямованості магнітного поля по осях X та Y, тобто у площині, паралельній до поверхні Землі.

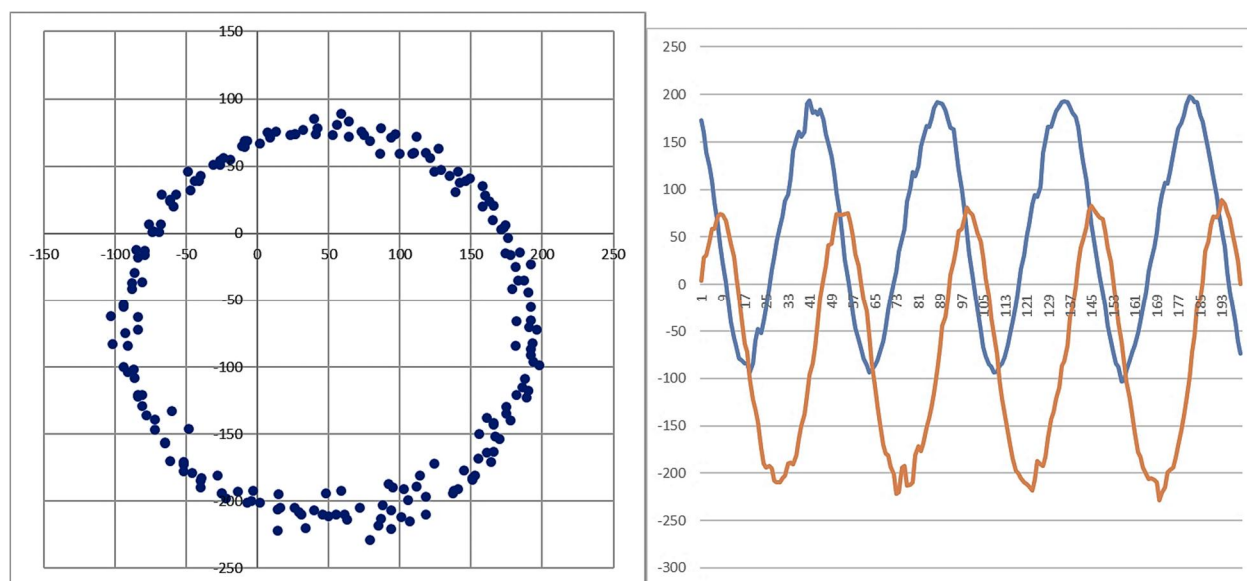


Рис. 5. Візуалізація даних вимірювань цифрового компаса HMC5883/QMC5883L

Для отримання даних МРП оберталася навколо своєї осі на 360 градусів і в процесі обертання фіксувалися дані щодо спрямованості магнітного поля. У лівій частині рис. 5 наведено дані у координатах X – Y, у правій – зміну даних по координатах X та Y у часі.

На графіках можна зауважити зміщення отриманих значень, обумовлене певною остаточною намагніченістю металевих частин МРП або впливом зовнішніх магнітних полів. Отже, давач HMC5883 бажано розміщувати далі від металевих частин і використовувати для кріплення немагнітні матеріали. Варто звернути увагу, що доволі часто штирьові DIP роз'єми виготовляються зі сталі з додатковим напиленням, що у разі використання з вказаним давачем може повністю спотворити дані вимірювань.

Компонента вимірювання відстані до перешкод із використанням лідара. Лідари (LiDAR, Light Detection and Ranging) типу YDLidar X4 (рис. 6) є важливим інструментом для системи нейронечіткого управління рухом МРП. Вони використовуються в МРП для виявлення перешкод та вимірювання відстаней до них на шляху руху платформи. Робота лідарів ґрунтується на виконанні таких кроків: випромінювання лазерного імпульсу, відбиття імпульсу, вимірювання часу, розрахунок відстані.



Рис. 6. Модуль лідара YDLidar X4 з мікрокомп'ютером Raspberry Pi Zero W

У МРП лідар забезпечує високоточне вимірювання відстані до перешкод по маршруту руху в діапазоні від 0 до +/-180 градусів. Результати вимірювання відстаней лідаром забезпечують точну локалізацію МРП у навколишньому середовищі та допомагають у навігації за запланованим маршрутом. Виміряні лідаром відстані до перешкод надходять у систему нейронечіткого управління рухом МРП, яка забезпечує об'їзд перешкод і рух за запланованим маршрутом. Використання лідарів у системі нейронечіткого управління рухом МРП значно підвищує її здатність до автономної навігації та взаємодії з навколишнім середовищем.

Для розроблення програмних засобів вимірювання відстаней до перешкод у діапазоні 0+/-180 градусів за допомогою лідара, застосовано штатний пакет YDLidar-SDK та відповідну бібліотеку ydlidar. Програму реалізовано на мові Python, а в ролі платформи для попереднього опрацювання застосовано мікрокомп'ютер Raspberry Pi ZeroW. У процесі роботи лідар YDLidar X4 формує пакети з даними вимірювань, які у подальшому за допомогою створеного ПЗ перетворюються у формат кут-віддаль.

Текст програми наведено нижче.

```
import os
import ydlidar
import time
import serial

ser = serial.Serial(
    port='/dev/ttyS0', #Replace ttyS0 with ttyAM0 for Pi 1, Pi 2, Pi 0
    baudrate = 115200,
    parity=serial.PARITY_NONE,
    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
    bytesize=serial.EIGHTBITS,
    timeout=1
)

if __name__ == "__main__":
    ydlidar.os_init();
    ports = ydlidar.lidarPortList();
```

```

port = "/dev/ydlidar";
for key, value in ports.items():
    port = value;
laser = ydlidar.Cydlidar();
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropSerialPort, port);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropSerialBaudrate, 128000);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropLidarType, ydlidar.TYPE_TRIANGLE);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropDeviceType, ydlidar.YDLIDAR_TYPE_SERIAL);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropScanFrequency, 10.0);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropSampleRate, 1);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropSingleChannel, False);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropMaxRange, 16.0);
laser.setlidaropt(ydlidar.LidarPropMinRange, 0.08);

ret = laser.initialize();
if ret:
    ret = laser.turnOn();
    scan = ydlidar.LaserScan();
    while ret and ydlidar.os_isOk():
        r = laser.doProcessSimple(scan);
        if r:
            print("Scan received[" , scan.stamp, "]:", scan.points.size());
            angle = []
            ran = []
            intensity = []
            ser.write(str.encode("%s %d\n"%("__NBR", scan.points.size())))
            for point in scan.points:
                ser.write(str.encode("%3.3f %3.3f\n"%(point.angle, point.range)))
        else:
            print("Failed to get Lidar Data")
            time.sleep(1);
    laser.turnOff();
laser.disconnect();

```

Програма забезпечує процес сканування, отримання “сірих” даних з лідара X4 їхнього декодування та надсилання даних про декодовані значення кута та віддалі у послідовний порт. Вказані дані використовуються для визначення перешкод руху у ближньому радіусі для надання інформації системі керування МРП.

Візуалізацію даних лідара X4 у полярних координатах у процесі виявлення перешкод у ближньому радіусі дії показано на рис. 7.

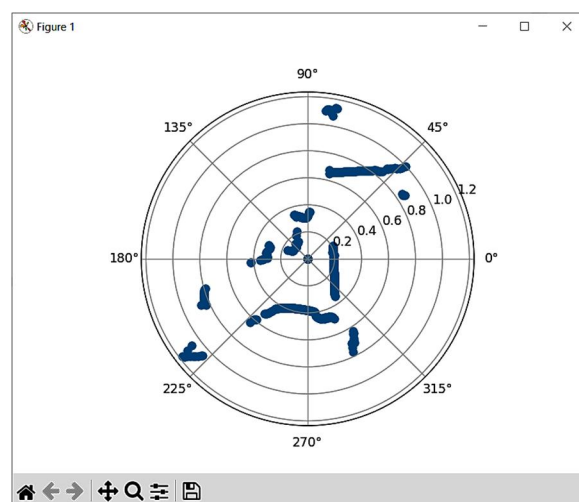


Рис. 7. Візуалізація перешкод на основі даних лідара X4

На рис. 8 наведено результати сканування приміщення.

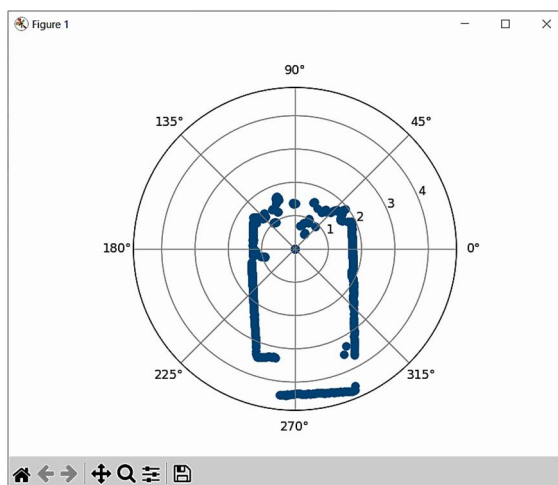


Рис. 8. Візуалізація результатів сканування приміщення

На основі отримуваних із лідара даних можлива реалізація довільної кількості віртуальних давачів перешкод. Наприклад, для визначення перешкод справа і зліва по курсу руху МРП використовуємо дані лідара й аналізуємо їх у відповідному діапазоні секторів огляду. Для реалізації віртуальних давачів використовуємо сектори біля 10 градусів із центральними кутами +/-45 градусів.

Компонента визначення координат МРП. Інформація про координати МРП отримується з використання глобальної системи позиціонування (GPS). Для виконання цих вимог доступні промислово реалізовані модулі на основі спеціалізованих контролерів, зокрема GPS GP-01-Kit на мікросхемі AT6558R (рис. 9). Модулі забезпечують прийом даних систем позиціонування GPS, Galileo, BeiDou, QZSS та SBAS.

За даними виробника плата розроблення на базі SOC із керамічною антеною і високопродуктивним багаторежимним супутниковим навігаційним приймачем BDS/GNSS. Основна мікросхема – приймач супутникового позиціонування AT6558R, що призначено для побудови автономних систем.

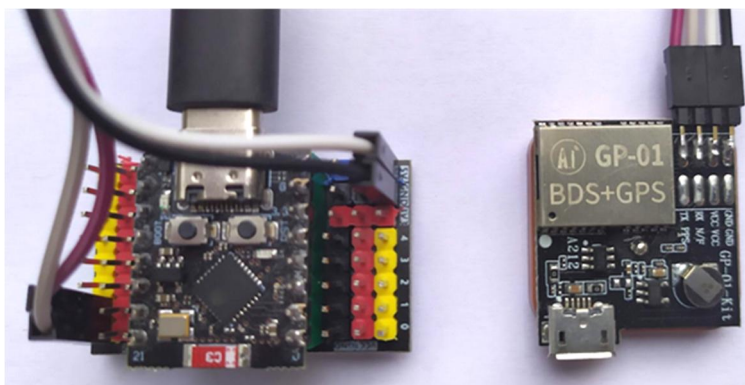


Рис. 9. Модуль GPS GP-01-Kit з мікроконтролером ESP32 C3

У модуль вбудовані радіочастотний інтерфейс, цифровий процесор основної смуги частот, 32-розрядний процесор RISC, управління живленням і функції виявлення і захисту активної антени. Дані на вихід передаються відповідно до протоколів NMEA-0183. Частота вимірювання координат становить 1 Гц-10 Гц. Обмін даними здійснюється через UART. Модулі мають вбудовану пам'ять EEPROM для збереження даних після вимкнення живлення та забезпечення швидкого старту системи.

Модуль видає на вбудований UART потік даних по протоколу NMEA-0183, однак для позиціонування МРП необхідні тільки дані про геопросторові координати. Для їхнього отримання з потоку використовується додатковий мікроконтролер ESP32 С3, який виділяє з цього потоку NMEA теги позиціонування \$GPGGA і видає на вихід їхнє значення.

Розроблене спеціалізоване ПЗ зчитує потік даних послідовно з обраного файлу, в якому надходять дані про позиціонування відповідно до протоколу NMEA-0183. У потоці даних NMEA виділяються дані геопозиціонування по тегах \$GPGGA (або альтернативних) (рис. 10).



Рис. 10. Декодування координат геопозиціонування

Такий парсинг потоку, крім отримання біжучих координат РТП, які надходять з періодичністю 1 с, додатково декодує параметри висоти, швидкості, азимуту (рис. 11).

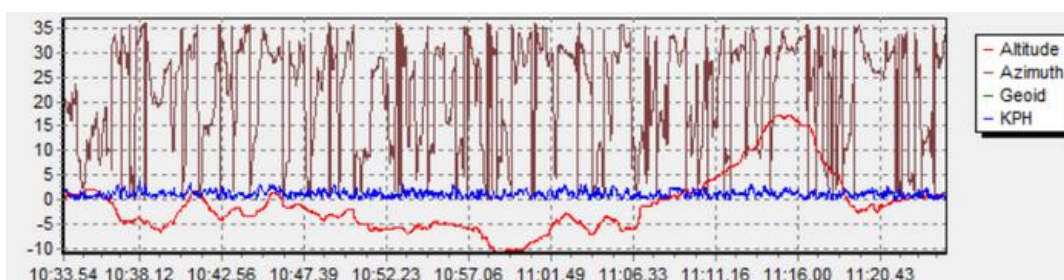


Рис. 11. Декодування параметри висоти, швидкості, азимуту

ПЗ дає змогу формувати масиви даних геопозиціонування у форматі CSV для подальшого аналізу, опрацювання та файлів у форматі KML для забезпечення візуалізації у програмі Google Earth (рис. 12).



Рис. 12. Візуалізація отриманих з модуля GP-01-Kit координат у статичній точці (МРП не переміщується)

Отримані дані геопозиціонування передаються на керуючий мікрокомп'ютер МРП для відпрацювання маршруту.

4. Засоби планування маршруту руху МРП

Засоби планування маршруту призначені для визначення геопросторових координат руху МРП (або групи МРП) відповідно до завдання. Значне поширення геоінформаційних систем із картографічними даними, та що більш важливо для цього застосування, – супутникових даних із широким охопленням територій зацікавленості, очевидним чином спонукає до їхнього використання для реалізації згаданого завдання. Геопросторові дані, як-от Google Maps, мають широкий спектр застосувань у різних галузях: навігація та логістика, зокрема пошук оптимальних маршрутів, аналіз та планування дорожньої мережі, моніторинг стану навколишнього середовища, пошук закладів та установ, координація дій під час надзвичайних ситуацій, моніторинг та запобігання катастрофам, просторовий аналіз для археології, біології, геології. Геопросторові дані надають потужні інструменти для аналізу та візуалізації інформації, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень у різних сферах діяльності.

У зв'язку з такими перевагами під час реалізації вказаного завдання доцільно використати наявні засоби і системи для реалізації задач планування маршруту руху МРП або групи. У такому разі одним із популярних і широко використовуваних рішень є застосування програмних засобів Mission Planner. Екосистема пристроїв ArduPilot передбачає відповідне програмне забезпечення для безпілотних літальних апаратів (ArduPlane, ArduCopter), підводних транспортних засобів (ArduSub) та наземних засобів ArduRover. Ця платформа надає широкий набір інструментів для розробників, а програмне забезпечення призначене для планування та управління місіями як безпілотних літальних апаратів, так і наземних апаратів типу ArduRover. ArduRover – програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, яке є частиною проєкту ArduPilot і призначене для автономного управління наземними транспортними засобами: роботи з гусеничним ходом, колісні роботи та платформи (МРП) та інші наземні транспортні засоби.

Система забезпечує планування маршрутів та автономне пересування за заданими шляховими точками (waypoints). Можливе виконання попередньо визначених завдань під час руху, як-от: зупинка, поворот, зміна швидкості.

Для забезпечення навігації та позиціонування використовуються GPS модулі для точного визначення місця розташування, та сенсори для навігації, як-от: компас, одометричні сенсори, IMU (інерційні вимірювальні блоки). Також можлива інтеграція з різними сенсорами, типу LIDAR, ультразвукові сенсори. Можливе під'єднання додаткових пристроїв для розширення функціональності – маніпулятори, механічні захвати. За допомогою програмного забезпечення можливе відстеження та моніторинг стану МРП в режимі реального часу та реалізується дистанційне керування за допомогою радіоапаратури або через інтернет-з'єднання.

Серед основних можливостей ПЗ Mission Planner є створення та правлення шляхових точок (waypoints) для автоматичних місій та налаштування різних типів завдань на кожній точці маршруту (наприклад, зміна висоти, фотографування, запуск або зупинка відеозапису). Забезпечується відстеження місцезнаходження на карті в режимі реального часу, моніторинг телеметричних даних типу швидкість, висота, стан батареї тощо. Забезпечується інтеграція з іншими пристроями та додатками, а саме, під'єднання до різних давачів, підтримка комунікаційних модулів для передавання даних.

Для визначення маршруту руху МРП у Mission Planner (рис. 13) необхідно виконати певні кроки.

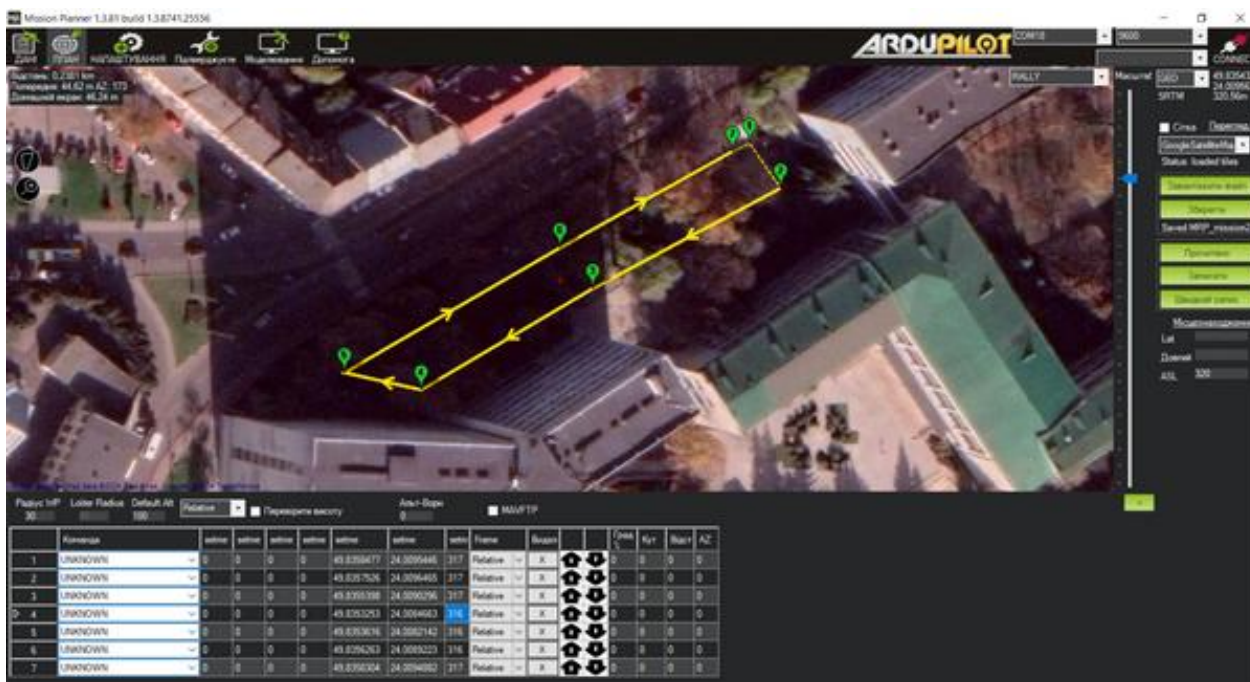


Рис. 13. Визначення маршруту руху МРП у Mission Planner

На вкладці “Flight Plan” виконати встановлення шляхових точок (Waypoints), для чого клацнути правою кнопкою миші на карті. Для кожної точкової позиції Waypoint з’явиться діалогове вікно з параметрами цієї точки. Для визначення маршруту руху МРП у Mission Planner необхідно встановити всі шляхові точки маршруту, послідовно клацаючи правою кнопкою мишки на потрібних місцях на карті. Після додавання кожної шляхової точки, з’явиться діалогове вікно, де можна вказати висоту, швидкість та інші параметри для кожної точки. Можна додавати інші типи команд, як-от: затримка (Delay), виконання певних дій (наприклад, увімкнення / вимкнення камери), зупинка (Stop) тощо.

Шляхові точки можна редагувати, переміщуючи їх на карті або змінюючи параметри в діалогових вікнах. Маршрут зберігається на комп’ютері та його можна завантажити пізніше, використовуючи кнопки “Save WP File” та “Load WP File”.

Використання ArduRover передбачає виконання послідовних кроків – від підготовки апаратного забезпечення до встановлення та налаштування програмного забезпечення. На МРП слід додати польотний контролер типу Pixhawk, APM, GPS модуль, модуль живлення, додаткові сенсори, модулі телеметрії та бездротового зв’язку.

5. Метод нейронечіткого управління рухом групи наземних МРП

Нейронечітке управління рухом групи наземних МРП передбачає, що окремі МРП мають засоби автономного нейронечіткого управління рухом. Для керування рухом автономних мобільних засобів широко використовуються системи управління на основі нечіткої логіки (fuzzy logic). Перевагою таких систем управління є можливість функціонування в умовах змінного оточуючого середовища, коли неможливо наперед передбачити всі можливі стани, а отже і наперед визначити всі сигнали керування. Нечітка логіка пропонує обмежитися певною обмеженою кількістю правил – бази знань у вигляді продукційних правил. Це однак вимагає виконання додаткових операцій: фазифікації вхідних даних, для перетворення їх у нечіткі змінні, формування нечітких висновків з використанням розробленої бази знань та перетворення цих нечітких висновків у процесі дефазифікації.

фікації у чіткі вихідні величини для забезпечення керування, наприклад, електричними приводами МРП. Проте у системах з нечіткою логікою процес дефазифікації є джерелом похибок саме через неоднозначність перетворення нечіткої величини у вихідну кількісну (чітку) величину. Реалізація етапу дефазифікації з використанням нейронних або нейроподібних мереж – нейронечіткого управління, дає змогу реалізувати таке перетворення з мінімальною похибкою.

Вказану нейромережеву дефазифікацію доцільно реалізувати з використанням нейроподібних мереж на основі парадигми “Модель послідовних геометричних перетворень” [29]. В її основі знаходиться неітераційний підхід до тренування нейроподібної мережі, шляхом прямого обчислення всіх вагових коефіцієнтів із використанням ортогоналізації Грама-Шмідта. Основними перевагами використання нейроподібних мереж на основі парадигми МПГП є висока швидкість навчання та функціонування; відтворюваність результатів; можливість оперування як малими, так і об’ємними вибірками. Усе це дає змогу реалізувати нейроподібну мережу обмеженими апаратними засобами вбудованих систем та застосовувати для цього FPGA [30].

Основними етапами методу нейронечіткого управління рухом групи наземних МРП є: планування маршруту для кожної МРП, локалізація кожної МРП, планування траєкторії руху для кожної МРП, нейронечітке управління рухом кожної МРП, моніторинг оточуючого середовища та корекція траєкторії з метою об’їзду перешкод та уникнення зіткнень між МРП.

На етапі планування визначається маршрут, який має пройти кожна МРП. Цей етап передбачає вибір точки старту і фінішу, а також усі проміжні точки, які МРП повинні проїхати. Під час планування маршруту МРП враховуються перешкоди та зони забороненого доступу.

Етап локалізації передбачає визначення поточного місцезнаходження МРП. Для цього використовуються різні технології, як-от: GPS, інтелектуальні давачі перешкод, комп’ютерний зір тощо.

На етапі планування траєкторії на основі інформації про маршрут і поточне місцезнаходження МРП розраховується траєкторія руху для кожної МРП, обирають оптимальні шляхи об’їзду перешкод та руху до цілі.

Етап нейронечіткого управління рухом МРП передбачає виконання таких операцій:

- збір, опрацювання та фазифікація даних із навігаційних давачів;
- обмін навігаційними даними з сусідніми МРП;
- створення баз правил для об’їзду перешкод, запобіганню зіткнень між МРП, управління швидкістю та руху до цілі;
- формування нечіткого виведення, яке ґрунтується на базі правил і виконується шляхом агрегування, активації та акумулювання;
- нейромережева дефазифікація на основі моделі послідовних геометричних перетворень, яка використовує результати акумуляції всіх вихідних лінгвістичних змінних для отримання кількісних значень кожної з вихідних змінних, які використовуються для управління швидкістю, напрямком та іншими параметрами руху МРП.

Етап моніторингу та корекції передбачає:

- постійний моніторинг руху МРП;
- виявлення перешкод і непередбачуваних ситуацій у зовнішньому оточенні МРП;
- коригування траєкторії для забезпечення безпеки руху та уникнення аварій.

Отже, в разі нейронечіткого управління рухом групи наземних МРП, кожна МРП використовує нейронечітке управління швидкістю та напрямком руху для забезпечення переміщення з початкової точки до визначеної кінцевої точки з урахуванням необхідності об’їзду перешкод на шляху такого руху. Суть нейронечіткого управління рухом групи наземних МРП зводиться до пошуку та реалізації таких дій для кожної МРП, які забезпечать їм рух від початкової позиції в

кінцеву за мінімальний час. Для реалізації такого управління необхідна розроблення алгоритмів та стратегій, які забезпечують процеси координації, дозволяють сусіднім МРП спілкуватися та співпрацювати між собою. Вказана співпраця передбачає обмін інформацією, взаємодію, планування маршрутів і уникнення зіткнень.

Висновки

Визначено, що для синтезу системи нейронечіткого управління рухом окремої МРП у групі необхідно мати такі базові апаратно-програмні компоненти: збору та попереднього опрацювання даних із навігаційних давачів; виявлення перешкод; бездротового зв'язку з безконфліктним обміном даними між МРП у групі; бази даних; контролери нечіткої логіки з нейроподібною дефазифікацією; обчислення таблиць макрочасткових добутоків для таблично-алгоритмічної реалізації нейромережових компонентів; планування маршруту руху МРП.

Показано, що для забезпечення гібридного управління групою МРП кожна система нейронечіткого управління рухом окремою МРП повинна мати засоби приймання команд зі спільного пункту управління, а за відсутності такого зв'язку – засоби автономного нейронечіткого управління МРП у групі.

Обрано для реалізації системи нейронечіткого управління рухом окремої МРП таку елементну базу: мікрокомп'ютер Raspberry Pi; мікроконтролери STM8S003F3 та ESP32C3; гіроскоп MPU-6050; цифровий компас QMC5883L; лідар YDLidar X4; трансивер Si4463; GPS-модуль GP-01-Kit.

Розроблено на базі мікроконтролера STM8S003F3 апаратно-програмні засоби збору даних із навігаційних давачів (MPU-6050, QMC5883L), які завдяки їхньому попередньому опрацюванню підвищують точність визначення напрямку та орієнтації в просторі МРП.

Запропоновано реалізацію інтелектуальних компонент МРП здійснювати на базі проблемно-орієнтованого підходу, який через поєднання універсальних (програмних) і спеціалізованих (апаратних) засобів забезпечує високі техніко-експлуатаційні характеристики (енергоспоживання, габаритів і ваги) і роботу в реальному часі.

Проаналізовано та обрано варіант реалізації засобів планування маршруту руху МРП із використанням середовища ArduPilot, що забезпечує процес створення ключових точок маршруту, та інтерфейс з МРП на основі засобів ArduRover.

Розроблено метод нейронечіткого управління рухом групи МРП, який завдяки використанню кожною МРП засобів фазифікації навігаційних даних про стан наколишнього середовища, розроблених баз правил, результатів нечіткого виведення та нейромережового дефазифікатора, забезпечує управління групою МРП у режимі реального часу з підвищеною точністю.

REFERENCES

1. Cortes, J., Egerstedt, M. (2017). Coordinated Control of Multi-Robot Systems: A Survey. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 10(6), 495–503. <https://doi.org/10.9746/jcmsi.10.495>
2. Ballotta, L., Talak, R. (2024). *Safe Distributed Control of Multi-Robot Systems with Communication Delays*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.09382>
3. Dong, Y., Li, Z., Zhao, X., Ding, Z., Huang, X. (2023). *Decentralised and cooperative control of multi-robot systems through distributed optimisation*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01728>
4. Ibrahim, A., Alexander, R., Shahid, M., Sanghar, U., Dsouza, R., Souza, D. (2016). Control Systems in Robotics: A Review. *International Journal of Engineering Inventions*, 5, 2278–7461

5. Osadchy, S. I., Zozulya, V. A., Ladanyuk, A. P., et al. (2019). Optimal Robust Control of a Robots Group. *Automatic Control and Computer Sciences*, 53, 298–309. <https://doi.org/10.3103/S0146411619040084>
6. Petrenko, D. V., & Protasov, A. G. (2024). Overview of Modern Technologies for Increasing the Autonomy of Mobile Wheeled Robots. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2, 122–128. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/17>
7. Mohaghegh, M., et al. (2023). Optimal predictive neuro-navigator design for mobile robot navigation with moving obstacles. *Frontiers in Robotics and AI*, 10. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1226028>
8. Jiang, C., Huang, X., Guo, Y. (2023). End-to-end decentralized formation control using a graph neural network-based learning method. *Frontiers in Robotics and AI*, 10, 1285412. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1285412>
9. Blumenkamp, J., Morad, S. D., Gielis, J., Li, Q., Prorok, A. (2021). A Framework for Real-World Multi-Robot Systems Running Decentralized GNN-Based Policies. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 8772–8778. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.01777>
10. Omrane, H., Masmoudi, M., Masmoudi, M. (2016). Fuzzy Logic Based Control for Autonomous Mobile Robot Navigation. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/9548482>
11. Wang, L., Chen, M., Li, G., Fan, Y. (2016). Data-Based Control for Humanoid Robots Using Support Vector Regression, Fuzzy Logic, and Cubature Kalman Filter. *Mathematical Problems in Engineering*. Article ID 1984634. <https://doi.org/10.1155/2016/1984634>
12. Lillian, M., et al. (2021). Navigational Behavior of Humans and Deep Reinforcement Learning Agents. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.725932>
13. Carli, R., Cavone, G., Epicoco, N., Di Ferdinando, M., Scarabaggio, P., Dotoli, M. (2020). Consensus-Based Algorithms for Controlling Swarms of Unmanned Aerial Vehicles. In: Grieco, L.A., Boggia, G., Piro, G., Jararweh, Y., Campolo, C. (Eds). *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks. ADHOC-NOW 2020. Lecture Notes in Computer Science*, 12338. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61746-2_7
14. Kotani, K., Namerikawa, T. (2019). Cooperative Transport of Quad-rotor by Consensus Algorithm. *12th Asian Control Conference (ASCC)*, 1364–1369.
15. Sell, R., Våljaots, E., Pataraiia, T., & Malayjerdi, E. (2019). Modular Smart Control System Architecture for the Mobile Robot Platform. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 68, 395. <https://doi.org/10.3176/proc.2019.4.08>
16. Tzafestas, S. G. (2018). Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 91, 35–58. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0805-9>
17. Razaq, Z., Brahimi, N., Rehman, H., Khan, Z. (2024). Intelligent Control System for Brain-Controlled Mobile Robot Using Self-Learning Neuro-Fuzzy Approach. *Sensors*, 24. <https://doi.org/10.3390/s24185875>
18. Samadi, M., Jond, H. (2021). An Intelligent Approach for Autonomous Mobile Robots Path Planning Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.05.005>
19. Stingu, P. E., Lewis, F. L. (2009). Neuro-fuzzy Control of Autonomous Robotics. In: Meyers, R. (Eds). *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_357
20. Hasibuan, A., Nasution, T., Azis, P. (2023). MPU-6050 Wheeled Robot Controlled Hand Gesture Using L298N Driver Based on Arduino. *Journal of Physics: Conference Series*, 2421. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012022>
21. Ammar, A., Yusril, M., Broto, P. (2023). Prototype of Automatic Tractor Control Navigation System Using ESP 32 Microcontroller. *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, 6, 20–29. <https://doi.org/10.15408/fiziya.v6i1.31593>
22. Park, G., Chung, W. (2024). Uncertainty-aware LiDAR-based Localization for Outdoor Mobile Robots. *Journal of Field Robotics*. <https://doi.org/10.1002/rob.22392>
23. Yousuf, S., Kadri, M. B. (2021). Information Fusion of GPS, INS and Odometer Sensors for Improving Localization Accuracy of Mobile Robots in Indoor and Outdoor Applications. *Robotica*, 39(2), 250-276. <https://doi.org/10.1017/S0263574720000351>

24. Yang, L., Li, P., Qian, S., Quan, H., Miao, J., Liu, M., Hu, Y., Memetimin, E. (2023). Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review. *Machines*, 11, 980. <https://doi.org/10.3390/machines11100980>
25. Agung, F., Herizon, H., Madona, E., Rohfadli, M., Ja'far, J. (2023). Implementation of LiDAR Sensor for Mobile Robot Delivery Based on Robot Operating System. *JECOM: International Journal of Electronics Engineering and Applied Science*, 1(2), 67–79. <https://doi.org/10.30630/jecom.1.2.67-79.2023>
26. Chen, C.-H., Wang, C.-C., Wang, Y. T., Wang, P. T. (2017). Fuzzy Logic Controller Design for Intelligent Robots. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, Article ID 8984713, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/8984713>
27. Hentout, A., Maoudj, A. Aouache, M. A (2022) review of the literature on fuzzy-logic approaches for collision-free path planning of manipulator robots. *Artif Intell Rev*, 56, 3369–3444. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10257-7>
28. Li, Y., Song, G., Yip, T. L., Yeo, G. T. (2024). Fuzzy Logic-Based Decision-Making Method for Ultra-Large Ship Berthing Using Pilotage Data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5), 717. <https://doi.org/10.3390/jmse12050717>
29. Tkachenko, R., Izonin, I. (2018). Model and Principles for the Implementation of Neural-Like Structures Based on Geometric Data Transformations. In Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He (Eds), *Advances in Computer Science for Engineering and Education. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 754, 578–587. Cham: Springer.
30. Teslyuk V., Tsmots I., Tkachenko R., Tkachenko P., Rabyk V., Opotyak Y., Oliinyk O. (2024, April 12–13). Implementation of neuro-like network defuzzifier for mobile platform motion control system. *CEUR Workshop Proceedings, 3664: Proceedings of the 8th International conference on computational linguistics and intelligent systems*, I: Machine learning workshop, 215–231. <https://ceur-ws.org/Vol-3664/paper16.pdf>

BASE COMPONENTS OF THE NEURO-FUZZY CONTROL SYSTEM FOR A GROUP OF MOBILE ROBOTIC PLATFORMS

Ivan Tsmots¹, Yurii Opotyak², Oleksandr Oliinyk³, Volodymyr Antoniv⁴, Andrii Lytvyn⁵

¹⁻⁴Lviv Polytechnic National University,
Department of Automated Control Systemst, Lviv, Ukraine

⁵Lviv Polytechnic National University,
Department of Publishing Information Technologist, Lviv, Ukraine

¹E-mail: ivan.h.tsmots@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4033-8618

²E-mail: yurii.v.opotyak@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-9889-4177

³E-mail: oleksandr.o.oliiynyk@lpnu.ua, ORCID: 0009-0000-5093-7334

⁴E-mail: volodymyr.y.antoniv@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4544-4612

⁵E-mail: andriylytvyn123@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4993-7132

© Tsmots I., Opotyak Yu., Oliinyk O., Antoniv V., Lytvyn A., 2024

Coordinating the movement of mobile robotic platforms (MRPs) in dynamic environments is a significant challenge in both civil and military applications, where large-scale transport, exploration, and task distribution are required. This research presents a neuro-fuzzy control system that integrates fuzzy logic with real-time navigation to optimize group movement. The system's key components include data acquisition from navigation sensors such as gyroscopes, digital compasses, and lidars, along with wireless communication modules to facilitate seamless interaction and coordination among MRPs. A fuzzy logic controller, enhanced by neuro-like defuzzification, improves decision-making precision and platform synchronization. Additionally, the system incorporates advanced route planning algorithms to effectively manage group navigation, even in unpredictable and rapidly changing environ-

ments. The practical implementation is based on embedded platforms, including Raspberry Pi and microcontrollers such as STM8S003F3 and ESP32C3, which process data from sensors like the MPU-6050 gyroscope, QMC5883L compass, and YDLidar X4 lidar. This architecture was experimentally validated across real-world scenarios, demonstrating significant improvements in movement coordination, reduced response time, and enhanced operational efficiency. The system supports parallel processing and real-time optimization, making it suitable for tasks that require rapid adaptation to changing conditions. Furthermore, its scalability and flexibility make it an effective solution for real-world applications in environments that demand precise group control. The results underscore the practical value of this approach, reducing both development time and costs while improving the overall performance of MRP systems in complex operational settings. The developed neuro-fuzzy system provides a robust and scalable platform for efficient group management, making it well-suited for a wide range of dynamic, real-time applications.

Keywords: group control; mobile robotic platforms; hybrid control; neuro-fuzzy control.