

**SECTION 2. AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES AND
ROBOTICS**

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.3.2.1

2.1 Розробка методу дистанційного керування мобільним роботом за допомогою жестів

В даний час застосування мобільних наземних роботів охоплює цілий спектр областей від спостереження, пошуку та порятунку, розвідки, сільського господарства, військової справи та ін. У неструктурованих і небезпечних середовищах, таких як місце катастрофи, військові поля або хімічний спрей на сільськогосподарських фермах, досвід і інтелект оператора необхідні для прийняття складних рішень, що виходять за рамки автономності робота. У таких випадках дистанційна робота дозволяє оператору керувати роботом у досягненні складного завдання з безпечного місця. Ефективність, з якою оператор керує роботом, залежить, серед іншого, від обізнаності оператора про навколишнє середовище робота, якості каналу зв'язку, надійності системи керування роботом та досвіду людини-оператора. Наземні мобільні роботи складають основу цієї роботи, оскільки вони застосовні в багатьох сферах і в основному працюють у динамічних середовищах, які потребують додаткового керівництва з боку людини-оператора.

Застосування автономних мобільних роботів (АМР) – інноваційний спосіб підвищення ефективності транспортних операцій. На виробництві використання АМР обумовлює підвищення продуктивності праці за рахунок скорочення часу простою обладнання та усуненню помилок позиціювання об'єктів. Для сільськогосподарських підприємств мобільні роботи можна використовувати для інспекції полів (аналіз характеристик ґрунту, наявності шкідників, кількості та якості сходів та врожаю і т. п.) та обслуговування пташиних й тваринницьких комплексів. Широко застосовуються АМР для різноманітних проєктів для маломобільних людей: «робот-помічник», безпілотна кур'єрська доставка, інтелектуальні інвалідні візки, робота у медичних закладах під час пандемій.

Розвиток технологій дозволяє запровадити АМР для здійснення місій в екстремальних умовах (гасіння пожеж, роботи в зонах хімічного та радіоактивного забруднення, інспекція пошкоджених споруд, логістика в бойових умовах, саперні та інженерні роботи, евакуація поранених, вогнева підтримка і т. п.).

Розширення області застосування АМР обумовлює наявність у складі конструкції навісного обладнання (маніпулятор, ківш, бур, тощо). Виконання технологічних операцій вимагає узгодження руху мобільного робота вздовж траєкторії з переміщенням навісного обладнання відносно платформи. При використанні пристроїв керування у вигляді джойстика або пульта виникають складнощі в одночасному формуванні команд для шасі та навісного обладнання. У сучасних розробках керування багатозв'язними системами здійснюється по сепаратним каналам з використанням корегувальних пристроїв для відокремлення каналів. Для конструкцій АМР з навісним обладнанням перехресний нестационарний зв'язок каналів обумовлено динамічними особливостями об'єкту керування. Нестационарність зв'язку ускладнює визначення поточного корегувального пристрою, ускладнює конструкцію та призводить до запізнення команд.

Для здійснення місій в екстремальних умовах зазвичай застосовуються наземні мобільні роботи під дистанційним керуванням оператора в режимі «он-лайн». При цьому доцільно застосувати пристрій керування у вигляді двох рукавичок: ліва для керування шасі, а права для керування навісним обладнанням. Для впровадження таких пристроїв керування потрібно розробити систему команд керування у вигляді жестів. Однак, сучасні програмні та апаратні засоби дозволяють перерозподіл функцій між оператором та системою керування зі збільшенням автономності мобільних роботів. Для реалізації методу керування потрібно розробити: пристрій керування, інформаційну систему, систему команд, програмне забезпечення, канали зв'язку та засоби захисту інформації.

Результати такого дослідження можуть бути впроваджені у різноманітні

сфери життя: медицина, виробництво, сільське господарство, логістика, подолання наслідків природних та техногенних катастроф. Тому дослідження, присвячені розробці методів керування мобільним роботом за допомогою жестів, є актуальними.

Постановка проблеми. У світі з швидко зростаючим рівнем автоматизації робототехніка відіграє все більш важливу роль у кожному аспекті людської діяльності. Відомі приклади повністю автономних мобільних роботизованих платформ, які можуть виконувати складні завдання без прямого керівництва з боку людини-оператора. Наприклад, в роботі [62] наведено методи управління мобільним роботом, який складається з мобільної платформи та роботизованої руки. Маніпулятор на рухливій основі співпрацює з робітником при спільному виконанні технологічних операцій. На основі кінематичного аналізу розроблено алгоритми для забезпечення в реальному часі небезпечної взаємодії робота та працівника. На основі взаємної проекції відносної швидкості людини і робота та їх спільного нормального вектору обчислюється загрозливий індекс для вибору найбільш вразливих частин тіла людини. Цей індекс розраховується для декількох можливих приростів швидкостей та прискорень. За допомогою системи штучного інтелекту система може адаптуватися до кінематичних параметрів працівника і «передбачати» подальші координати, швидкості та прискорення частин його тіла. Зазначено, що запропоновані методи керування на основі загрозливого індексу покращують ефективність безпечного співіснування людини та мобільного робота для змодельованого сценарію. Але залишилось не визначеним питання наскільки ефективним буде запропонований метод при дистанційному керуванні мобільним роботом. Яким чином здійснюється одночасне керування шасі та маніпулятором мобільного робота? Чи забезпечено захист каналу зв'язку при передачі команд? Який час автономної роботи мобільного робота? Визначені алгоритми для забезпечення в реальному часі небезпечної взаємодії робота та працівника доцільно застосовувати, але формування та передача команд потребують доопрацювання.

Застосування штучного інтелекту для керування мобільним роботом в

апріорно не визначеному робочому просторі, або в екстремальних умовах також є дискусійним. Слід зазначити, що в реальності переконливі результати застосування штучного інтелекту та машинного навчання в робототехніці досягнуто для місій в структурованому середовищі, без апріорної невизначеності та з вузько обмеженими контекстами. При використанні АМР в екстремальних умовах оператор приймає участь в контурі керування при реалізації функцій «відчувати», «планувати» та «діяти». Але достовірність інформації з датчиків, захист інформації та швидкість передачі команд впливають на прийняття рішення оператором. Таким чином, ефективність застосуванні АМР залежить не лише від кваліфікації оператора але й від технічної реалізації процесу керування. Можливості використання АМР значно розширюються завдяки бездротовому дистанційному керуванню.

В роботі [63] наведено результати досліджень бездротового дистанційного керування будівельного робота, який працює в небезпечних для людини умовах. Система дистанційного керування складається з центру керування, об'єкту керування – мобільного робота і інтерфейсу – дисплейного терміналу. Показано, що запропонована система надає відео у режимі «реального часу» та забезпечує точність керування роботом. Але залишилися невирішені питання, пов'язані з одночасним керуванням шасі та маніпулятором. Яким чином формуються команди на шасі та маніпулятор? Чи передбачено захист каналу зв'язку від зовнішніх збурень? За яким принципом створено зворотний зв'язок від маніпулятора до оператора при взаємодії з навколишнім середовищем? При контакті робочого органу маніпулятора з елементами робочого простору оператор має не лише зафіксувати момент взаємодії, але й «відчути» тривалість, силу, напрямок та площу контакту. Причиною контакту може стати не лише нестабільність робочого простору але й похибки в приводах та кінематичних парах маніпулятора. Для подолання таких труднощів слід застосовувати білатеральне керування. Запропонована система дистанційного керування потребує доопрацювання захисту каналів зв'язку та впровадження білатерального керування.

В роботі [64] наведено результати досліджень застосування рукавички для дистанційного білатерального керування маніпулятором. Але для функціонування АМР з маніпулятором в робочому середовищі з екстремальними умовами необхідно передбачити захист від спотворення команд керування. Розповсюдження запропонованого методу керування для шасі, дозволить застосувати пристрій керування у вигляді двох рукавичок: ліва для керування шасі, а права для керування навісним обладнанням.

В роботі [65] силовий зворотній зв'язок використовується не лише для інформування про контакт маніпулятора із зовнішнім середовищем, але й для підтримки рішень оператора. Але автори зазначають, що сила взаємодії та віртуальна сила наведення не можуть бути роз'єднані. Це ускладнює роботу оператора та обумовлює похибки позиціонування схвату.

В роботі [66] проведено аналіз декількох інтерфейсів для телекерування мобільним роботом. Зворотний зв'язок по силі реалізовано на основі інформації про дальність перешкод та поточний стан робота. Але залишилися не визначеними питання, щодо врахування характеристик об'єкту маніпуляцій у запропонованих методах керування. При роботах в екстремальних умовах маніпулятор повинен здійснювати технологічні операції з крихкими або вибухонебезпечними об'єктами.

В [67] наведено огляд робіт в галузі телеопераційних систем мобільних роботів з акцентом на архітектуру, канали зв'язку та засоби створення обізнаності оператора про ситуацію у робочій зоні. Зазначено, що використання якісної мережі та засобів візуального та силового зворотного зв'язку значно підвищують ефективність навігації та виконання завдань мобільними наземними роботами. Але навіть при створенні відчуття присутності оператора в середовищі робота залишилися невирішені питання, пов'язані з надійністю такої системи за умов збурень та спотворення сигналу. Причиною похибок можуть бути як зовнішні збурення так і перехресний вплив між каналами керування. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути захист інформації, сепарація каналів керування або дублювання при передачі команд.

При сепарації каналів керування можна окремо розглянути завдання керування мобільною платформою та керування маніпулятором на рухливій основі. В роботі [68] аналізуються, класифікуються та узагальнюються існуючі методи дистанційного керування мобільних роботів. Зазначено, що сучасні роботизовані транспортні засоби працюють в структурованому середовищі з високим рівнем автономності. Якщо місія має виконуватись в наперед не визначених чи екстремальних умовах, або складність завдання занадто велика доцільно застосовувати дистанційні методи керування. Але залишаються питання пов'язані з вибором пристрою керування та каналом зв'язку. Варіантом пристрою керування може бути звичайний смартфон.

У [69] досліджено дистанційне керування мобільним роботом із застосуванням різних пристроїв: смартфон, гарнітура віртуальної реальності та комп'ютер. Аналіз якості дистанційного керування здійснювався за чотирьома показниками: складність завдання, час виконання, успішність і кількість помилок. Всі ці параметри було об'єднано в єдину метрику користувача (SUM). Результати SUM для пристроїв становлять: на смартфонах – 54,9%, на пристроях віртуальної реальності – 79,5% і на комп'ютерах – 90,4%. Таким чином, на ефективність АМР впливає інтерфейс та конструкція пристрою керування. Однак, не з'ясовано вплив захисту інформації та каналів зв'язку.

В роботі [70] наведено результати впровадження керування мобільною платформою. Зв'язок мікроконтролера, датчиків та смартфона (Android) здійснюється за допомогою Bluetooth. Таким чином, з використанням спеціального програмного застосунку смартфон перетворюється на пристрій керування мобільним роботом. Але залишились питання, пов'язані з дальністю покриття Bluetooth, що впливає на межу досяжності мобільного робота.

В статтях [71,72] описуються мобільні роботи, якими дистанційно керують зі смартфона за допомогою застосунку для Android. Передача даних здійснюється за допомогою Wi-Fi з'єднання між смартфоном і роботом. Зв'язок через Wi-Fi дозволяє збільшити дальність дій мобільного робота, але надійність каналу зв'язку буде залежати від зони покриття та наявності зовнішніх збурень.

Для робіт в екстремальних умовах надійність такого каналу зв'язку викликає сумніви.

Аналіз літератури доводить недосконалість існуючих методів дистанційного керування АМР. Проблема полягає в тому, що на ефективність АМР впливають засоби створення обізнаності оператора про ситуацію у робочій зоні, інтерфейс та конструкція пристрою керування. Bluetooth та Wi-Fi зручно використовувати, але виникають питання щодо меж досяжності, зовнішнього втручання та збурень при передачі команд дистанційного керування. Засоби візуального та силового зворотного зв'язку значно підвищують ефективність навігації та виконання завдань АМР з навісним обладнанням. Для розширення застосування АМР з пристроєм керування у вигляді рукавички потрібно розробити систему команд, програмне забезпечення та канал зв'язку для перетворення жестів оператора в маневри шасі.

Мета й задачі дослідження. Метою дослідження є розробка методу дистанційного керування АМР за допомогою пристрою керування «рукавичка». Формування команд здійснюється спеціальними жестами оператора. Передачу команд реалізовано із забезпеченням захисту від похибок та спотворення команд. Це дасть можливість підвищити продуктивність та якість технологічного процесу за участю АМР, забезпечити безпеку людини–оператора та покращити ефективність та живучість мобільних роботів при експлуатації їх в екстремальних умовах.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- розробити метод дистанційного керування мобільного робота за допомогою «рукавички»;
- розробити систему команд для дистанційного керування АМР за допомогою «рукавички».

Матеріали та методи дослідження. Об'єктом дослідження є метод дистанційного керування автономним мобільним роботом змінюваної конфігурації.

Система команд має бути простою та зрозумілою для операторів з

мінімальною підготовкою.

Пристрій керування повинен: мати обмежену масу, достатній ресурс для автономної роботи, декілька каналів зв'язку та забезпечувати інтерпретацію керуючих впливів оператора.

Канал зв'язку для дистанційного керування повинен бути захищеним від зовнішніх збурень та спотворення сигналів.

Об'єктом керування є повнопривідний чотирьохколісний мобільний робот з елементами конструкції, рухомими відносно платформи. При експлуатації АМР ці елементи рухаються відносно платформи, змінюючи геометрію мас системи [73]. Для виконання технологічних операцій мобільний робот оснащено навісним обладнанням: маніпулятор, ківш, бур, антена тощо (рис. 1).

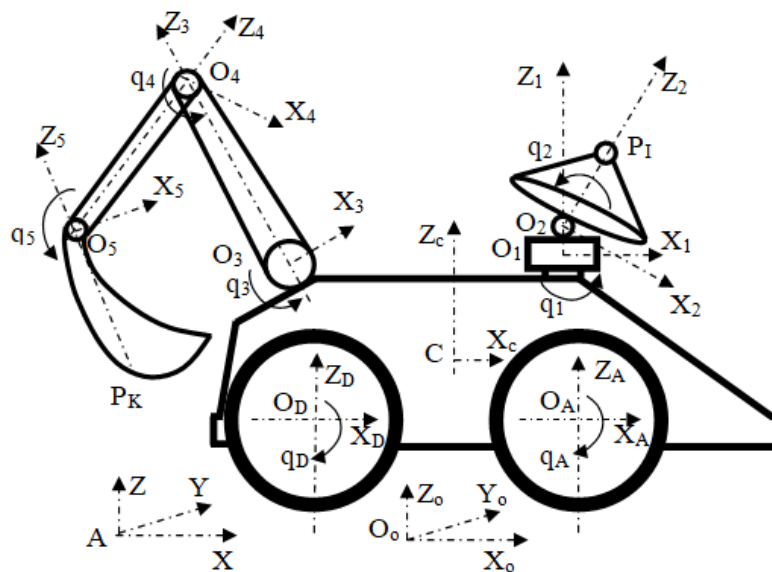


Рисунок 1. Схема конструкції автономного мобільного робота з навісним обладнанням [73]

Конструкція АМР змінюваної конфігурації побудована за агрегатно-модульним принципом, в залежності від завдання навісне обладнання можна замінити. Наявність елементів конструкції, рухливих відносно повнопривідної платформи, обумовлює нестационарність та недиагональність тензору інерції

відносно системи координат зв'язаної з центром мас платформи. Динамічні особливості конструкції обумовлюють нестационарний перехресний зв'язок каналів керування. Сепарація каналів та розробка корегуючих пристроїв для кожного варіанту навісного обладнання ускладнює технічну реалізацію системи керування.

Реалізація дистанційного керування АМР змінюваної конфігурації має два рівні: керування маніпулятором на рухливій основі та керування платформою шасі. Керування маніпулятором на рухливій основі розглянуто в [74], тож розглянемо метод дистанційного бездротового керування повнопривідною платформою.

Для розробки методу керування розглянемо розрахункову модель об'єкту керування – повнопривідну чотирьохколісну платформу АМР без навісного обладнання (рис. 2).

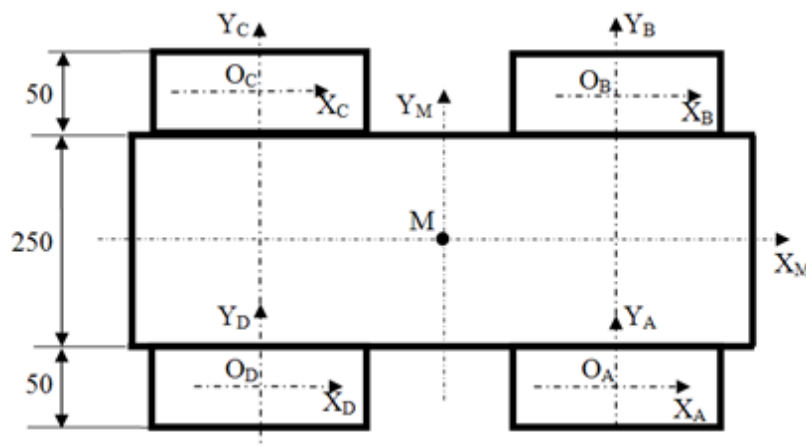


Рисунок. 2. Розрахункова модель платформи автономного мобільного робота [75]

Вважаємо, що керуючі моменти направлені вздовж осей системи координат, зв'язаної з платформою АМР [75]. Платформа має форму паралелепіпеду з рівномірним розподілом мас. Мотор - колеса мають однакові кінематичні та динамічні характеристики. Монтаж мотор-колес виконаний співвісно, без

похибок.

Об'єкт керування – повнопривідне чотирьохколісне шасі мобільного робота. Для опрацювання методу дистанційного керування за допомогою жестів в межах інжинірингової школи ГО «Ноосфера» була створена експериментальна модель мобільного робота з довжиною платформи 30 см. (рис. 3).

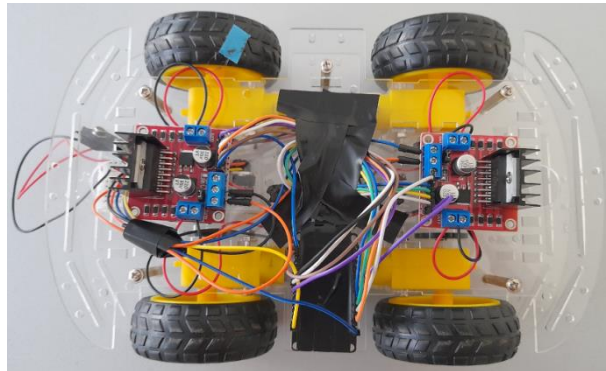


Рисунок. 3. Конструкція експериментальної моделі повнопривідного мобільного робота [Авторська розробка]

Систему керування моделі повнопривідного мобільного робота (рис.4) створено на базі мікроконтролера ESP 32 Devkit v1 [76]. При складанні системи керування повнопривідного чотирьохколісного шасі використано чотири мотор – редуктори з колесами [77]. Ці мотори мають високий коефіцієнт корисної дії, що дозволяє економно використовувати заряд акумулятора.

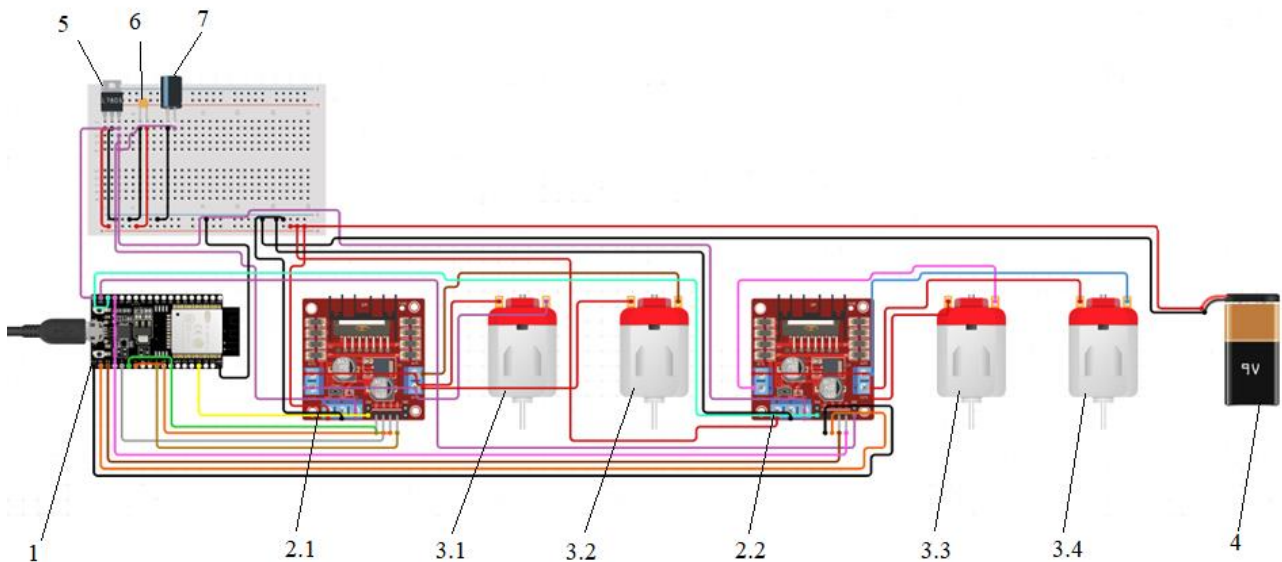


Рисунок 4. Схема системи керування повнопривідного чотирьохколісного шасі: 1 – мікроконтролер ESP 32 Devkit v1; 2.1, 2.2 – драйвер L298N; 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 – мотор – редуктор; 4 – акумулятор «Крона 9V» (6F22); 5 – стабілізатор напруги L7805; 6 – конденсатор Capacitor Ceramic 100nF; 7 – конденсатор Electrolytic Capacitor - 1uF/50V [Авторська розробка]

Драйвер двигунів на базі чипу L298N [78] має два незалежних канали для керування двигунами, що забезпечує незалежне керування двома колесами шасі з чотирьох. Це дозволяє контролювати рухи шасі вперед, назад та повороти.

Для забезпечення характеристик електричних ланцюгів до схеми системи керування додано стабілізатор напруги L7805 [79] та конденсатори. Живлення системи керування шасі забезпечено акумулятором «Крона 9V» (6F22).

Пристрій керування – рукавичка для дистанційного керування автономним мобільним роботом. Рукавичка для дистанційного керування забезпечує взаємодію між оператором та АМР (рис. 5).

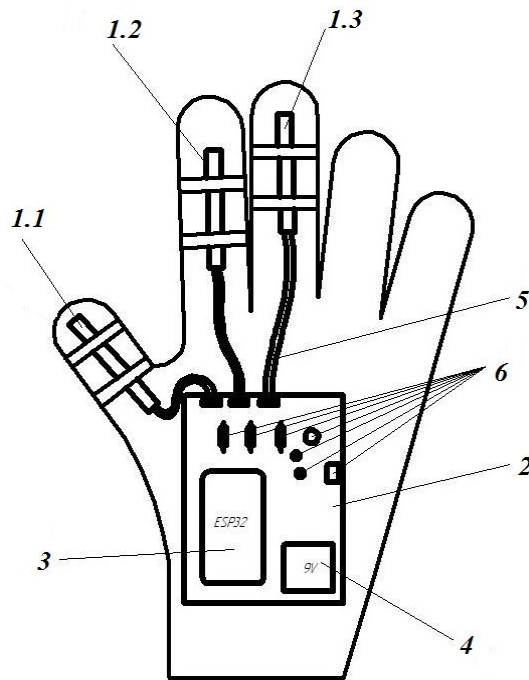


Рисунок 5. Схема пристрою керування «рукавичка»: 1.1, 1.2, 1.3 – датчик вигину (flex sensor 2.2"); 2 – друкована плата; 3 – мікроконтролер ESP32 Devkit v1, 4 – акумулятор «Крона 9V» (6F22); 5 – провідник; 6 – резистори; 7 – конденсатори [Авторська розробка]

Конструкція рукавички передбачає наявність вбудованих датчиків руху. У даній конструкції задіяні три датчики вигину (flex sensor) розміром 2.2", які розташовані на вказівному, середньому та великому пальцях рукавички (рис. 5). Датчик вигину це резистор, у якого величина опору прямо пропорційна куту вигину [80].

Метод дистанційного керування мобільного робота за допомогою «рукавички». Дистанційне керування АМР здійснюється при взаємодії мікроконтролерів об'єкту керування (шасі) та пристрою керування (рукавички).

Мікроконтролер рукавички 3 (рис. 5) виступає в ролі трансмітера. Він отримує сигнали від датчиків вигину 1.1, 1.2 та 1.3 (рис. 5). Мікроконтролер шасі 1 (рис. 4) виконує роль ресивера і отримує сигнал від мікроконтролера рукавички 3 (рис. 5). Бездротова передача сигналу може здійснюватись за трьома незалежними каналами одночасно.

Після отримання команди мікроконтролер шасі передає коди керування на драйвери 2.1 або 2.2 (рис. 5). Драйвер 2.1 містить два незалежних канали для управління мотор-редукторами А і В. Драйвер 2.2 містить два незалежних канали для управління мотор-редукторами С і D. Керована зміна швидкості та напрямку обертання коліс дозволяє забезпечити маневреність АМР.

Активізація керування настає при вигині трьох датчиків одночасно. Для керування напрямком руху АМР задано відповідні жести, утворені вигином трьох пальців:

- вперед – вигин вказівного пальця (зміна опору датчику вигину 1.2),
- назад – вигин середнього пальця (зміна опору датчику вигину 1.3),
- вліво – вигин вказівного і великого пальця (одночасна зміна опору датчиків вигину 1.2 та 1.1),
- вправо – вигин вказівного і середнього пальця (одночасна зміна опору датчиків вигину 1.3 та 1.2).

За умови, що жоден датчик не зігнутий, або комбінація виконана невірно, АМР зупиняється. Платформа не буде рухатись ні в якому напрямку, чекаючи коректної команди руху.

Система команд для дистанційного керування автономним мобільним роботом за допомогою «рукавички».

Рух вперед. Для здійснення руху вперед задіяні: датчик вигину 1.2 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух вперед»: при згинанні датчику вигину 1.2 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.2 подається на gpiol3 мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. Мікроконтролер передавач на основі цього сигналу формує код, який передається на мікроконтролер приймач за допомогою обраного каналу зв'язку Wi-Fi, Bluetooth або радіо. Мікроконтролер приймач, розташований на платформі АМР, здійснює перетворення прийнятого коду у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D. Під час

експериментальних досліджень при русі вперед команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А `int motor1Pin1 = 22; int motor1Pin2 = 12; int enable1Pin = 23;`
- для двигуна В `int motor1Pin1 = 26; int motor1Pin2 = 27; int enable1Pin = 14;`
- для двигуна С `int motor1Pin1 = 25; int motor1Pin2 = 33; int enable1Pin = 32;`
- для двигуна D `int motor1Pin1 = 18; int motor1Pin2 = 19; int enable1Pin = 5.`

При переміщенні АМР вперед датчики вигину 1.1 та 1.3 не зігнуті, значення їхніх вихідних опорів знаходяться в межах 700–900. У відповідних гілках електричного ланцюга зміни опору не виникає. Це означає, що сигнал від датчиків вигину 1.1 та 1.3 не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Рух назад. Для здійснення руху назад задіяні: датчик вигину 1.3 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух назад»: при згинанні датчику вигину 1.3 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.3 подається на `gpio14` мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. Мікроконтролер передавач на основі цього сигналу формує код, який передається на мікроконтролер приймач за допомогою обраного каналу зв'язку. Мікроконтролер приймач, розташований на платформі АМР, здійснює перетворення прийнятого коду у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D.

Під час експериментальних досліджень при русі назад команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А `int motor1Pin1 = 22; int motor1Pin2 = 12; int enable1Pin = 23;`
- для двигуна В `int motor1Pin1 = 25; int motor1Pin2 = 33; int enable1Pin = 32;`
- для двигуна С `int motor1Pin1 = 26; int motor1Pin2 = 27; int enable1Pin = 14;`
- для двигуна D `int motor1Pin1 = 18; int motor1Pin2 = 19; int enable1Pin = 5.`

При переміщенні АМР вперед датчики вигину 1.1 та 1.2 не зігнуті, значення їхніх вихідних опорів знаходяться в межах 700–900. У відповідних гілках електричного ланцюга зміни опору не виникає. Це означає, що сигнал від

датчиків вигину 1.1 та 1.2 не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Рух вправо. Для здійснення руху вперед задіяні: датчики вигину 1.1. та 1.3 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух вправо»: при згинанні датчику вигину 1.3 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.3 подається на gpiol4 мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. При цьому одночасно згинається датчик вигину 1.1. Сигнал від датчику вигину 1.1 подається на gpiol2 мікроконтролера передавача. Мікроконтролер передавача на основі двох вхідних сигналів формує код, який передається на мікроконтролер приймача за допомогою обраного каналу зв'язку. Мікроконтролер приймача, перетворює прийнятий код у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D. Під час експериментальних досліджень при русі вправо команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А int motor1Pin1 = 22; int motor1Pin2 = 12; int enable1Pin = 23;
- для двигуна В int motor1Pin1 = 25; int motor1Pin2 = 33; int enable1Pin = 32;
- для двигуна С int motor1Pin1 = 18; int motor1Pin2 = 19; int enable1Pin = 5;
- для двигуна D int motor1Pin1 = 26; int motor1Pin2 = 27; int enable1Pin = 14.

При переміщенні АМР вправо датчик вигину 1.2 не зігнутий, значення його вихідного опору знаходиться в межах 700–900 і не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Рух вліво. Для здійснення руху вперед задіяні: датчики вигину 1.1. та 1.2 на рукавичці, мікроконтролери передавача та приймача, драйвер 1 для керування двигунами А і В та драйвер 2 для керування двигунами С і D.

Алгоритм для напрямку «рух вліво»: при згинанні датчику вигину 1.1 значення його опору знаходиться в проміжку 0–255. Сигнал від датчику вигину 1.1 подається на gpiol2 мікроконтролера передавача, розташованого на рукавичці. При цьому одночасно згинається датчик вигину 1.2. Сигнал від датчику вигину 1.2 подається на gpiol3 мікроконтролера передавача.

Мікроконтролер передавача на основі двох вхідних сигналів формує код, який передається на мікроконтролер приймача за допомогою обраного каналу зв'язку. Мікроконтролер приймача, перетворює прийнятий код у команди драйвера 1 для керування двигунами А і В та драйвера 2 для керування двигунами С і D. Під час експериментальних досліджень при русі вправо команди від драйверів передавалися на мотор-колеса:

- для двигуна А $\text{int motor1Pin1} = 22; \text{int motor1Pin2} = 12; \text{int enable1Pin} = 23;$
- для двигуна В $\text{int motor1Pin1} = 25; \text{int motor1Pin2} = 33; \text{int enable1Pin} = 32;$
- для двигуна С $\text{int motor1Pin1} = 18; \text{int motor1Pin2} = 19; \text{int enable1Pin} = 5;$
- для двигуна D $\text{int motor1Pin1} = 26; \text{int motor1Pin2} = 27; \text{int enable1Pin} = 14.$

При переміщенні АМР вправо датчик вигину 1.3 не зігнутий, значення його вихідного опору знаходиться в межах 700–900 і не викликає перемикання мікроконтролера приймача.

Під час експериментальних досліджень проводилось 100 спроб для кожного виду траєкторії моделі. Результати дослідження середньої швидкодії моделі АМР наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Середня швидкодія моделі автономного мобільного роботу

Траєкторія		Програмне керування	Дистанційне керування з використанням		
			Канал 1	Канал 2	Канал 3
Лінійна	3 м	4,6 с	4,3 с	5,8 с	4,8 с
	6 м	9,1 с	8,8 с	10,4 с	9,6 с
Кутовий маневр	90°	1,2 с	1,0 с	1,6 с	1,2 с
	180°	1,8 с	1,6 с	2,0 с	1,8 с

Аналіз експериментальних даних доводить, що розроблений метод дистанційного керування забезпечує рухи АМР із заданою швидкістю.

Розробка методу дистанційного керування повнопривідною платформою мобільного робота (рис. 4) базується на застосуванні пристрою керування у вигляді рукавички (рис. 5). На трьох пальцях рукавички закріплено датчики вигину. Ці датчики реагують на рухи рук і жести, змінюючи опір відповідної гілки електричного ланцюга. За програмою зміна опору на вході

мікроконтролера ESP32 передавача (рукавички) перетворюється у код, який за допомогою Wi-Fi або Bluetooth передається до мікроконтролера ESP32 приймача (шасі). Приймач розташований на платформі AMP і у відповідності до отриманого коду формує команди на виконавчі приводи. Таким чином, жестам можна поставити у відповідність команди на приводи мотор-колес.

Електрична схема системи керування (рис. 4) містить стабілізатор напруги та конденсатори для забезпечення керованості та зменшення похибок. Джерелом живлення є акумулятор «Крона 9V» (6F22).

Представлений метод керування дозволяє здійснити просте та інтуїтивне дистанційне управління AMP. Спеціально розроблена система керуючих жестів для реалізації чотирьох напрямків руху AMP. Пристрій керування «рукавичка» дає можливість швидко провести навчання оператора, здійснювати дистанційне керування AMP для роботи у небезпечних для людини умовах або для виконання соціальних проєктів. Розроблений метод дистанційного керування забезпечує руху AMP із заданою швидкістю, продуктивністю та точністю позиціонування.

Перевагами запропонованого методу дистанційного керування є відсутність запізнення між жестами оператора та формуванням команд, наявність простого інтерфейсу та забезпечення захисту інформації, за рахунок дублювання сигналу за трьома каналами зв'язку. Це досягається за рахунок спеціально розробленого пристрою керування та програмного забезпечення.

При роботі в екстремальних умовах на канали дистанційного керування можуть діяти засоби радіо-електронної боротьби, джерела природного або штучного електромагнітного випромінювання і т. п. Для забезпечення ефективної роботи представленого методу керування передбачено передачу команд по трьом незалежним каналам зв'язку. Вибір робочого каналу здійснюється мікроконтролером шасі за спеціально розробленим алгоритмом з метою зменшення похибок та спотворення сигналів.

Недоліком запропонованого методу є те, що оптимальність синтезованої траєкторії руху платформи залежить від обзору робочої зони. Для керування діями робота у режимі реального часу оператору потрібен візуальний контроль

наявних перешкод або карта місцевості.

Для збільшення ефективності запропонованого методу систему керування потрібно доповнити датчиками та системою технічного зору. При таких доопрацюваннях оператор отримує повну інформацію про робочу зону, наявність перешкод та зовнішні впливи. Доповнення системи керування елементами відеоспостереження розширює області застосування АМР та обумовлює доцільність використання запропонованого методу дистанційного керування для роботів, які працюють у шкідливих чи небезпечних для людини умовах.

Висновки

1. Розроблено метод дистанційного керування мобільним роботом за допомогою «рукавички». Запропонований метод реалізує три канали управління АМР для забезпечення захисту від зовнішнього впливу, похибок та спотворення команд. Вибір робочого каналу здійснюється мікроконтролером за спеціально розробленим алгоритмом. При зовнішніх впливах або виявленні перешкод у робочому просторі оператор миттєво реагує та приймає управлінське рішення.

2. Розроблена система команд дистанційного управління АМР за допомогою «рукавички» є розвитком нового інтерфейсу та технології взаємодії між людиною та мобільним роботом. Це дозволяє виконувати складні технологічні операції та зберегти функціональність робота, незважаючи на апіорну невизначеність та екстремальні умови робочого простору. Формування сигналів для приводів робота проводиться на основі визначення кутів вигину пальців оператора. Маса і габарити пристрою не обмежують рухливість кисті оператора, що дозволить запровадити цей метод для реабілітації та покращення якості життя людей з інвалідністю.

Недоліком запропонованого методу є залежність точності позиціонування, маневреності та вибору оптимальної траєкторії робота від апіорної інформації про робочу зону. У подальших дослідженнях необхідно доповнити конструкцію АМР системами технічного зору для забезпечення ефекту присутності оператора в робочій зоні. Для ефективного дистанційного керування АМР необхідно

розробити алгоритм побудови цифрової моделі робочої зони.

Подяки

Представлені у статті результати отримані авторами під час досліджень за темами 0119U101151 «Прикладні дослідження в механіці та мехатроніці», 0121U108950 «Розробка вимірювальних перетворювачів з цифровим виходом», 0122U001287 «Математичні методи та алгоритми обробки даних в системах автоматизованого управління та захисту інформації».