

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення системи розпізнавання команд на основі технології захвату
рухів для інтелектуального керування мобільним роботом
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи АУТПм-21-1

Черкашин І. С.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване
управління технологічними процесами

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Аллахверанов Р. Ю.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2022р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАМ _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Автоматизоване управління технологічними процесами _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____
(підпис)

« _____ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Черкашину Ігорю Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розроблення системи розпізнавання команд на основі
технології захвату рухів для інтелектуального керування мобільним роботом

затверджена наказом по університету від _____ 07.11. 2022 р. № 1463 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 21.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи _____ 3.1 Мобільний робот FESTO Robotino;

3.2 Програмне середовище Robotino View 2.8.4;

3.3 Елемент інтелектуального керування Position Driver;

3.4 Точність розпізнавання команд не менше 98%;

3.5 Максимально допустима похибка розпізнавання $\partial_{п.р.} = 0,02$.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз сучасного стану проблеми керування мобільними роботами;

4.3 Розробка системи захвату рухів для інтелектуальної технології керування
мобільним роботом;

4.4 Експериментальні дослідження розробленої системи розпізнавання
команд;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації

Power Point (*.ppt) – 14 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми керування мобільними роботами	07.11 – 15.11.22	виконано
2	Розробка системи захвату рухів для інтелектуальної технології керування мобільним роботом	16.11 – 24.11.22	виконано
3	Експериментальні дослідження розробленої системи розпізнавання команд	25.11 – 02.12.22	виконано
4	Охорона праці	03.12 – 06.12.22	виконано
5	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichек	07.12 – 09.12.22	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	10.12 – 12.12.22	виконано
7	Подання роботи на рецензію	13.12 – 15.12.22	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	16.12 – 18.12.22	виконано
9	Подання атестаційної роботи в ЕК	21.12.22	виконано

Дата видачі завдання 07.11.2022 р.

Студент

(підпис)

Черкашин І.С.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

доц. Аллахверанов Р.Ю.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 67 с., 23 рис., 29 табл., 2 додатки, 18 джерел.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ, МАШИНЕ НАВЧАННЯ,
МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, РОЗПІЗНАВАННЯ КОМАНД ОПЕРАТОРА,
СИСТЕМА ЗАХВАТУ РУХІВ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – мобільний робот.

Предмет дослідження – процес розпізнавання команд мобільним роботом.

Мета дослідження – підвищення ефективності роботи мобільного робота.

Методи дослідження – методи машинного навчання, здійснення обробки наборів тестових сигналів та виявлення їх закономірності.

Розробка апаратної частини виконувалась на основі платформи Arduino з використанням трьохосьового акселерометру і гіроскопу MPU-6050, та модуля бездротового зв'язку Bluetooth HC-06.

Результати роботи: науковий – удосконалена технологія розпізнавання команд на основі технології захвату рухів для інтелектуального керування мобільним роботом; практичний – розроблена система розпізнавання команд на основі технології захвату рухів для інтелектуального керування мобільним роботом; проведено налагодження системи шляхом її машинного навчання; досліджено вплив різних стилів подачі команд на точність розпізнавання; виконана оцінка ефективності розробки.

Область використання – системи розпізнавання команд для дистанційного керування мобільним роботом в умовах неповної визначеності технологічних ситуацій.

ABSTRACT

Explanatory note: 67 pp., 23 tables, 29 figs., 2 appendices, 18 sources.

INTELLIGENT TECHNOLOGY, MACHINE LEARNING, MOBILE ROBOT, REPRESENTATION OF THE OPERATOR COMMAND, MANAGEMENT SYSTEM, MANAGEMENT SYSTEM.

Object of research – mobile robot.

The subject of research is the process of command recognition by a mobile robot.

The purpose of the research is to increase the efficiency of the mobile robot.

Research methods – methods of machine learning, processing sets of test signals and identifying their patterns.

The hardware was developed on the basis of the Arduino platform using the tri-axial accelerometer and gyroscope MPU-6050, and the Bluetooth HC-06 wireless module.

Results of work: scientific – advanced technology of recognition of commands on the basis of technology of capture of movements for intelligent management of a mobile robot; practical – the system of recognition of commands is developed on the basis of motion capture technology for intelligent control of mobile robot; the system was set up by its machine learning; the influence of different styles of commanding on the accuracy of recognition is investigated; An assessment of the effectiveness of the development.

Area of use – systems for recognizing commands for remote control of a mobile robot in conditions of incomplete certainty of technological situations.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ	8
1. Аналіз сучасного стану проблеми керування мобільними роботами ..	10
1.1 Мобільні роботи як об'єкти керування	10
1.2 Огляд систем керування мобільними роботами	15
1.3 Моделі керування мобільними роботами	19
1.4 Методи розпізнавання сигналів керування	24
1.5 Постановка мети та задачі дослідження	28
2. Розробка системи захвату рухів для інтелектуальної технології керування мобільним роботом	30
2.1. Розробка апаратного засобу захвату рухів	30
2.1.1. Розробка структурної схеми засобу захвату рухів	30
2.1.2. Обґрунтування вибору компонентів для створення макету	32
2.1.3. Розробка системи підключення компонентів	35
2.2 Розробка системи команд для керування рухом	36
3. Експериментальні дослідження розробленої системи розпізнавання команд	39
3.1 Опис технічних засобів системи	39
3.2 Планування експериментів з розробленою системою	41
3.3 Опис експериментальних досліджень	43
3.4 Оцінка ефективності розробленої системи	55
3.5 Охорона праці	58
Висновки	63
Перелік джерел посилання	65
Додаток А Лістинг програми	68
Додаток Б Демонстраційний матеріал	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- ГЛОНАСС – Глобальна навігаційна супутникова система;
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
- МР – мобільний робот;
- ПК – персональний комп'ютер;
- СК – система керування;
- ТЗ – технічне завдання;
- ШІ – штучний інтелект;
- ШНМ – штучна нейронна мережа;
- ABS – (anti-lock braking system) антиблокувальна система гальмування;
- AUC – (area under ROC curve) площа під ROC кривою;
- CART – (classification and regression tree) дерево класифікації та регресії;
- GPS – (global positioning system) система глобального позиціонування;
- MAV – малорозмірні безпілотні літальні апарати;
- ROC – (receiver operating characteristic) крива помилок;
- UUV – (unmanned underwater vehicle) автоматично керований (роботизований) підводний транспортний засіб, підводний робот;
- Wi-Fi – технологія бездротової локальної мережі.

ВСТУП

На сьогоднішній день робототехніка – невід’ємна частина всіх галузях людської діяльності та побуту: мільйони роботів працюють на виробничих підприємствах, а також підприємствах, які надаються різні послуги; підводні маніпулятори широко застосовуються в дослідницьких і рятувальних роботах; у незліченній кількості роботи і маніпулятори використовуються в космічних дослідженнях. Доволі актуальним є використання роботів та робототехнічних систем для виконання важких, шкідливих, виснажливих і монотонних робіт.

Для сучасних мобільних роботів (МР) характерним є самостійне досліджування навколишнього середовища, розв’язання великої кількості завдань, передбачених розробниками. Проте в деяких випадках їх повної автономності не існує. Неповнота визначеності технологічних ситуацій, наявність випадкових зовнішніх впливів, недостатня інформація щодо стану навколишнього середовища – все це потребує постійної ідентифікації станів робота і середовища. У зв’язку з цим застосовуються інтелектуальні алгоритми керування.

На сьогодні виділяють три типи сучасних систем керування МР: автоматичні, біотехнічні та інтерактивні. Застосування систем керування автоматичного типу є неможливим за умови неповної визначеності технологічних ситуацій, тому перевага надається біотехнічним та інтерактивним типам. За допомогою біотехнічного типу керування людина отримує повний контроль над робототехнічною системою. Інтерактивний тип належить до комбінованого керування системи, в якому поєднуються автоматичний режим та керування фахівцем. За умови використання біотехнічного або інтерактивного типу керування виникає необхідність у налаштуванні зв’язку між людиною та машиною завдяки системам розпізнавання команд.

Системи розпізнавання команд називають частиною віддаленого керування мобільним роботом. На сьогодні популярними

є системи розпізнавання команд, які базуються на принципах: захват руху; візуальне керування; керування важелями та кнопками тощо. Наявність різноманітних команд та методів їх задавання дозволяє системі чітко і однозначно зрозуміти бажання оператора. Проте у сучасному світі система розпізнавання команд, яка заснована на принципі захвату руху, не є добре розвиненою.

Розробка системи розпізнавання команд для інтелектуальної технології керування МР – актуальна наукова задача, оскільки існують випадки, коли мобільний робот не може самостійно прийняти рішення, отже, потребує віддаленого керування.

Об'єктом дослідження виступає мобільний робот.

Предметом дослідження є система розпізнавання команд мобільного робота.

Мета роботи полягає у розробці системи розпізнавання команд на основі технології захвату рухів для інтелектуального керування мобільним роботом.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан проблем керування мобільними роботами;
- розробити постановку задачі щодо розробки системи керування мобільним роботом;
- розробити апаратний засіб захвату руху оператора;
- розробити систему команд для керування рухом мобільного робота;
- розробити математичне забезпечення для системи розпізнавання команд та провести машинне навчання;
- розробити програмне забезпечення системи керування МР;
- провести експериментальне дослідження та порівняльну оцінку розробленої системи керування МР;
- оформити пояснювальну записку атестаційної роботи необхідно згідно літератури [1], [2] та згідно умовам [3].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ

1.1 Мобільні роботи як об'єкти керування

На сьогоднішній день застосування мобільних робототехнічних систем активно використовується у різноманітних галузях. Для корпоративних замовників цікавими є багатофункціональні промислові роботи, для масових покупців – інтелектуальні пилососи і роботи-песики, а для служби безпеки і порятунку необхідні автономні пристрої, які здатні безперервно виконувати завдання стеження та пошуку. Однак усі подібні пристрої в ідеалі повинні упевнено переміщатися в непередбачуваній або незнайомій обстановці реального світу. На даний момент основною проблемою всіх існуючих нині мобільних апаратів, які самостійно переміщаються, без управління з боку людини, є навігація.

З метою здійснення успішної навігації в просторі бортова система робота повинна вміти побудувати маршрут, керувати параметрами руху (задавати кут повороту коліс та швидкість їхнього обертання), правильно інтерпретувати інформацію про навколишній світ, що передається датчиками, а також постійно відстежувати власні координати. Під час побудови системи навігації роботів виникають такі технічні задачі:

- щоб рухатися до мети, спочатку робот повинен створити досить чіткий образ навколишнього середовища;
- під час руху робот повинен швидко і точно керувати двигуном, а також положенням коліс (гусениць);
- робот повинен знати своє реальне місцезнаходження, хоча у більшості випадків воно відрізняється від того, що було збережено у бортовій системі [4-6].

Визначення своїх координат є фундаментальним завданням навігації, розв'язання якого цікаве не лише робототехнікам, але й фахівцям з інших

галузей, зокрема, космічної, авіаційної та автомобільної. Актуальною проблемою сучасної робототехніки вважається повна автоматизація та автономність роботів і робототехнічних систем.

Характерною особливістю робота є здатність частково або повністю виконувати рухові й інтелектуальні функції людини. Від звичайної автоматичної системи робота відрізняє багатоцільове призначення, велика універсальність, можливість перебудови на виконання різноманітних функцій. Робот має замінити людину, коли виконання завдання виходить за межі людських можливостей або пов'язане з надмірною загрозою для здоров'я та життя людини, а також у разі відсутності професійно підготовленого персоналу для виконання трудомістких циклічно повторюваних завдань.

Для робіт в недетермінованих умовах наразі вдосконалюється особливий клас робототехнічних систем, в технічній літературі «мобільні роботи», відмінною рисою яких є наявність локомоційної здатності (тобто здібності до переміщення системи в просторі).

Будь-який мобільний робот може поєднувати у собі три основні системи: транспортну, спеціальну та систему керування.

Транспортна система – це транспортний засіб, призначений для доставки спеціального або технологічного обладнання до місця виконання поставленого завдання.

Спеціальні системи застосовують для безпосереднього виконання поставлених завдань. Спеціальна система базується на необхідному наборі технологічного устаткування, склад якого визначається видом розв'язуваної задачі та призначенням мобільного робота. Наприклад, під час вирішення розвідувальних завдань для технологічного обладнання використовується комплект датчиків і засоби первинної обробки інформації. Крім того, виконання технологічних задач додатково може здійснюватись за допомогою маніпулятора та набору змінного інструменту до нього. Під час проведення вибухотехнічних робіт необхідне оснащення засобами діагностики вибухових пристроїв і гідроруйнівниками.

Система керування забезпечує керування рухом, а також роботою технологічного устаткування робота, адаптивне керування ходовою частиною та енергетичною установкою з урахуванням взаємодії транспортної системи з навколишнім середовищем.

До системи керування належить інформаційно-керуюча частина (апаратура керування роботом, датчики, система технічного зору та мікропроцесори попередньої обробки інформації), яка розташована на мобільному роботі; пост оператора мобільного робота (пульт керування, пристрої для відеоспостереження; комп'ютер для обробки інформації); комплект приймально-передавальної апаратури, що забезпечує передачу інформації від робота на пост оператора і команд керування від поста оператора на мобільний робот.

Система керування рухом також повинна забезпечувати планування руху в недетермінованих умовах на основі картографічної бази, враховуючи безперервне надходження до системи керування від технічних органів почуттів і навігаційної системи.

Система керування МР може бути повністю автоматичною або ручною. Під час використання ручної системи керування генерування команд керування здійснюється оператором (людиною).

Застосування мобільного робота є більш ефективним під час використання його як частини робототехнічного комплексу, що було утворено групою мобільних роботів, засобами доставки, енергозабезпеченням та технічним обслуговуванням, центральним постом керування й обробки даних. У таблиці 1.1 зазначена класифікація мобільних роботів за їхнім функціональним призначенням [6].

Таблиця 1.1 – Групи мобільних роботів за функціональним призначенням

Група	Базові вимоги	Базовий варіант використання
Для спеціального призначення	Компактність, безшумність	Автономне, один канал передачі відеоінформації

Продовження таблиці 1.1

Група	Базові вимоги	Базовий варіант використання
Для військових та воєнізованих застосувань	Надійність, простота в керуванні, стандартизоване корисне навантаження	У складі розвідувальних, ударних і охоронних комплексів, багатоканальні системи передачі різноманітних даних
Для екстремальних ситуацій, наукових досліджень, кінематографічних застосувань	Стійкість до несприятливих зовнішніх впливів, універсальність по відношенню до корисного бортового навантаження	Автономне, багатоваріантність у реалізації каналів передачі даних
Для спортивних, промислових і побутових застосувань	Простота в керуванні, економічність, надійність	Автономне, один канал передачі відеоданих

Прикладами сьогочасної реалізації та перспективних розробок у даній галузі є:

- інтелектуальні автономні мобільні платформи для різних середовищ використання (малорозмірні безпілотні літальні (MAV) та підводні (UUV) апарати, нано- та пікосупутники, мікромашини та маніпулятори);
- мехатронні системи автотранспортних засобів для забезпечення безпеки (ABS, Airbag, підшипники з контролем рівня зносу тощо);
- розподілені сенсорні системи, наприклад, крило літака, що обладнане «розумною» поверхнею для динамічного контролю обтікання і зниження несприятливих ефектів;
- оптимізація керування інфраструктурними комплексами (зокрема в житлово-комунальному господарстві) – датчики втрат тепла, сейсмодатчики фундаменту, які можна застосовувати для моніторингу стану та забезпечення функціонування небезпечних об'єктів;

- застосування мікро- і нанороботів у медицині та біотехнології – підвищення рівня охорони здоров'я та забезпечення життєдіяльності людини;
- інтелектуальні системи охорони та спостереження, зокрема для забезпечення безпеки та протидії тероризму;
- автономні навігаційні системи, в тому числі ті, що інтегровані з GPS, ГЛОНАСС;
- одяг або амуніція з автоматичною підтримкою індивідуального мікроклімату;
- зниження ризиків і шкідливих чинників для системи «людина-машина», наприклад, керування на відстані спеціалізованими роботами в потенційно небезпечних зонах із застосуванням систем технічного зору, сенсор-костюмів тощо [7].

Мобільні роботи є універсальними, тому можуть використовуватися в різних галузях. Щодо питання використання робототехніки в військових цілях і в надзвичайних ситуаціях пріоритетними є технічні «здібності» роботів, їхня придатність до експлуатації в жорстких й екстремальних умовах, а також здатність забезпечити захист обслуговуючого персоналу. Під час застосування роботів у цивільній промисловості найбільше значення надається їхній економічній ефективності. Для всіх цих цілей максимально важливим аспектом є можливість віддалено керувати мобільними роботами, оскільки в багатьох випадках помилка машинної реалізації може призвести до незворотніх наслідків [8].

Як об'єкт мобільний робот можна описати за допомогою типової структурної схеми, представленої на рисунку 1.1.

На даній структурній схемі зображено плату керування, яка, в свою чергу, отримуватиме сигнал про запуск та живлення від спеціально налаштованого порту ПК. Після чого плата керування передаватиме сигнал на привід, а він – на рушії, щоб почати рух. Для руху робототехнічного пристрою необхідне джерело додаткового живлення. Після обробки всіх цих даних плата керування передаватиме їх на порт ПК.

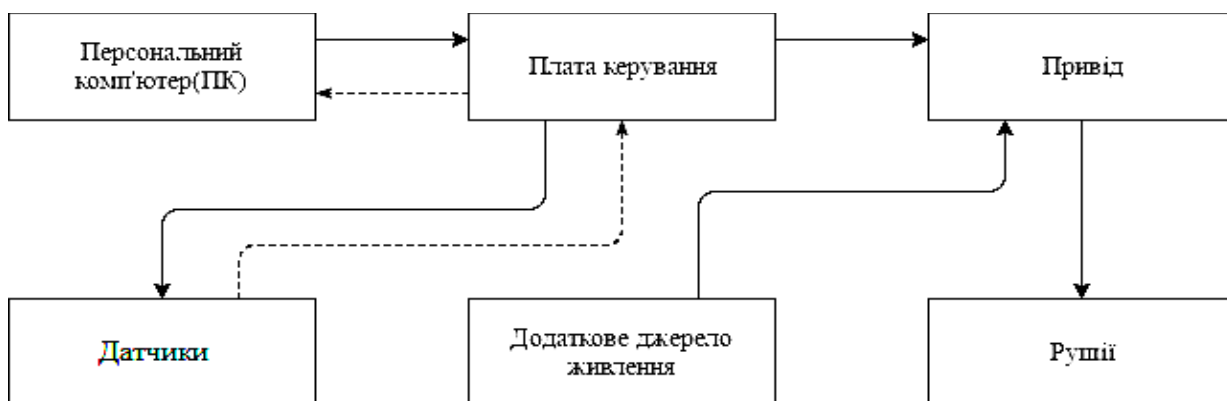


Рисунок 1.1 – Типова структурна схема мобільного робота

Отже, для отримання даних з датчиків та прийняття рішень за цими даними, необхідно використовувати інтелектуальні технології керування мобільним роботом. Для досягнення мети щодо створення системи розпізнавання візуальних команд для інтелектуальної системи керування МР необхідно проаналізувати системи керування мобільними роботами.

1.2 Огляд систем керування мобільними роботами

Пристрої керування роботами, як правило, бувають трьох типів: біотехнічні, автоматичні, інтерактивні. Кожен тип для класифікації можна розподілити на три підгрупи. У свою чергу, кожна підгрупа має власне призначення, відмінності, переваги та недоліки. Компроміс яких досягається оптимальним функціонуванням конкретної мехатронної системи за конкретних умов і наявності тих чи інших фахівців і матеріальних засобів.

У деяких випадках вибір між декількома видами пристроїв керування зовсім відсутній, наприклад, якщо умови роботи не дозволяють розмістити робота поруч з оператором, зокрема, в зоні, ураженій радіацією. Або якщо зовнішній робот оснащений великою кількістю різних деталей, але у них повинен бути однаковий принцип обробки, – в такому випадку критерій «здатність до самонавчання» є життєво важливим і необхідним. Або під час роботи на Місяці, коли апарат знаходиться на зворотному від Землі боці нашого

супутника і не має можливості отримувати команди від оператора з землі – в такому випадку в ньому повинна міститися програма, що дозволила б йому самостійно продовжувати роботу, дослідження, пошуки, і паралельно підтримувати свої системи життєзабезпечення [5].

За типом керування робототехнічні системи бувають:

- біотехнічні: командні, копіювальні, напівавтоматичні;
- автоматичні: програмні, адаптивні, інтелектуальні;
- інтерактивні: автоматизовані, супервізорні, діалогові.

Біотехнічні системи керування – це категорія, в якій маніпулятор робота в точності копіює рух руки оператора. Це досить зручно, оскільки людина-оператор може знаходитися на досить великій відстані від зони проведення робіт, тому що йому може загрозувати небезпека найнижчих рівнів (обливання водою), середніх (потрапляння в очі розчину), а також високих і смертельних (через аварію може впасти будь-який важкий агрегат). Крім того, зручним чинником є можливість виконання завдання з масштабуванням (наприклад, сантиметрове зміщення руки оператора дорівнює 5 см зміщення маніпулятора) [5].

Командні системи керування – це категорія, в якій керування здійснюється за допомогою важелів і кнопок, кожна з яких відповідає за власну ланку чи будь-яку функцію. Плюсами тут вважається зворотній бік мінусів: можна дуже точно виставити кожен ланку в необхідне оператору положення, однак на це необхідно витратити багато сил, часу і старання.

Копіювальні системи керування – це категорія, в якій повторюються рухи людини. Найпоширенішим видом вважаються екзоскелети, які одягаються як на все тіло, так і на кілька його частин або на окрему кінцівку. Вони володіють деякою портативністю (хоча й не ідеальною), що дозволяє використовувати їх навіть в повсякденному житті.

Інший вид – це СК, де рух передається органом (наприклад, важелем). Наразі один із копіювальних маніпуляторів може піднімати до 3 тонн вантажу. Як приклад наведемо екзоскелет XOS від компанії Sarcos. Він

збільшує силу людини і дозволяє з мінімальними затратами сил витримувати важкі фізичні навантаження. ХОС володіє просунутою системою зв'язку людини з механічною частиною, завдяки цьому рух пілота і машини практично синхронні. Датчики м'язової активності з усіх частин тіла передають інформацію на бортовий комп'ютер, який знаходиться на спині екзоскелета, і координує всі його дії. Таким чином, людина практично не відчуває втоми під час фізичних навантажень. Мінусом цієї конструкції є величезне енергоспоживання та обмеженість рухів пілота.

Напівавтоматичні системи керування – це категорія, в якій глибоко модернізовані попередні дві підкатегорії в тому плані, що на систему встановлюється мікрокомп'ютер, що займається обчисленням рухів робота. Отже, за допомогою одного важеля відбувається керування всією кінематикою робота.

Автоматичні системи керування або СК, які здатні працювати без участі людини зовсім. У них заздалегідь закладається схема поведінки («робити щось поки не ...», «якщо ..., то ..., інакше ...»), задається послідовність, координати тощо. Такі роботи доволі корисні під час постійної роботи, коли робота циклічна і не змінюється в процесі її виконання. Відповідно не потрібно витратити гроші на оператора. Крім того, автоматичні СК досягають більш високої швидкості, ніж ті, в яких бере участь людина. Важливим є й те, що під час роботи таких роботів підвищується безпека, оскільки участь людини в технічному процесі мінімальна, або зовсім відсутня.

Програмні системи керування. Це категорія СК, в якій роботи мають заздалегідь задану послідовність дій – програму. Повторювані дії виконуються з високою швидкістю, надійністю та ефективністю. Головна перевага полягає в тому, що ці системи можна легко запрограмувати повторно, отже, підвищується їхня адаптивність.

Адаптивні системи керування. Це модифікована версія програмних СК. Головна відмінність яких полягає у наявності адаптивного забезпечення: камер, ультразвукових датчиків відстані, датчиків торкання, системи розпізнавання кольору, розміру, образу тощо. Таким чином, робот може

самостійно коригувати свої дії та підлаштовуватися до змін зовнішніх умов [5].

Інтелектуальні системи керування. Це категорія СК, в якій ще більш глибоко модернізуються попередні дві підкатегорії. Найважлива відмінність полягає у можливості зворотного спілкування з людиною, плануванні та переплануванні поведінки, навігації, самонавчання та спілкуванні, взаємодії з іншими роботами й обладнанням, інструментами.

Інтерактивні системи керування. Це «гібридні» СК, які більшість часу працюють як автоматичні СК, але за необхідності можуть бути миттєво переключитися на керування людиною, чи працювати по черзі «людина - автоматика». Відмінною рисою таких систем є можливість оператора здійснювати команди голосом або текстом. Зручним є той факт, що робот за необхідності працює поетапно, отже, він не зможе перейти до наступного етапу доти, поки не отримає команду-дозвіл від оператора.

Автоматизовані системи керування. Це категорія, в якій можуть чергуватися, кооперуватися та об'єднуватися як автоматичні, так і біотехнічні ознаки.

Супервізорні системи керування. Це категорія, в якій людина займається інтелектуальною роботою (наприклад, вибирає засіб реалізації), а машина – обчислювальною і безпосередньо реалізує її.

Діалогові системи керування. – Це категорія, в якій людина і робот працюють в тісній кооперації, з постійним діалогом між оператором і машиною. Завдяки такій взаємодії людина завжди має найбільш точні дані про діяльність робота, а робот – чітке планування і вибір стратегії поведінки, що реалізуються завдяки спільним зусиллям ПК і людини. Робота, як правило, обладнують системою прогнозування і виведення оператору інформації щодо наслідків тієї чи іншої дії. Об'єктами керування є різні виконавчі механізми – маніпуляційні, пересування і системи керування. Загальний вигляд механічної системи як об'єкта керування можна охарактеризувати: типом, числом змінних, орієнтацією робочого органу,

кількістю ступенів рухливості (переносні, поступальні і обертальні), типом і розміром робочої зони [9].

1.3 Моделі керування мобільними роботами

1.3.1 Моделі в загальному вигляді

Розробка роботів, які працюють в реальному часі, затребувана не тільки для науково-дослідницької мети, але також і для використання їх у реальних обставинах на реальних об'єктах.

Основні проблеми проєктування та налагодження відпрацьовуються на малорозмірних та малопотужних моделях. Перевагами такої розробки є те, що кожен елемент таких роботів можна досліджувати та модифікувати самостійно до найдрібніших частин, технологія залишається в розпорядженні розробника, тому всю розробку можна повторювати, при чому в збільшених розмірах та надавати їм більш потужної версії. Основні проблеми організації такої системи не залежать від розмірів, проте налагодження малогабаритного виробу є більш безпечним, більш дешевим і найчастіше буває більш простим. Складність полягає в більшій швидкодії малопотужного робота (це вимагає більшої швидкодії електронної частини керування). Крім того, виникає необхідність щодо максимального прагнення до зменшення ваги і зниження габаритів усіх компонентів системи [9].

Складні завдання проєктування, компонування елементів, узгодження їх з електричним сигналам, ідентифікації об'єкта та налаштування регуляторів можна реалізувати на дешевих моделях і наочно проведений експеримент надаватиме більше корисної інформації про об'єкт. Крім того, під час розв'язання завдань керування можуть з'являтися нові (наукові) проблеми, які не настільки критичні під час керування об'єктами великих габаритів і більшої інерційності.

Як приклад такого малогабаритного робота розглянемо двоколісний балансуєчий робот, який підтримує рівновагу під час дії неконтрольованих зовнішніх перешкод, або гексопод.

Однією з найгостріших проблем налагодження такого робота вважається забезпечення необхідної точності керування в реальному часі. Це завдання можна розв'язати, якщо застосувати систему зі зворотним зв'язком, основними елементами якої є об'єкт, датчик його вихідної величини і регулятор. Ці три елементи послідовно додаються до контура керування (тобто до петлі) [10].

Об'єктом керування в даному випадку стає електромеханічна частина, до складу якої належить електропривід, який приводить в дію колеса та механічну частину робота. Необхідно підтримувати в рівновазі центр його мас. Особливість об'єкта полягає в тому, що центр мас розташований набагато вище, ніж вісь обертання коліс, відповідно, без дії зворотного зв'язку робот стає нестійким і може зберігати рівновагу тільки за умови ефективної роботи зворотного зв'язку.

Типову структуру електромеханічної системи з негативним зворотнім зв'язком зображено на рисунку 1.2 [10].

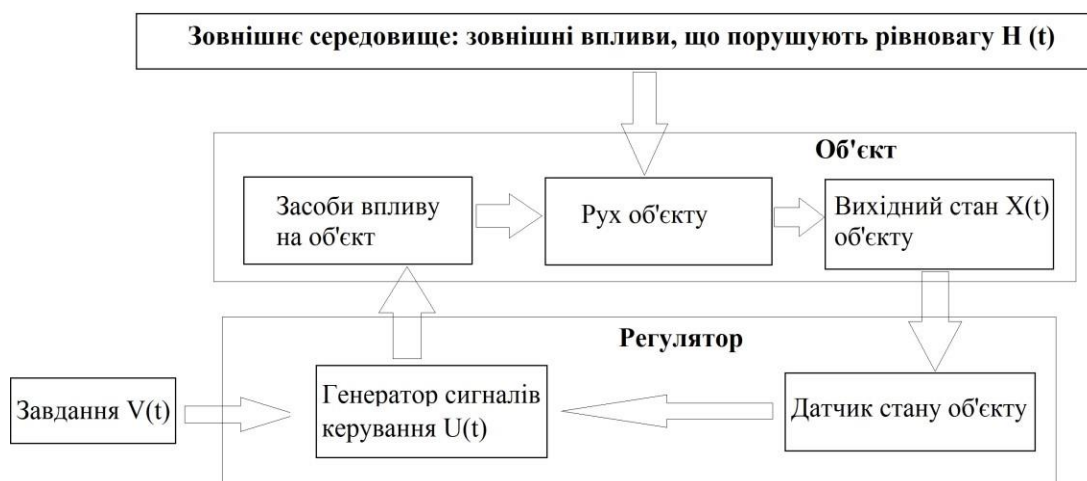


Рисунок 1.2 – Типова структура електромеханічної системи

Типова модель системи задається системою рівнянь в області перетворень Лапласа. Модель об'єкта задається наступним рівнянням [10]:

$$X(s) = W(s) \times U(s) + H(s). \quad (1.1)$$

Тут кожна функція від аргументу s , крім $W(s)$ – це перетворення за Лапласом від відповідної функції часу, $X(s)$ відповідає вихідній величині $x(t)$, $U(s)$ – сигналу керування $u(t)$, вступнику на вхід об'єкта, $H(s)$ відповідає невідомому збуренню $h(t)$, яке система повинна придушити за рахунок дії зворотного зв'язку, $W(s)$ – передавальна функція об'єкта.

Модель дії регулятора задається наступним рівнянням [10]:

$$U(s) = W_R(s) \times E(s), \quad (1.2)$$

де $W_R(s)$ – передавальна функція регулятора;

$E(s)$ – перетворення за Лапласом від помилки керування $e(t)$.

У системах стабілізації, зазвичай, помилка прирівнюється до вихідної величини $x(t)$ з негативним позначенням, тому що необхідно, щоб вихідна величина (відхилення від рівноважного стану) дорівнювала нулю. В системах керування (регулювання) існує запропоноване значення (завдання) $v(t)$, яке додається до вихідної величини через суматор, а рівняння суматора має вигляд [10]:

$$E(s) = V(s) - X(s) \Leftrightarrow e(t) = v(t) - x(t). \quad (1.3)$$

Динамічна і статична помилки системи під час відпрацювання змін завдання ідентичні помилці при ідентичних змінах перешкод, відповідно, якість і точність системи досліджується саме на помилкових відпрацюваннях завдань. Найчастіше вважається, що вихідна величина доступна для вимірювання. На практиці так не буває. Отже, для реалізації системи використовується датчик вихідної величини з відповідною передавальною функцією $W_S(s)$, а співвідношення (1.3) в цьому випадку приймає вид [10]:

$$E(s) = V(s) - W_s(s) \times X(s). \quad (1.4)$$

Завдання проєктування системи ускладнюється, якщо неможливо вибрати датчик, який забезпечує необхідну статичну і динамічну точність. У такому разі доводиться застосовувати два або більше датчиків. Наприклад, для забезпечення статичної точності застосовують датчик з малою статичною похибкою (але точність є недостатньою динамічною), а для забезпечення динамічної точності застосовують датчик уже з високою динамічною точністю, тобто з широкою смугою пропускання і малими шумами в області цієї смуги, хоча, при цьому, існує ймовірність і недостатньої статичної точності. Завдання використання двох або більше датчиків для керування єдиною величиною розглядаються індивідуально для кожного робота.

На сьогодні актуальними є проблеми, в яких навіть при ідеальних датчиках керування системою, стають непротими задачами. В цих умовах відмінність датчиків від ідеалу вкрай ускладнюється проєктування системи.

Подібні проблеми щодо неможливості використання одного датчика і необхідності суміщення позитивних властивостей декількох датчиків виникають також у багатьох інших завданнях керування в контурі з негативним зворотнім зв'язком. Особливо важко їх розв'язати в тому випадку, коли навіть під час застосування ідеального датчика керування об'єктами це є не простим завданням внаслідок специфічних властивостей його математичної моделі. Наприклад, схильність до коливань є однією з таких властивостей.

Ця схильність часто може призводити до того, що в системі з'являється надзвичайно велике перерегулювання, або навіть зворотне перерегулювання, тобто на початковій стадії перехідного процесу відбувається рух у хибному напрямку. Методи проєктування регулятора досліджуються моделюванням, яке дозволяє значно знизити витрати, якщо експеримент пройде невдало, або система вийде з ладу [10].

Моделювання робота дозволяє отримати корисну інформацію про його можливості, технічні характеристики, які можна досягти, та розробити план, щодо покращення роботи загалом.

1.3.2 Особливості моделі об'єкта

Модель об'єкта не лінійна, але поряд з рівноважним станом її можна вважати лінійною. Передавальна функція об'єкта містить запізнювання і фільтр другого порядку. Спільні властивості цього фільтра і запізнювання наділяють об'єкт схильністю до коливань.

Для визначення кута відхилення балансуєчого робота від вертикальної лінії можна застосовувати різні за своєю природою датчики, але всі вони є далекими від ідеалу [5].

Наприклад, для визначення кута відхилення можна використати гіроскоп. Проте його швидкодія є обмеженою, крім того, він володіє шумом квантування. Вимоги до датчиків є надзвичайно високими. Якщо використовувати гіроскоп для керування, в сигналі присутні надмірно великі шуми. Це призводить до помітних змін в усталеному стані з величиною близько 5%. Таким чином, для диференціовального каналу доцільно використовувати акселерометр, який представлений спеціалізованою мікросхемою.

У моделі акселерометра від ідеального датчика слід передбачити дві відмінності: високочастотний гаусів шум і низькочастотний дрейф.

Високочастотний шум несуттєво позначається внаслідок його високої частоти і малої величини, отже, не дає зміщення нуля. Низькочастотний дрейф дає зміщення нуля, але це не повинно проявлятися під час використання сигналу з виходу цього датчика для формування сигналу помилки в диференціованні тракту. Зазначимо, що цей сигнал не можна застосовувати для формування сигналів в інших трактах регулятора, особливо, в інтегруючому тракті, оскільки дрейф нуля занадто великий, і його інтегрування може призвести до виникнення лінійно наростаючої помилки [10].

Ураховуючи високочастотний шум і низькочастотний дрейф, показники з акселерометра можна застосовувати для систем захвату рухів.

1.4 Методи розпізнавання сигналів керування

Сигнал керування називається сигнал, призначення якого полягає в змушенні системи виконувати певної операції. Оскільки майже завжди цей сигнал представлений потоком інформації, яку необхідно фільтрувати, і виділити саме сигнал екрування, не пропускаючи шум.

Для цього актуально використовувати методи розпізнавання образів або метричний класифікатор.

Метричний класифікатор (similarity-based classifier) – це алгоритм класифікації, що заснований на обчисленні оцінок подібності між об'єктами. Найпростішим метричним класифікатором вважається метод найближчих сусідів, в якому об'єкт класифікується і розподіляється до того класу, якому належить більшість схожих з ним об'єктів.

Для формалізації поняття подібності потрібно ввести функцію відстані між об'єктами (x, x'). Жорсткі вимоги для функції як метрики не встановлюються; зокрема, нерівність трикутника цілком може бути порушеною [11].

До метричних алгоритмів класифікації належать:

- метод найближчих сусідів;
- метод потенційних функцій;
- метод радіальних базисних функцій;
- метод парзенівського вікна;
- метод еталонів, що дробляться;
- алгоритм обчислення оцінок.

Крім метричних класифікаторів в машинному навчанні є широкий клас методів, які використовують інформацію про подібність об'єктів, але для

розв'язання інших завдань:

- кластеризація;
- непараметрична регресія;
- багатовимірне шкалювання;
- візуалізація (карта подібності і карта Кохонена).

Метод найближчих сусідів є один з найпростіших класифікаторів, який засновано на оцінюванні подібності ознак об'єктів. Об'єкт класифікації розподіляється до того класу, до якого належать найближчі до нього об'єкти навчальної вибірки. Спочатку задамо навчальну вибірку пар «об'єкт-клас» [11]:

$$X^m = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}. \quad (1.5)$$

Це можуть бути об'єкти, які раніше вже були класифіковані, або об'єкти, які класифікують експерти. Тепер поставимо метрику на множині об'єктів: вона обернено пропорційна подібності між об'єктами. Для довільного об'єкта розташуємо об'єкти навчальної вибірки x_i в порядку зростання відстані до [11]:

$$p(u, x_{1;u}) \leq p(u, x_{2;u}) \leq \dots \leq p(u, x_{m;u}), \quad (1.6)$$

де $x_{m;u}$ – об'єкт навчальної вибірки, який є m -сусідом об'єкта.

За аналогією перенумеруймо класи, до яких належать $x_{i;u}$ – позначимо їх. Алгоритм найближчих сусідів у загальному вигляді можна записати за формулою [12]:

$$a(u) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [y(x_{i;u}) = y] \omega(i, u), \quad (1.7)$$

де ω – вагова функція, що показує, чи важливий для об'єкта елемент під номером i .

Для методу k найближчих сусідів $\omega(i, u) = [i < k]$. Отже, алгоритм класифікації методом найближчих k сусідів дуже простий. Маємо вибірку з даних: навчальну множину, коженному з елементів відомо його приналежність до того чи іншого класу. Для кожного наступного елемента невідомого класу береться вибірка з k найближчих елементів, клас яких вже відомий. Новий елемент розподіляється до того класу, елементів якого виявилось найбільше в вибірці. Схема роботи алгоритму подано на рисунку 1.3 [12].

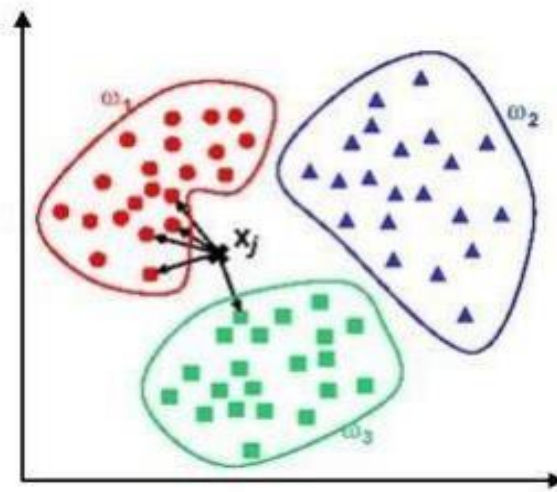


Рисунок 1.3 – Схема роботи алгоритму

Перевагами kNN -класифікатора є:

- невимогливість припущень про дані;
- нечутливість до аномалій даних.

Недоліки полягають у:

- вимозі багато пам'яті;
- невисокій швидкості роботи: якщо в навчальній вибірці N об'єктів, в тестовому виборі M об'єктів, а розмірність простору – K , то кількість операцій для класифікації тестової вибірки може бути оцінено як $O [K * M * N]$.

На рисунку 1.4 представлено гістограму значень середньої точності класифікатора, отриманої за допомогою перехресної перевірки, в залежності від k [12].

Класифікація є одним із завдань, в якому застосовуються дерево прийняття рішень. Таке дерево складається з вузлів-листя, кожен з яких є класом, і вузлів прийняття рішень, які представляють правило, ділить задану множину об'єктів на частини. З вузлів прийняття рішень виходять гілки, кількість яких відповідає кількості можливих варіантів значень – правил.

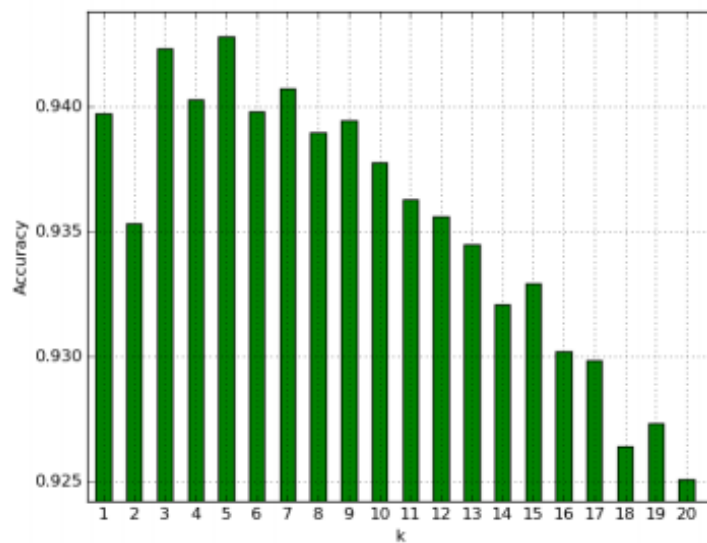


Рисунок 1.4 – Гістограма значень середньої точності класифікатора

Для побудови дерева рішень використовуємо алгоритм CART, що формує бінарне дерево. На кожному кроці побудови дерева алгоритмом правило формується в вузлі, який поділяє задану множину об'єктів на дві частини: частину, де правило виконується і частину, де правило не виконується.

У кожному вузлі розбиття можна здійснювати тільки по одному атрибуту. Оскільки атрибути об'єктів є числовими, то у внутрішніх вузлах формуються правила у вигляді нерівностей $x \leq C$. Значення C у більшості випадків вибирається як середнє арифметичне двох сусідніх упорядкованих значень змінної x навчального набору даних. Типову схему бінарного дерева рішень зазначено на рисунку 1.5.

Перевагами використання дерева рішень є:

- простота в розумінні;
- здатність працювати як з числовими, так і категоріальними даними;
- висока швидкість роботи;
- проста інтерпретація роботи: будь-яку ситуацію в моделі можна пояснити за допомогою булевої логіки.

Недоліками є:

- можливе перенавчання, при наявності складних конструкцій уявлення даних;
- проблеми побудови оптимального дерева *NP*-повна [12].

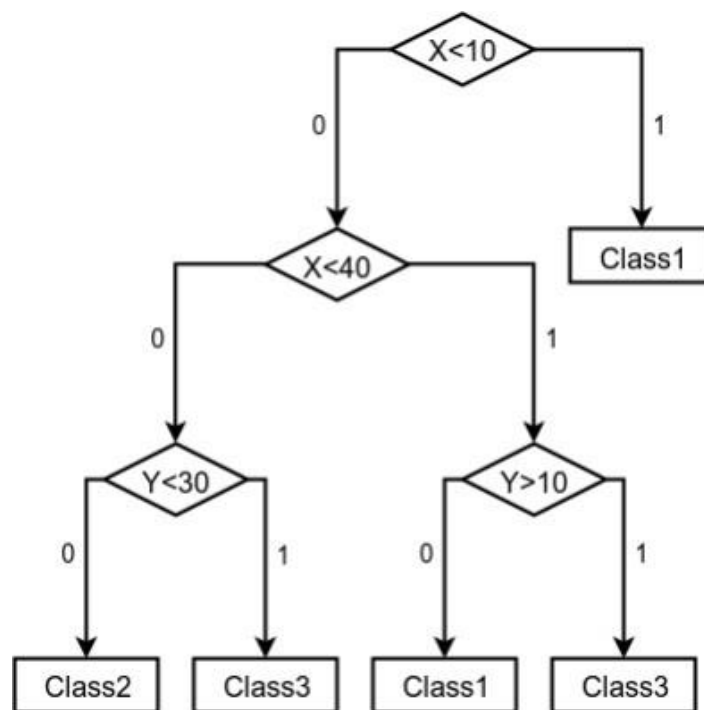


Рисунок 1.5 – Типова схема бінарного дерева

1.5 Постановка мети та задач дослідження

Під час використання роботів, зокрема, у небезпечних або шкідливих для людини умовах виникає необхідність у віддаленому спостереженні та керуванні ними. Проаналізувавши сучасний стан проблеми віддаленого керування мобільними роботами, ми виявили, що сучасні мобільні роботи є

складними системами з нечіткою логікою; системи керування, які існують зараз, повинні мати змогу проводити захвати рухів оператора, отримуючи інформацію з датчиків, здійснювати фільтрацію даних та мати змогу приймати рішення в умовах невизначеності та випадкових збурень, недостатньої інформації про навколишнє середовище.

Такі системи достатньо затратні, отже, потребують удосконалення за рахунок розробки інтелектуальних технологій і засобів керування.

Було визначено, що для створення більш економічної системи віддаленого керування необхідно:

- застосовувати дані з пари датчиків (акселерометр і гіроскоп) для досягнення високої точності розпізнавання при малих витратах;
- обробляти дані для уникнення надлишкової інформації;
- розробляти систему команд оператора, що базується на системі захвату рухів;
- застосовувати машинне навчання системи для розпізнавання команд.

Отже, необхідно розробити систему розпізнавання команд на основі технології захвату рухів для інтелектуального керування МР.

Для досягнення даної мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- розробити апаратний засіб захвату рухів оператора;
- розробити систему команд для керування рухом МР;
- розробити математичне забезпечення для системи розпізнавання команд та провести машинне навчання;
- оцінити якість навчання системи;
- розробити програмне забезпечення системи керування МР;
- провести експериментальне дослідження та порівняльну оцінку розробленої системи керування МР.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЗАХВАТУ РУХІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

Гіроскопічні або інерційні системи для збору даних трекінгу базуються на технології інерційних сенсорів і мініатюрних гіроскопів, які встановлюються на виконавця, як, наприклад, магніти або датчики в інших носар-системах. Інформація, отримана з сенсорів і гіроскопів, передається до системи обробки даних, де проводиться її запис і подальша обробка. Такі системи обчислюють не тільки взаємне розташування сенсорів, але й їхню просторову орієнтацію (кут нахилу). У процесі обробки таких даних з'являються задачі ідентифікації та класифікації сигналів [13].

Для нормальної роботи системи захвату рухів необхідно виконати машинне навчання системи, тобто здійснити обробку наборів тестових сигналів, виявити їхні закономірності. Така необхідність у навчанні пов'язана з тим, що сигнали керування оператор видає з певними відхиленнями від ідеальних (еталонних). Крім того, кожен з операторів може мати свій стиль для подачі команд.

Під час створення сигналу керування важливим є зворотній зв'язок з мобільним роботом: сигнали про поточний стан робота мають передаватися до системи обробки інформації та класифікуватися. Звідси випливає задача зворотної класифікації, яку також можна розв'язувати під час навчання робота.

2.1 Розробка апаратного засобу захвату рухів оператора

2.1.1 Розробка структурної схеми засобу захвату рухів оператора

Структурна схема пристрою необхідна, тому що визначає основні функціональні частини пристрою, призначення і взаємозв'язки між ними. Схема відображає принцип дії виробу в найзагальнішому вигляді.

Розробка структурної схеми – це основоположний етап розробки робототехнічного пристрою. До структурної схеми даного пристрою висунуто вимоги для виконання наступних функцій:

- захват вертикальних і горизонтальних рухів оператора;
- об'єднання даних з декількох датчиків;
- обробки інформації;
- передача даних на ПК.

Розроблену структурну схему подано на рисунку 2.1.

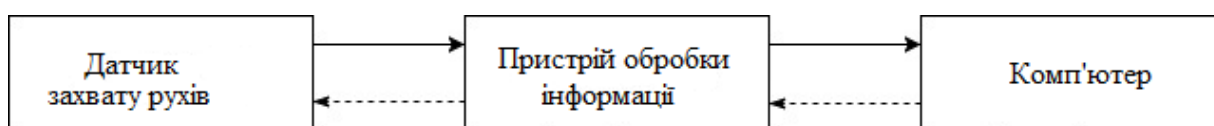


Рисунок 2.1 – Структурна блок-схема макету робототехнічного пристрою

На зазначеній вище структурній схемі зображено: датчик захвату рухів, пристрій обробки інформації, комп'ютер.

Датчиком захвату руху може виступати як акселерометр, так і гіроскоп. Для покращення точності результату можна об'єднати показників обох датчиків. Ці датчики виконують захват даних за умови зміни вертикального або горизонтального положення частини оператора, до котрої вони будуть прикріплені.

Пристроєм обробки інформації може бути плата керування на базі Arduino або мікрокомп'ютер на базі Raspberry Pi. Оскільки використання мікроПК для таких простих задач (отримання інформації з датчиків, її обробка та перетворення в інший формат) є недоцільним, то доречно застосувати плату керування на базі Arduino. Вона повинна отримати інформацію з датчиків, відцифрувати її та передати на комп'ютер.

У такій системі ПК приймає цифрову інформацію з подальшою її обробкою, а потім генерує сигнал керування для МР.

Під час розробки системи віддаленого керування одним із важливих чинників стає максимальне віддалення оператора від самого робота, яка, в свою чергу, залежить від двох чинників:

- способу підключення робота до ПК;
- способу підключення до ПК системи захвату рухів.

Для досягнення максимальної віддаленості всі підключення можна виконувати завдяки бездротовим методам: підключення по Wi-Fi та Bluetooth. Досягнення максимальної віддаленості відбувається у випадку використання технології Bluetooth останнього покоління (5.0) не більше ніж 400м, але комп'ютер має розташовуватись рівновіддаленно і від оператора, і від самого робота. Якщо використовувати технології Wi-Fi, то можливо збільшити дальність до десятків кілометрів, отже, вона має залежність тільки з потужністю антени-передавача та антени-приймача на мобільному роботі.

Для проведення експериментів доречним є використання дротових технологій, тому що це кардинально зменшує вартість системи та дозволяє з більшою точністю провести навчання системи.

Система, яка розробляється, повинна бути універсальною, економічною і придатною для використання у різних галузях людської діяльності: від виробництва до виконання звичайних побутових робіт. Сфера застосування даної системи може бути обмежена попитом і поточним станом розвитку засобів робототехніки.

На даному етапі розвитку галузі розробки мобільних роботів їх активно застосовують для дослідження місцевості з непридатним для людини навколишнім середовищем; для виконання робіт, які не під силу людині; для порятунку під час надзвичайних ситуацій та навіть виконання побутових робіт, для полегшення життя людини.

2.1.2 Обґрунтування вибору компонентів для створення макету

Для розробки даного макету було висунуто вимоги, що інформація повинна надходити з двох датчиків: акселерометра і гіроскопа.

Для зручності ці датчики необхідно розташовувати на єдиній платі, тому що тоді буде менша ймовірність виникнення додаткових шумів. З наявних датчиків маємо тільки єдиний варіант – MPU-6050 GY-521. Це компактний і легкий модуль 3-х осьового акселерометра і 3-х осьового гіроскопа, яким керують за протоколом I²C (TWI). Він відмінно підходить для визначення положення в просторі.

I²C (TWI) називають послідовну асиметричну шина для зв'язку між інтегральними схемами всередині електронних приладів, до складу якої входять дві двонаправлені лінії зв'язку (SDA і SCL). Вона використовується для з'єднання низько швидкісних периферійних компонентів з процесорами та мікроконтролерами (наприклад, на материнських платах, у вбудованих системах, мобільних телефонах). Класична адресація включає 7-бітовий адресний простір із 16-ма зарезервованими адресами. Це означає, що розробники можуть використати до 112 вільних адрес для підключення периферії на одну шину. Основний режим роботи – 100 кбіт/с; 10 кбіт/с в режимі роботи зі зниженою швидкістю. Крім того, стандарт допускає припинення тактування для роботи з повільними пристроями [14].

Обираючи плату обробки інформації для макету, було вирішено застосувати плати на базі Arduino. Попередньо було проведено порівняльну характеристику за допомогою зведення основних параметрів у таблицю для чотирьох плат:

- Arduino Mini;
- Arduino Nano;
- Arduino Uno;
- Arduino Mega.

Відмінності параметрів і зручності вибору моделі платформ Arduino, основні технічні параметри наочно зібрано в порівняльній таблиці 2.1 [15].

Таблиця 2.1 – Порівняння технічних параметрів плат Arduino

	Arduino Mega	Arduino Uno	Arduino Nano	Arduino Mini
Мікроконтролер	ATmega2560	ATmega328p	ATmega168 або ATmega328	ATmega168
Робоча напруга В	5	5	5	5
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12	7-12	7-12	7-12
Вхідна напруга (граничне) В	6-20	6-20	6-20	6-20
Цифрові Входи / Виходи	54	14	14	14
Аналогові входи	16	6	8	8
Постійний струм через вхід / вихід mA	40	40	40	40
Постійний струм для виведення 3,3 В mA	50	50	-	-
Флеш-пам'ять, Кb	128	32	16/32	16
ОЗП, Кb	8	2	1 (ATmega168) 2 (ATmega328)	1
Незалежна пам'ять	4 Кb	1 Кb	512b (ATmega168) або 1 Кb (ATmega328)	512b
Тактова частота MHz	16	16	16	16
Ціна, грн.	355	209	138	78

Отже, оскільки розробка макету пристрою захвату рухів оператора виконувалася з можливістю подальшого вдосконалення, було вирішено застосувати плату Arduino Nano, перевагами якої є: низька ціна, достатня кількість пам'яті та наявність усіх необхідних входів/виходів для підключення датчика, котрий безпосередньо буде знімати показники руху оператора.

2.1.3 Розробка схеми підключення компонентів

У ході підключення датчика до плати обробки інформації використали виходи датчика SDA і SCL, які були підключені до аналогових виходів плати Arduino Nano A4 і A5. Напруга живлення та заземлення на датчику підключені до відповідних портів на платі й становить 5V.

Відповідність виходів датчика та плати наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Підключення датчика до плати обробки інформації

MPU-6050 GY-521	GND	VCC	SDA	SCL
Arduino Nano	GND	+5V	A4	A5

Для наочності було розроблено схему підключення у програмі Fritzing, результати якої подані на рисунку 2.2.

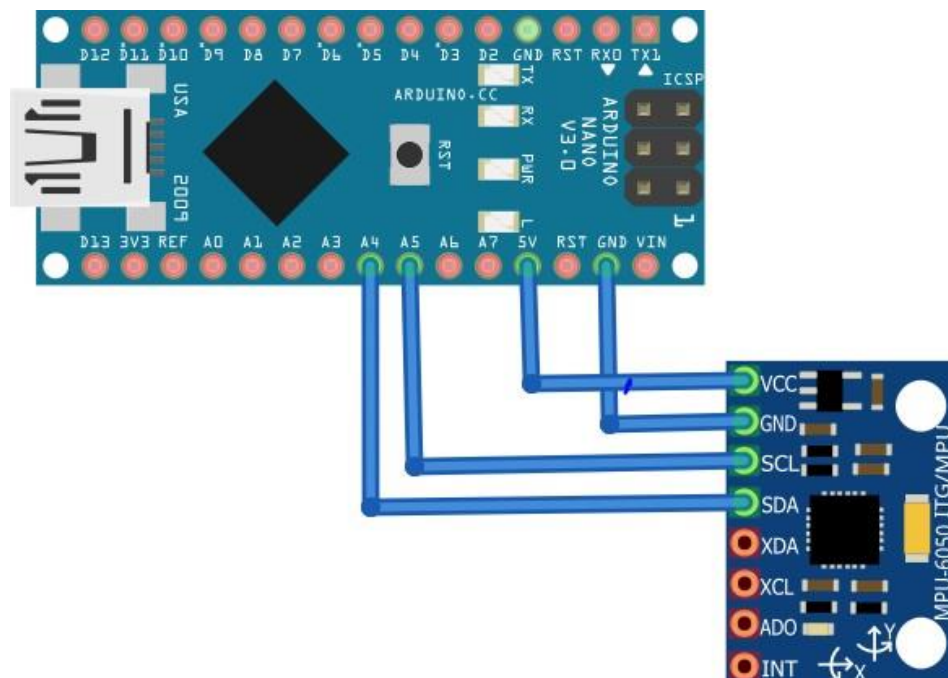


Рисунок 2.2 – Схема підключення датчика і плати обробки інформації

2.2 Розробка системи команд для керування рухом

Під час розробки системи керування МР попередньо було визначено множину дій, для яких він призначений або запрограмований. Оскільки система, що розробляється, повинна бути універсальною (може використовуватися для різноманітних мобільних роботів), то з'являється сенс щодо завдань універсальних команд тільки для керування рухом робота, тому що кожен робот уже має власний функціонал і власне призначення. До множини універсальних команд додамо: рух вперед, рух назад, зупинка, поворот праворуч на 45°, поворот ліворуч на 45°, поворот праворуч на 90° та поворот ліворуч на 90°. Кожну з команд оператора потрібно попередньо визначити та провести машинне навчання системи щодо її розпізнавання.

Щоб досягти високої точності розпізнавання команд оператора, необхідно провести досить велику кількість експериментальних фіксацій значень з датчиків. Під час машинного навчання системи точність розпізнавання команди оператора прямо залежить від розмірності вибірки. Оскільки датчик безперервно відправляє дані про стан системи захвату руху, то дані мають попередньо проходити процедуру фільтрації.

Запропонована система команд для керування рухом мобільного робота має тривимірний (трьохосьовий) характер. Усі команди, які будуть задаватися оператором, система сприйматиме як тривимірний вектор значень $\vec{a} = [x_n, y_n, z_n]$. На етапі машинного навчання кожна команда буде віднесена до певного класу команди. Наприклад, команду рух вперед можна подати як вектор $\vec{a} = [x_n, y_n, z_n]$, причому задати його можна як:

$$\vec{a}_1 = [x_n, y_n, z_n], \vec{a}_2 = [x_n, y_n, z_n] \dots \vec{a}_m = [x_n, y_n, z_n]. \quad (2.1)$$

Систему команд у вигляді класів та відповідних їм станів датчиків загальному вигляді наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Система команд у загальному вигляді

Клас команди	Команда у вигляді вектора значень датчиків
Рух вперед	$\bar{a}_1=[x_1,y_1,z_1], \bar{a}_2=[x_2,y_2,z_2] \dots \bar{a}_m=[x_m,y_m,z_m]$
Рух назад	$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$
Зупинка	$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$
Поворот ліворуч на 45°	$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$
Поворот праворуч 45°	$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$
Поворот ліворуч на 90°	$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$
Поворот праворуч 90°	$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$

Під час керування робот має передавати дані з датчика, а також інформацію щодо свого поточного стану чи процесу руху. Ця інформація має пройти процедуру фільтрації та пройти процес розпізнавання шляхом встановлення її приналежності до відповідного класу сигналів, які відповідають тій чи іншій команді. Систему станів мобільного робота у вигляді станів датчиків та відповідних ним класів стану робота у загальному вигляді наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Система класів стану робота у загальному вигляді

Стан датчиків у вигляді вектора значень	Клас стану робота
$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$	Робот рухається
$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$	Робот стоїть
$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$	Робот виконує поворот наліво
$1=[x_1,y_1,z_1], 2=[x_2,y_2,z_2] \dots m=[x_m,y_m,z_m]$	Робот виконує поворот наліво

У ході експериментів на основі методів машинного навчання виконано дослідження і класифікацію сигналів для кожної з команд і станів робота за даними, що надходили з датчиків. Таке навчання є ітераційним експериментальним процесом, що включає етапи:

- навчання системи командам оператора;
- навчання системи станам мобільного робота;
- навчання системи прийняттю рішень.

За основу цих процесів покладено розв'язання задач класифікації та розпізнавання.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ КОМАНД

3.1 Опис технічних засобів системи

Експериментальні дослідження були проведені із використанням колісного робота на базі Arduino Mega. Цей робот складається з таких компонентів: 4 двигуни постійного струму; драйвер двигунів на базі чипу L298N, 3-осьовий гіроскоп; акселерометр MPU-6050; 3 ультразвукових датчики HC-SR04. Джерелом живлення даного робота є портативний накопичувач електроенергії об'ємом 10200 mAh. Для зв'язку робота з комп'ютером, а також ПК з системою захвату рухів використовуємо два модулі Bluetooth HC-06 4pin RS232 TTL, та 2 кабелі типу USB-AB довжиною 3 м. Наочно мобільного робота представлено на рисунках 3.1 – 3.3.

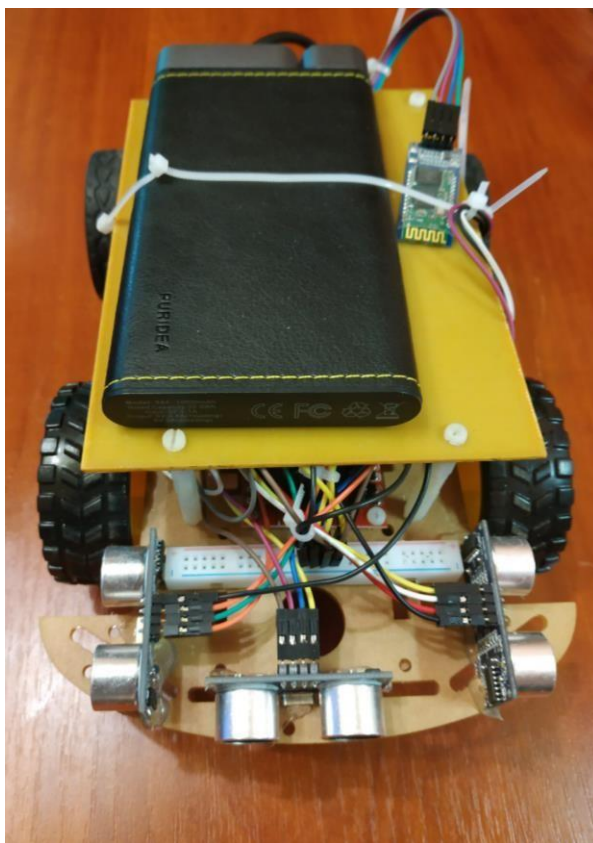


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд мобільного робота, проекція 1

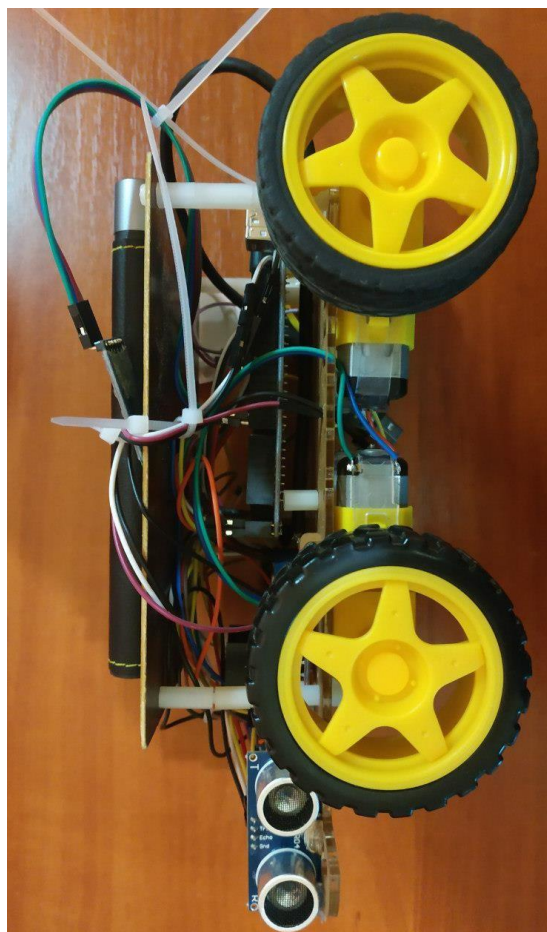


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд мобільного робота, проекція 2



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд мобільного робота, проекція 3

Обробка інформації проводилась на комп'ютері з такими технічними характеристиками:

- ОС Windows 10 Корпоративна;
- Процесор Intel Core i5-3230M з тактовою частотою 2,6-3,0 ГГц, у залежності від навантаження;
- ОЗУ 8Гб, фірми Samsung;
- SSD Kingston A400, об'ємом 240Гб;
- відеокарта Nvidia GeForce GT 750M.

Даний ПК було обрано через скорочення витрат на придбання інших компонентів, окрім тих, які вже придбані.

3.2 Планування експериментів з розробленою системою

Мета даної роботи полягає у розробці системи розпізнавання команд на основі технології захвату рухів для інтелектуального керування мобільним роботом.

Для отримання інформації щодо підвищення показника ефективності відносно інших систем необхідно провести низку експериментів. Кожен з цих експериментів дозволить оцінити як якість елементів розробленої системи, так і систему в цілому.

Для досягнення мети доцільно провести такі експерименти:

- порівняння проходження одним і тим же маршрутом МР, використовуючи автоматичне керування та керування за допомогою захвату руху оператора;
- вплив на якість керування системи зв'язку «Робот – Комп'ютер – Оператор» за допомогою бездротових та дротових технологій;
- вплив кількості команд на швидкість проходження траси мобільним роботом;
- вплив місцевості на якість розпізнавання команд із залученням бездротових технологій керування;
- вплив зміни оператора на якість розпізнавання команд.

Кожному з експериментів нами присвоєно номер відповідно до порядку, наведеного вище.

Для першого експерименту як головні показники якості було обрано час проходження лабіринту та максимальну відстань відхилення робота від маршруту. У випадку автоматичного керування як другорядні показники було обрано кількість разів зупинки алгоритму, а в режимі керування оператором – кількість випадків, коли система не реагує на команду. Для проведення першого експерименту використали підключення системи захвату руху оператора до ПК за допомогою дрота, а ПК до мобільного робота – через Bluetooth.

Для другого експерименту як головний показник якості обрали час виконання повного набору команд, а також кількість помилок розпізнавання.

Для третього експерименту як головний показник якості обрали час проходження маршруту із використанням різної кількості команд та кількості команд, які неправильно розпізнають алгоритм. Другорядними показниками обрали кількість разів, коли система не реагує на команду. Для проведення третього експерименту використали підключення системи захвату руху оператора до ПК за допомогою дрота, а ПК до мобільного робота – через Bluetooth.

Для четвертого експерименту як головний показник якості обрали кількість помилок розпізнавання команд та кількість випадків, коли система не реагує на команду оператора. Підключення всіх елементів виконали через Bluetooth.

Для п'ятого експерименту як головний показник якості обрали кількість помилок розпізнавання команд.

Машинне навчання системи розпізнавання було виконано за допомогою комбінованого стилю подачі команд оператора та адаптованого програмного забезпечення для автоматичного керування МР. Використання саме комбінованого стилю подачі команд оператора дозволило зменшити кількість рухів, які необхідні оператору для керування, має перевагу за показником точності розпізнавання.

Для подолання лабіринту у режимі автоматичного керування робот використовує інформацію про відстань, яка була надана з трьох ультразвукових датчиків, розташованих на його корпусі. Рух робота можна визначити за таким алгоритмом: виконання руху вперед та паралельна перевірка інформації про відстань з датчика, який розташований попереду (якщо відстань становить менше 10 см, то виконується зупинка); під час зупинки здійснюється перевірка інформації про відстань з датчиків, які розташовані ліворуч і праворуч (за результатами порівняння відстаней робот виконує поворот у той бік, де відстань більша та після завершення повороту виконує зупинку). Зупинка робота після завершення проходження лабіринту виконується у ручному режимі. Недолік даного алгоритму руху полягає у можливості його зупинки, яка виникає, якщо: інформація про відстань з датчиків, які розташовані ліворуч і праворуч, співпадає (робот потрапляє в кут); робот у разі відхилення від маршруту зблизиться зі стіною та не зможе виконувати рух протягом 3 секунд.

Для отримання достовірних результатів було проведено десять експериментів, оскільки результати, які були отримані під час одноразового виконання експерименту, можуть піддаватися випадковим впливам. Для отриманих результатів розрахувати середні значення параметрів руху можна за формулою:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n). \quad (3.1)$$

На першому етапі виконання експерименту використали режим автоматичного керування. Отримані результати та розрахунок середніх значень параметрів руху за формулою (3.1) для них наведено у таблиці 3.1.

На другому етапі проведення експерименту виконали налаштування робота на режим керування оператором та використали цей режим для проведення експерименту. Отримані результати та розрахунок середніх значень параметрів руху МР за формулою (3.1) для них наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 Результати експерименту в режимі автоматичного керування

№	Час проходження лабіринту, с	Максимальне відхилення від маршруту, см	Кількість зупинок алгоритму
1	163	12	1
2	155	9	1
3	189	16	2
4	166	13	1
5	159	11	0
6	181	15	1
7	184	14	2
8	175	13	1
9	171	12	1
10	177	13	1
Середнє значення	172	12,8	1,1

Таблиця 3.2 – Результати експерименту в режимі керування оператором

№	Час проходження лабіринту, с	Максимальне відхилення від маршруту, см	Кількість випадків не реагування на команду
1	167	10	4
2	174	16	4
3	165	9	3
4	170	12	3
5	172	12	4
6	160	8	1
7	166	10	3
8	171	11	4
9	163	10	2
10	160	10	2
Середнє значення	166,8	10,8	3

Використання режиму керування оператором має переважати за показниками часу проходження лабіринту та максимального відхилення від маршруту. Для проходження лабіринту, за умови безпомилковості розпізнавання, оператор мав подати системі 18 команд. Відповідно до результатів експерименту в середньому оператору доводилось подавати 21 команду. Проведемо розрахунки щодо відхилення розпізнавання від випадку безпомилковості:

$$\partial = \frac{21 \times 100}{18} - 100\% = 16,7\%.$$

Відхилення розпізнавання в 16,7% є складеним з вектора похибок:

$$\vec{\partial} = [\partial_{p.c.}, \partial_{n.d.}, \partial_{z.c.}], \quad (3.2)$$

де $\partial_{p.c.}$ – похибка розпізнавання системи;

$\partial_{n.d.}$ – похибка передачі даних на основі бездротових технологій;

$\partial_{z.c.}$ – похибка зайнятості систем

Для оцінки якості проведемо розрахунки ідеальних значень показників. Довжина прямої ділянки становить 2 м, для повороту необхідно 30 см, зупинка виконується ментально. За схемою лабіринту (рисунок 3.4) вирахуємо відстань ідеального маршруту, враховуючи особливості роботи:

$$6 \times 2 + 3 \times 0,3 + 3 \times 0,3 = 13,8 \text{ м.}$$

Швидкість мобільного робота становить 0,1 м/с. Для ідеальних умов повинен бути відсутнім показник максимального відхилення робота від маршруту. Без врахування часу розгону і зупинки для подолання маршруту роботу необхідно:

$$13,8 / 0,1 = 138 \text{ с.}$$

Для подолання маршруту в автоматичному режимі система має виконати 5 команд, а в режимі керування оператором – 18 команд керування. Час для прийняття рішення і вказівки команди керування становить 1 с. Проведемо розрахунки ідеального часу проходження маршруту з урахуванням часу керування:

$$T_1 = 138 + 18 \times 1 = 156 \text{ с,}$$

$$T_2 = 138 + 5 \times 1 = 143 \text{ с.}$$

Порівняємо ідеальне значення часу проходження лабіринту з результатами, які отримали експериментальним шляхом. Розрахуємо відхилення:

$$\Delta_{p.k} = \left| 100\% - \frac{166,8 \times 100}{156} \right| = 6,923\%,$$

$$\Delta_{a.k} = \left| 100\% - \frac{172 \times 100}{143} \right| = 20,279\%.$$

Згідно з розрахунками система за показником часу проходження лабіринту в режимі керування оператором має відхилення від ідеального значення в 6,923%, одночасно, використовуючи автоматичний режим керування відхилення становить 20,279%. Отже, використання режиму керування оператором більш ефективно, оскільки результати за показником часу проходження кращі у 2,9 рази. За показником максимального відхилення від маршруту система згідно з експериментальними даними має покращення під час використання режиму керування оператором на 20%, що складає приблизно 2 см.

Проведення другого експерименту розподілили на декілька етапів. Першочергово було виконано підключення частин системи за допомогою дротових технологій. Для підвищення достовірності результатів було проведено 10 експериментів. Для отриманих результатів розраховано середнє значення за формулою (3.1). Робот здійснив повний набір команд (рух вперед, поворот ліворуч, поворот праворуч, зупинка, рух назад, розворот на 360 ліворуч, розворот на 360 праворуч), час виконання яких та кількість похибок розпізнавання подані у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати експерименту з використанням дротових технологій

№	Час виконання повного набору команд, с	Кількість похибок розпізнавання
1	36	1
2	41	1
3	33	0
4	31	0
5	37	1
6	30	0
7	38	1
8	34	0
9	35	1
10	33	0
Середнє значення	34,8	0,5

На другому етапі експерименту робота підключили до ПК за допомогою дроту, а систему захвату руху до ПК – через Bluetooth.

На третьому етапі систему захвату руху до ПК приєднали за допомогою дроту, а робота до ПК – через Bluetooth. Час виконання повного набору команд та кількість похибок розпізнавання подані в таблиці 3.4.

На четвертому етапі підключення елементів відбулось за допомогою технології Bluetooth. Результати експерименту подані в таблиці 3.5.

Таблиця 3.4 – Результати експерименту з використанням комбінованих технологій підключення

№	Швидкість виконання повного набору команд, с		Кількість похибок розпізнавання	
	Другий етап	Третій етап	Другий етап	Третій етап
1	44	35	2	1
2	31	38	0	1
3	37	33	1	0
4	44	39	2	1
5	38	34	1	1
6	33	30	0	0
7	42	32	1	0
8	30	32	0	0
9	40	40	1	1
10	38	37	1	1
Середнє значення	37,7	35	0,9	0,6

Таблиця 3.5 – Результати експерименту з використанням технології Bluetooth

№	Швидкість виконання повного набору команд, с		Кількість похибок розпізнавання	
	Другий етап	Третій етап	Другий етап	Третій етап
1	38		1	
2	36		1	
3	46		2	
4	39		1	
5	35		1	
6	38		1	
7	44		1	
8	38		1	
9	43		1	
10	48		2	
Середнє значення	40,5		1,2	

Результати розрахунків показників середнього часу виконання однієї команди за формулою (3.1) та похибки розпізнавання подано у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків

Вид підключення	Середній час виконання однієї команди, с	Похибка розпізнавання, %
Дротові технології	4,97	7
Комбінація технології №1	5,39	12,8
Комбінація технології №2	5	8,5
Бездротові технології	5,79	17

Під час використання дротових технологій похибка розпізнавання становить 7%, це є допустимим значенням, а під час використання бездротових технологій похибка збільшується більше ніж у два рази та становить 17%, що значно впливає на розпізнавання. Вирішити цю проблему можна шляхом використання комбінації технологій. У ході експериментальних досліджень добре себе проявила комбінація підключення ПК до системи захвату руху оператора – дротом, а робота з комп'ютером – через Bluetooth. Збільшення середнього часу виконання однієї команди відбулося лише на 0,03 с, це незначне відхилення, а похибка розпізнавання збільшилась на 1,5 %. Для покращення точності із застосуванням бездротових технологій необхідно використовувати модулі вищого класу, тому що вони є менш чутливими до впливу шумів навколишнього середовища. Під час використання модулів вищого класу збільшуватиметься їхня вартість, що призведе до зменшення економічного ефекту.

Для проведення третього експерименту побудували два види лабіринту зображених на рисунках 3.5–3.6. Для подолання лабіринтів прокладені маршрути з однаковою відстаню. Кількість команд для подолання другого лабіринту вдвічі більша ніж для першого. Систему захвату руху до ПК підключено за допомогою дроту, а робота до ПК – через Bluetooth. Для проходження першого лабіринту необхідно виконати таку кількість команд:

5 разів – рух вперед; 5 разів – зупинка; 2 рази – поворот ліворуч; 2 рази – поворот праворуч. Схему лабіринту подано на рисунку 3.5. Для проходження другого лабіринту необхідно виконати таку кількість команд: 10 разів – рух вперед; 9 разів – зупинка; 4 рази – поворот ліворуч; 4 рази – поворот праворуч. Схему лабіринту подано на рисунку 3.6. Результати та розрахунок середніх значень характеристик за формулою (3.1) для них наведено у таблиці 3.7.

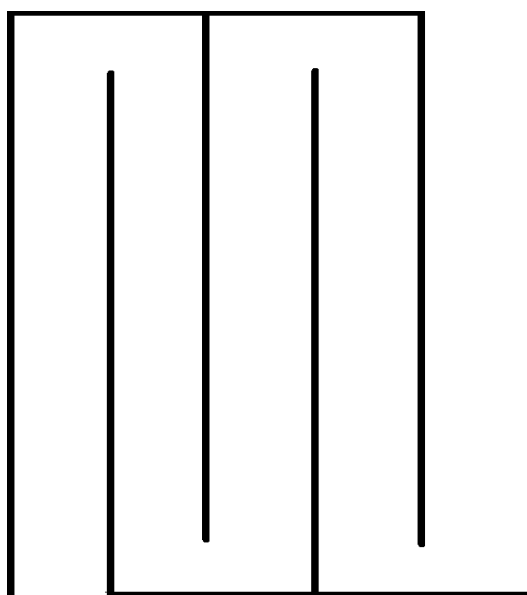


Рисунок 3.5 – Лабіринт 1 для експерименту №3

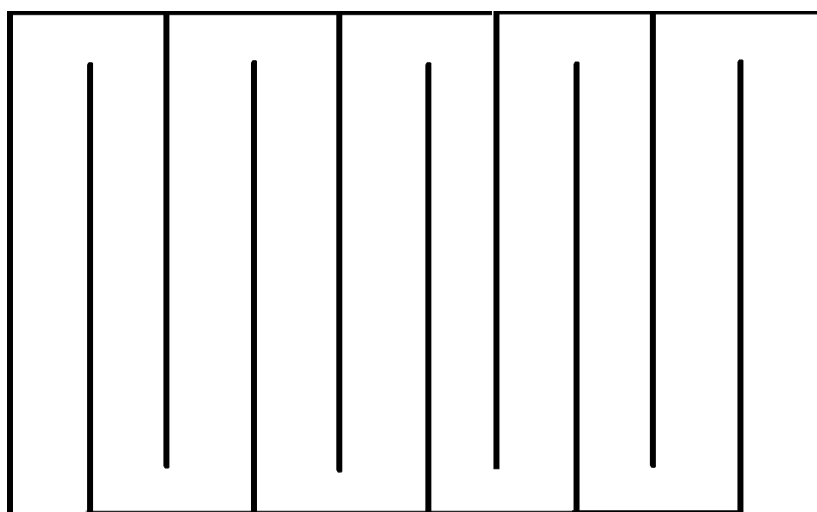


Рисунок 3.6 – Лабіринт 2 для експерименту №3

Таблиця 3.7 – Результати експерименту з використанням різної кількості команд

№	Час виконання повного набору команд, с.		Кількість похибок розпізнавання		Кількість випадків не реагування на команду	
	Перший лабіринт	Другий лабіринт	Перший лабіринт	Другий лабіринт	Перший лабіринт	Другий лабіринт
1	120	160	2	4	2	3
2	107	135	1	3	2	2
3	118	170	2	5	1	4
4	118	145	2	4	1	4
5	103	154	1	3	1	5
6	140	175	2	4	5	6
7	132	159	2	3	3	4
8	110	142	1	4	2	4
9	122	152	2	5	2	2
10	110	123	1	1	2	1
Середнє значення	118	151,5	1,6	3,6	2,1	3,5

За умови збільшення команд керування майже у 2 рази час проходження лабіринту в середньому виріс на 33,5 с, а кількість похибок розпізнавання – на 2, кількість випадків не реагування системи на команду – на 1,4. Таким чином, під час використання режиму керування оператором необхідно прокладати маршрут з мінімальною кількістю команд, тому що це дозволить збільшити точність розпізнавання.

Мета четвертого експерименту полягає у дослідженні впливу середовища на точність розпізнавання під час використання бездротових технологій. Підключення елементів системи виконано через Bluetooth. Обрали чотири середовища: приміщення з відсутніми джерелами сигналу; відкриту місцевість; приміщення з додатковими джерелами сигналу; два приміщення розділених стіною. У приміщенні з додатковими джерелами сигналу розмістили 4 додаткові джерела, що відповідали за передачу та

прийом сигналу між собою протягом проведення експериментальних досліджень. Робот виконував повний набір команд (рух вперед, поворот ліворуч, поворот праворуч, зупинка, рух назад, розворот на 360° ліворуч, розворот на 360° праворуч). Час виконання повного набору команд та кількість помилок розпізнавання наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати експерименту з використанням різних середовищ

№	Кількість помилок розпізнавання за середовищами				Кількість випадків не реагування на команду за середовищами			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	0	1	1	1	1	0	2	1
2	1	1	2	0	0	1	2	2
3	0	0	1	1	0	1	1	2
4	1	0	1	1	0	1	2	1
5	0	1	0	0	0	2	3	2
6	1	1	2	1	1	0	1	2
7	0	0	1	1	0	1	1	2
8	1	1	0	1	0	1	3	1
9	0	0	2	1	0	1	2	2
10	0	1	2	1	1	2	2	1
Середнє значення	0,4	0,6	1,2	0,8	0,3	1	1,9	1,6

За результатами експерименту можна зробити висновок, що на якість розпізнавання впливають додаткові джерела сигналу. За показником кількості помилок розпізнавання результати погіршились у 3 рази, а значення показника кількості випадків не реагування на команди – більше ніж у 6 разів. З метою покращення результатів можливе використання бездротових технологій передачі інформації, які працюють на нестандартних частотах.

Для п'ятого експерименту підключення системи захвату руху до ПК виконали за допомогою дроту, а робота до ПК – через Bluetooth. Оператор по черзі задавав повний набір команд 10 разів. Команд подавалися двома різними операторами. Рухи одного оператора використовувались для формування навчальної вибірки, а другий оператор копіював рухи першого. Результати експерименту та розрахунок середнього значення за формулою (3.1) наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати експерименту з заміною оператора

№	Кількість похибок розпізнавання, оператор №1	Кількість похибок розпізнавання, оператор №2
1	1	8
2	0	7
3	0	9
4	1	8
5	1	10
6	1	11
7	2	10
8	1	12
9	2	10
10	2	12
Середнє значення	1,1	9,7

Проведемо розрахунки значення точності розпізнавання за формулою (2.20) для операторів №1 і №2:

$$accuracy_{on. \text{ №1}} = \frac{68,9 \times 100}{70} = 98.4\%,$$

$$accuracy_{on. \text{ №2}} = \frac{60,3 \times 100}{70} = 86.1\%.$$

За результатами розрахунків виходить, що зміна оператора призвела до погіршення показника точності розпізнавання на 12,3%. Значення показника можна покращити, якщо для формування навчальної вибірки залучати декількох операторів, які мають власний стилями подачі кожної команди.

3.4 Оцінка ефективності розробленої системи

Для оцінки ефективності режиму керування оператором необхідно розрахувати витрати. Витрати на розробку і створення системи захвату рухів подамо як:

$$K = K_1 + K_2, \quad (3.3)$$

де K_1 – витрати на придбання компонентів макету;

K_2 – витрати на заробітну плату розробнику.

Витрати на оплату праці розробнику проекту визначимо за формулою:

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M n_{ij} t_{ij} C_{ij}. \quad (3.4)$$

де n_{ij} – кількість розробників i -ої спеціальності j -го тарифного розряду, які беруть участь в проектуванні, чол.;

t_{ij} – час, який затрачений на розробку проекту i -ої спеціальності j -го тарифного розряду, днів;

C_{ij} – денна заробітна плата i -ої спеціальності j -го тарифного розряду, грн.

Витрати на придбання компонентів макету та розрахунок загальної суми за цим показником подані у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Витрати на придбання компонентів

Назва компоненту	Ціна, у.о.
Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P	138
Акселерометр и гіроскоп MPU-6050 модуль 6DOF	59
USB 2.0 кабель Am-Bm 1.5м ATCom	39
Комплект перемичок довжиною 200мм.	50
Загальна сума	286

Розрахуємо денну заробітну плату для особи, яка є магістрантом і має середньомісячну заробітну платню 1371,94 у.о., у тому числі й відрахування до спеціальних державних фондів:

$$C = 1371,94 \div 26 = 52,77 \text{ у.о.}$$

За формулою (3.4) розрахуємо витрати на заробітну платню:

$$Z = 1 \times 20 \times 52,77 = 1055,34 \text{ у.о.}$$

Витрати на розробку і створення системи захвату рухів розрахуємо за формулою (3.3):

$$K = 286 + 1055,34 = 1341,34 \text{ у.о.}$$

Витрати, необхідні на придбання компонентів макету для автоматичного режиму керування, та розрахунок загальної суми за цим показником подані у таблиці 3.11.

Для використання режиму автоматичного керування розрахуємо витрати за формулою (3.3):

$$K = 161 + 1055,34 = 1216,34 \text{ у.о.}$$

Таблиця 3.11 – Витрати на придбання компонентів

Назва компоненту	Кількість, шт.	Ціна, у.о.
Ультразвукові датчики відстані HC-SR04	3	37
Комплект перемичок довжиною 200мм.	1	50
Загальна сума		161

Для оцінки ефективності результати отриманих розрахунків та експериментальних досліджень підпункту 3.3 подано в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Оцінка ефективності

Назва режиму керування	Витрати, у.о.	Час проходження лабіринту, с	Максимальне відхилення від маршруту, см
Автоматичний режим керування	1216,34	172	12,8
Режим керування оператором	1341,34	166,8	10,8

Усі критерії під час проведення оцінки ефективності необхідно мінімізувати. Згідно з таблицею 3.11 під час використання автоматичного режиму керування за 125 у.о., ми маємо погіршення показника час проходження на 5,2 с, а максимальне відхилення від маршруту зростає на 2 см. Для покращення результатів необхідно застосувати інфрачервоний датчик відстані вартістю 163 у.о., тоді витрати на придбання дорівнюватимуть 539 у.о. Загальні витрати на розробку системи з використанням інфрачервоного датчика відстані розрахуємо за формулою (3.3):

$$K=539+1055,34=1594,34 \text{ у.о.}$$

За даними розрахунками виходить, що використання керування за допомогою системи захвату руху оператора на 125 у.о. дорожче за використання автоматичного режиму керування, що ґрунтується на ультразвукових датчиках відстані, проте якість керування у такому випадку згідно з таблицею 3.11 значно погіршиться. Для досягнення вищої точності керування необхідно використовувати інфрачервоні датчики відстані, відповідно до проведених розрахунків вартість застосування системи керування становитиме 1594,34 у.о., це на 313 у.о. дорожче за використання режиму керування, що оснований на системі захвату руху оператора.

3.5 Охорона праці

Робота в лабораторії проводиться зі спеціалізованим обладнанням та спеціальними стендами (роботами, маніпуляторами тощо). Крім того, лабораторія обладнана персональними ПКми. Приміщення має розміри: довжина – 18 м, ширина – 12 м, висота – 4 м, загальна площа – 216 м² і обсяг – 864 м³. У приміщенні працює 15 осіб. Приміщення, виходячи з норм і вимог ДСанПиН 3.3.2.007-98 на окремі робочі місця, відповідає вимогам. На одного працівника припадає 14,4 м² площі і 57,6 м³ об'єму при нормі 6 м² і 20 м³ відповідно.

Як машина використовується персональний комп'ютер, середовище – лабораторія кафедри КІТАМ. Предмет праці – робота із спеціалізованими лабораторними макетами.

Можна визначити перелік потенційно небезпечних шкідливих чинників за ДСТУ 12.0.003-74 в лабораторії.

До фізичних ОВПФ належать:

– підвищена або знижена температура повітря, вологість і рухливість.

Джерелами є люди, ПЕОМ, джерела світла;

– недостатня освітленість робочої зони. Джерелом є малі світлові прорізи, неправильно вибране штучне освітлення.

До психофізіологічних належать:

- статичні фізичні перевантаження. Джерелом є тривале перебування в одній позі. Знижується працездатність, розвивається стомлення, емоційні перевантаження в окремих випадках можуть бути причиною стресу;
- розумове перенапруження. Джерелом є обробка великої кількості інформації
- перенапруження зорових аналізаторів. Джерелом є робота з дисплеєм;
- емоційні перевантаження. Виникають при розв'язанні наукових завдань і при спілкуванні людей.

Домінуючий чинник – недостатня освітленість робочої зони.

Для електрозабезпечення обладнання прокладена трифазна чотирипровідна мережа з глухозаземленою нейтраллю напругою 220/380 В, змінний струм частотою 50 Гц.

Згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 конструкторський відділ можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, оскільки в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку. Інші ознаки, за якими приміщення можна віднести до категорії з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних, відсутні.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести низку організаційних і технічних заходів. Згідно з НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом у приміщенні застосовується система занулення.

Відповідно до вимог НПАОП 0.00-4.12-05 необхідно провести вступний, первинний на робочому місці, повторний, цільовий та позаплановий інструктаж. Зміст інструктажу відповідає вимогам.

НПАОП 0.00-4.12-05. Інструктаж зазначається у відповідних журналах з підписами тих що інструктуються і інструктора [18].

Робота в лабораторії КІТАМ виконується сидячи і не вимагає фізичної напруги. Тому вона належить до категорії Іа (легкі фізичні роботи, енерговитрати до 120 ккал/ч).

З метою забезпечити комфортні умови для працівників і відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 у відвідувані встановлені наступні метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

- температура повітря від 22 до 24 °С;
- вологість повітря від 40 до 60 %;
- швидкість руху повітря оптимальна 0,1 м/с.

б) для теплого періоду року:

- температура повітря від 23 до 25 °С;
- вологість повітря від 40 до 60 %;
- швидкість руху повітря оптимальна 0,1 м/с.

Для освітлення робочих місць і приміщення в цілому застосовується як природне бічне освітлення, так і штучне освітлення.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення» [18]. Природне світло повинно проникати через бічні світлопройоми, зорієнтовані, як правило, на північ чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КЕО) не нижче 1,5%:

$e^{IV} = 1.35$, де $e^{IV}_{\text{норм}}$ – нормоване значення КЕО для 4-го поясу світлового клімату.

Згідно ДСН 3.3.6.037-99 рівень шуму в лабораторії кафедри КІТАМ не перевищує 50 ДБ.

Загальний рівень штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, яка розраховується за формулою:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (3.5)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт.

Розрахуємо загальну потужність освітлювальної установки:

$$W_{\Sigma} = W_{осв.} \times n_{осв.}, \quad (3.6)$$

де $W_{осв.}$ – потужність одного світильника Вт;

$n_{осв.}$ – кількість світильників у приміщенні.

Розглянуте приміщення має площу 216 м², в якому розташовано 10 світильників потужністю 100 Вт.

Розрахуємо загальний рівень штучного освітлення та загальну потужність освітлювальної установки за формулами (3.5) – (3.6):

$$W_{\Sigma} = 10 \times 100 = 1000 \text{ Вт};$$

$$W = \frac{1000}{216} = 4,63 \text{ Вт / м}^2.$$

Табличне значення для отриманого результату освітленості становить менше 200 лк за ДБН Ст. 2.5-28-2006. У лабораторії освітленість повинна бути 300 лк, оскільки триває робота, у тому числі з дрібними деталями. Для отримання освітленості в 300 лк необхідна питома потужність 6,8 Вт/м². Для цього потрібно збільшити кількість світильників до 15 з потужністю 100 Вт.

За НАПБ Б. 03.001-2004 приміщення лабораторія належить до категорії Ст. Згідно ДБН Ст. 1.1.7-2002 будівля має I ступінь вогнестійкості. Дане приміщення належить до зони класу П-Па по НПАОП40.1-1.01-97, оскільки це виробниче приміщення, є меблі з дерева і ДВП.

Згідно з вимогами НАПБ Б. 03.001-2004 в приміщенні встановлено 5 вуглекислотних вогнегасників ВВК-1,4 (з розрахунку один на 3 ПК), які застосовуються для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою. У відповідності з НАПБ Б. 03.001-2004 вони пофарбовані в яскраво-червоний колір і перебувають у легкодоступному місці, при виході з приміщення

Лабораторія КІТАМ обладнана системою автоматичної пожежної сигналізації з застосуванням не менше трьох димових датчиків ДІП-1, згідно з ДБН Ст. 2.5-13-98.

Організаційні заходи пожежної профілактики:

- навчання персоналу правилам пожежної безпеки;
- паспортизацію речовин, матеріалів, виробів, технічних процесів і об'єктів, зокрема забезпечення пожежної безпеки [18].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто задачу керування мобільним роботом, для розв'язання якої було розроблено систему розпізнавання команд на основі технології захвату рухів.

На початку дослідження проведено огляд сучасного стану проблеми віддаленого керування мобільними роботами. Під час використання роботів, зокрема, у шкідливих чи небезпечних для людини умовах, з'являється необхідність щодо віддаленого спостереження та керування ними. Проаналізувавши сучасний стан проблеми віддаленого керування мобільними роботами, ми виявили, що сучасні мобільні роботи є складними системами з нечіткою логікою; популярні системи керування МР повинні мати змогу проводити захвати рухів оператора, при цьому отримувати інформацію з датчиків, проводити фільтрацію даних та мати змогу приймати рішення в умовах невизначеності та випадкових збурень, недостатньої інформації про навколишнє середовище. Такі системи достатньо затратні, тому потребують удосконалення за рахунок розробок інтелектуальних технологій і засобів керування.

За результатами огляду сучасних систем керування для дослідження було обрано систему розпізнавання команд для інтелектуального керування МР на основі технології захвату руху оператора. Для її реалізації використано машинне навчання та розроблено власну універсальну систему команд для руху мобільного робота.

Виконано машинне навчання системи розпізнавання команд оператора. Досліджено вплив різних стилів подачі команд за точністю розпізнавання, за результатами якого визначено, що під час використання лише зап'ястя для подачі команд точність розпізнавання становить 97,4%, отже, не відповідає вимогам ТЗ. Для досягнення необхідної точності використано рух усієї руки, точність розпізнавання дорівнювала 99,5%, але велика кількість рухів може

спричинити перевтому оператора. Для вирішення цієї проблеми розроблено комбінований стиль подачі команд: використання рухів не лише зап'ястя, але й усієї руки. Таке комбінування призвело до покращення за показником точності розпізнавання, яка становила 99,6%, та знизило навантаження на оператора для подачі команд.

Проведені експерименти з розробленою системою розпізнавання команд на основі технології захвату рухів оператора виявили, що використання режиму керування оператором має перевагу у точності та швидкості керування над автоматичним режимом.

Розроблену систему розпізнавання команд для дистанційного керування МР доцільно використовувати за умов неповної визначеності технологічних ситуацій, а також в умовах, які шкідливі чи небезпечні для людини, зокрема, галузях виробництва, цивільного захисту, оборони.

Напрямки подальших досліджень даної галузі можуть полягати в інтеграції розробок в інтелектуальних системах керування МР, технічному вдосконаленні системи шляхом розробки (використання) більш прецензійних датчиків, подальшого розширення системи команд.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, Р.В. Артюх, Н.П. Демська, В.В. Євсєєв, О.І. Филипченко, О.М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 50 с.

2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : навч. посіб. / за ред. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2016. 320 с.

3. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

4. Невлюдов І.Ш. Основи наукових досліджень / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг : КК НАУ, 2017. – 344 с.

5. Навігація зрячого робота [Електронний ресурс] Режим доступу: [www/ URL: http://cofelis.ua/?page_id=46&page=3.html/](http://cofelis.ua/?page_id=46&page=3.html/) – 17.09.2018 р. – Загл. з екрану.

6. Piazzi A. and Bianco C. G. L. Quintic G2 – splines for trajectory planning of autonomous vehicles / A. Piazzi and C. G. L. Bianco, – 2017. – 625 с.

7. Невлюдов І.Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипченко, Б.О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. – 244 с.

8. Аналітичні технології для прогнозування та аналізу даних [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу : http://www.neuroproject.ru/forecaSting_tutorial.php. – 30.10.2020 р.

9. Yong L. Robotics and Autonomous Systems / L. Yong, J. Jim Zhu, – U: Ohio Design Center. – 2018. – 480 с.

10. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

11. Діагностика та контроль робочих процесів: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної та дистанційної форм навчання / В. М. Доля – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 129 с.

12. Інтернет-магазин "Ардуїно в Україні" – продаж Arduino, Raspberry Pi, мікрокомп'ютерів у Києві та Україні // Інтернет-магазин URL : <https://arduino.ua/> (дата звернення: 10.11.2021).

13. Капустий Б.Е., Русин Б.П., Таянов В.А. Оптимізація класифікаторів за умов малих вибірок // Автоматика та обчислювальна техніка. 2016. № 5. С. 25-32.

14. Капустий Б.Е., Русин Б.П., Таянов В.А. Математична модель систем розпізнавання з малими базами даних // Проблеми управління та інформатики. 2017. № 5. С. 142-151.

15. Fierro, R., and F. L. Lewis. Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics // Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA. – 2020. – P. 3805 –3810.

16. Діаграма розсіювання // Каталог візуалізації даних URL: https://datavizcatalogue.com/RU/metody/diagramma_rassejanija.html (дата звернення: 21.11.2021).

17. Баженов Д. Оцінка класифікатора (точність, повнота, F-мера) // Суворая реальність URL: <http://bazhenov.me> (дата звернення: 10.12.2021).

18. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Організація керування умовами праці" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.