

УДК 004.896

УКПП

№ держреєстрації 0120U100419

**Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля**

Кафедра комп'ютерних наук та інженерії

просп. Центральний, 59А, м. Северодонецьк, Луганська обл., 93406,

тел./факс: (06452)4-03-42



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Проректор з наукової  
роботи**

**О.Б. Целищев**

**ЗВІТ**

**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ**

**(остаточний)**

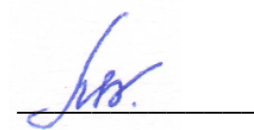
Науковий керівник НДР:  
доцент кафедри  
комп'ютерних наук та  
інженерії СНУ ім. В.Даля,  
к.т.н., доцент

**М.В. Деркач**

2023

## СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР:  
доцент кафедри  
комп'ютерних наук та  
інженерії СНУ ім. В.Даля,  
к.т.н., доцент



М.В. Деркач

Відповідальний виконавець:  
лаборант кафедри  
комп'ютерних наук та  
інженерії СНУ ім. В.Даля,  
здобувач вищої освіти



Д.С. Матюк

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 60 с., 1 ч., 4 табл., 21 рис., 22 джерела.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, НАВІГАЦІЯ, УЛЬТРОЗВУКОВИЙ ДАТЧИК,  
АЛГОРИТМ, ФІЛЬТР КАЛМАНА, ЛОКАЛІЗАЦІЯ, ПЕРЕШКОДА

Об'єкт дослідження – методи навігації мобільного робота на колісному ході.

Мета роботи - дослідити методи навігації мобільних роботів на підставі розробки мобільного робота з автономним управлінням напрямком руху, завдяки застосуванню ультразвукових датчиків.

Методи дослідження - проведені в роботі дослідження базуються на методах теорії прогнозування та статистичного аналізу, теорії управління та навігації систем, теорії ймовірностей і математичної статистики.

Проведено аналіз сучасного стану впровадження роботехнічних систем в залежності від галузі застосування. Виділені типи систем управління роботехнічних систем та сенсори роботів, а саме фізичні принципи роботи, засоби і класифікацію. Розглянуті основні характеристики та алгоритми локалізації, зокрема імовірнісна локалізація, фільтр частинок, метод потенціального поля, алгоритм блукаючої точки, алгоритм сімейства Bug. Досліджені наступні методи навігації: алгоритм Дейкстри, метод, заснований на використанні графу взаємовидимих позицій, та алгоритм A\*.

В ході виконання науково-дослідної роботи розроблено мобільний робот, удосконалено його локалізацію та виявлення перешкод за рахунок використання фільтру Калмана, а також встановлено залежність точності локалізації від температури повітря в приміщенні, де відбувається тестування мобільного робота. Розроблено метод навігації, що базується на розташуванні мобільного робота, який здатний автоматизувати рух мобільного робота, що дозволяє йому сприймати навколишнє середовище й орієнтуватися в ньому, тим самим забезпечує змістовну поведінку і виконання функціональної роботи мобільного робота за допомогою своїх "інтелектуальних" можливостей.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ПЕРЕДМОВА .....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ .....	9
1.1 Огляд сучасного стану впровадження роботехнічних систем в залежності від галузі застосування .....	9
1.2 Типи систем управління роботехнічних систем .....	15
1.3 Сенсори роботів - фізичні принципи роботи, засоби і класифікація ....	20
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ В РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ .....	27
2.1 Основні характеристики локалізації .....	27
2.2 Алгоритми локалізації.....	30
2.2.1 Імовірнісна локалізація.....	31
2.2.2 Фільтр частинок.....	31
2.2.3 Метод потенційного поля.....	32
2.2.4 Алгоритм блукаючої точки .....	33
2.2.5 Алгоритми сімейства Bug.....	33
2.3 Алгоритми навігації.....	34
2.3.1 Алгоритм Дейкстри.....	35
2.3.2 Метод, заснований на використанні графа взаємовидимих позицій ...	35
2.3.3 Алгоритм A* .....	36
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО РОБОТА .....	38
3.1 Компоненти мобільного робота.....	38
3.2 Локалізація мобільного робота .....	41
3.2.1 Принцип дії ультразвукових датчиків відстані.....	42
3.2.2 Застосування ультразвукових датчиків для локалізації мобільного роботу .....	43

3.2.3 Фільтр Калмана .....	45
3.2.4 Результати тестування .....	48
3.2.5 Залежність точності локалізації мобільного робота від температури повітря в приміщенні .....	49
3.3 Метод управління рухом .....	52
3.3.1 Алгоритм управління рухом, ґрунтуючись на розташуванні мобільного робота .....	52
3.3.2 Результати використання розробленого алгоритму .....	55
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	58

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

RLC	– Resistance, inductance, capacitance
DARPA	– Defense Advanced Research Projects Agency
БПЛА	– Безпілотні літальні апарати
ПЗП	– Постійний запам'ятовувальний пристрій
ПЗЗ	– Пристрій з зарядовим зв'язком
КМОП	– Комплементарний метало-оксидний напівпровідник
АЦП	– Аналого-цифровий перетворювач
MCL	– Monte Carlo Localization
GKF	– Gradient Kalman Filter
MAE	– Mean absolute error
MAPE	– Mean absolute percentage error
RMSE	– Root-mean-square error
APE	– Absolute percentage error

## ПЕРЕДМОВА

В останні роки великий інтерес для дослідників представляють автономні мобільні роботи, а саме задача управління рухом мобільних колісних роботів.

Автори роботи [1] зосереджені на внутрішній системі локалізації робота на основі ультразвуку. Запропоноване рішення - це вимірювання положення роботів, обчислених за допомогою формул триангуляції.

Алгоритм, розроблений в роботі [2], дозволяє визначати положення роботів у кожний момент часу, використовуючи положення орієнтирів. Алгоритм враховує асинхронні кроки часу та розрізнені дані вимірювань для розробки його оцінок.

Система оцінки координат автоматизованих керованих транспортних засобів обговорюється в роботі [3]. Для вимірювання відстані застосовували ультразвукові хвилі. Система була протестована на колісному мобільному роботі в середовищі моделі 2D.

Автори роботи [4] запровадили новий підхід до навігації наземних транспортних засобів за допомогою дуже дешевого ультразвукового датчику та розширеного фільтру Калмана, що зменшило середню квадратичну помилку.

Існує багато інших цікавих алгоритмів уникнення перешкод. Деякі з них підходять для роботи у режимі реального часу, серед них підходи, засновані на нечіткій логіці [5], зоровій навігації [6-7] тощо.

Однак більшість алгоритмів навігації роботів покладаються на важкі та енергоємні датчики. Як наслідок, цим роботам потрібні потужні обчислювальні одиниці для встановлення на борту.

## ВСТУП

Актуальність роботи обумовлена стрімким розвитком сучасної мікропроцесорної техніки, що забезпечує сприятливі умови для розвитку величезної кількості областей: медицина - глюкометри, інсулінові помпи, монітори тиску / пульсу / крові, вимірювачі холестерину; лічильники газу, тиску, води, температури; вимірювальні прилади - мультиметри, RLC-метри; сигналізація - центральні модулі, датчики задимлення / руху / відкриття, електронні клапани водопостачання, електронні замки, радіобрелоки сигналізації; промислова автоматизація - провідні та безпроводні датчики, приводи, драйвери і контролери виконавчих механізмів; радіокеровані моделі та бездротові телефони, джойстики та маніпулятори, годинники та дзвінки, іграшки та інші. Наряду з цим, не менш важливим прикладом мікропроцесорної техніки можна вважати розробку мобільних роботів, основним завданням яких є орієнтування в просторі. Мобільний робот - автоматична машина, яка передбачає наявність рухомого шасі з керованими приводами. Найбільш поширеними мобільними роботами є чотириколісні роботи. Завдання управління рухом мобільних колісних роботів крім теоретичного набувають останнім часом все більше практичне значення в різних областях техніки. Спектр вирішуваних завдань при цьому виявляється дуже широким: від ігрових завдань до спеціальних завдань забезпечення безпеки.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

### 1.1 Огляд сучасного стану впровадження робототехнічних систем в залежності від галузі застосування

На сьогоднішній день область робототехніки охоплює досить широкий клас машин, починаючи від найпростіших іграшок до повністю автоматизованих виробництв (автоматично керована електростанція, безпілотні космічні кораблі, автоматичні підводні апарати, системи, що грають в шахи - всі ці системи можна вважати роботами).

Робот можна визначити як універсальний автомат для здійснення механічних дій, подібних тим, які виробляє людина, яка виконує фізичну роботу. Створення "розумних" роботів пов'язано, як правило, з наданням їм людських якостей. Це здатність розпізнавати образи, брати участь в ігрових операціях, ставити завдання і приймати рішення.

На рис.1.1 показана функціональна схема робота. Вона включає виконавчі системи - маніпуляційну (один або кілька маніпуляторів) і пересування, якщо робот рухливий, сенсорну систему, що постачає робот інформацією про зовнішнє середовище, і пристрій керування. Виконавчі системи в свою чергу складаються з механічної системи і системи приводів. Механічна система маніпулятора - це зазвичай кінематичний ланцюг, що складається з рухомих ланок з кутовим або поступальним переміщенням, яка закінчується робочим органом у вигляді загартованого пристрою або якого-небудь інструменту.

З даного визначення випливає, що робот - це машина автоматичної дії, яка об'єднує властивості машин робочих і інформаційних, будучи, таким чином, принципово новим видом машин. У досить розвиненому вигляді роботи аналогічно людині здійснюють активну силову і інформаційну взаємодію з навколишнім середовищем і завдяки цьому можуть володіти штучним інтелектом і вдосконалювати його.

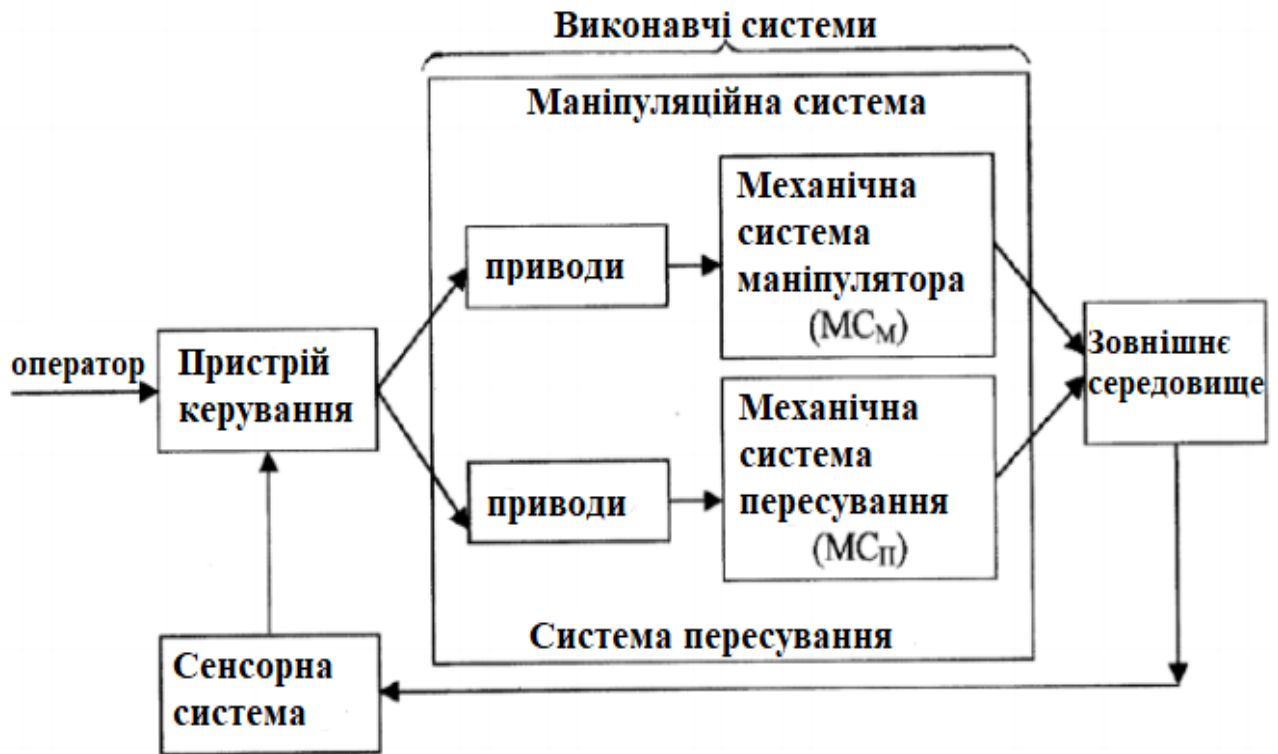


Рисунок 1.1 - Функціональна схема робота

При вирішенні проблеми створення роботів одним з природних шляхів є копіювання людини і живої природи взагалі. Однак не менш важливий і пошук принципово нових шляхів, які визначаються можливостями сучасної техніки. Приклад першого підходу – створення механічних рук шарнірного типу і захватних пристроїв з пальцями, що згинаються. Приклади другого підходу – використання електромагнітного поля для орієнтації і взяття предметів і, нарешті, колісний хід замість крокового. Аналогічні приклади можна знайти і стосовно сенсорних систем (створення «надчуттєвих» органів поряд з копіюванням органів чуття тварин). Від раніше відомих видів машин роботи принципово відрізняються своєю універсальністю (багатофункціональністю) і гнучкістю (швидким переходом на нові операції). Під універсальністю розуміється універсальність робочих органів робота і їх рухів, хоча сьогодні до універсальності руки людини роботам ще далеко.

Універсальність роботів дає можливість автоматизувати принципово будь-які операції, що виконуються людиною, а швидкість перебудови на виконання нових операцій при освоєнні нової продукції або інших змінах в виробництві

дозволяє зберегти за автоматизуються за допомогою роботів провадженням у принаймні ту ж гнучкість, яку на сьогодні мають лише виробництва, які обслуговуються людиною. Роботи тому і з'явилися лише в другій половині ХХ століття, що назріла необхідність в таких універсальних і гнучких засобах, без яких неможливо здійснити комплексну автоматизацію сучасного виробництва з його великою номенклатурою і частою змінюваності продукції, що випускається, включаючи створення гнучких автоматизованих виробництв.

Роботи отримали найбільшу поширення в промисловості і перш за все в машинобудуванні. Чи не менш широкі перспективи мають роботи в гірничодобувній промисловості, металургії та нафтової промисловості (обслуговування бурильних установок, монтажні та ремонтні роботи), в будівництві (монтажні, оздоблювальні, транспортні роботи), у легкій, харчовій, рибної промисловості.

Поряд з використанням в промисловості роботи застосовуються і в інших областях народного господарства і людської діяльності: на транспорті (включаючи створення крокуючих транспортних машин), в сільському господарстві, охороні здоров'я (протезування, хірургія - стерильна, дистанційна, обслуговування хворих і інвалідів, транспортування), в сфері обслуговування, для дослідження і освоєння океану і космосу і виконання робіт в інших екстремальних умовах (стихійні лиха, аварії, військові дії), в наукових дослідженнях.

Застосування роботів поряд з конкретним техніко-економічним ефектом, пов'язаним з підвищенням продуктивності праці, змінності роботи обладнання і якості продукції, є важливим засобом вирішення соціальних проблем, дозволяючи звільняти людей від важкої, небезпечної і монотонної праці.

Поява перших роботів дало потужний поштовх до розвитку таких напрямків, як машинний зір і розпізнавання зображень, побудова методів моделювання станів світу, побудова планів для послідовності дій та управління виконанням цих планів, управління роботою роботів в тривимірному просторі.

Інтелект роботів постійно підвищується зі створенням більш досконалих людино-машинних інтерфейсів. Істотно розширюється діапазон їх застосування.

*Промислові роботи* почали широко впроваджуватися в виробничу сферу в сімдесяті роки минулого століття. Ці роботи керувалися автоматично від систем числового програмного керування. Застосування елементів адаптації дозволило розширити можливості промислових роботів.

Згідно з дослідженнями, 1.5-кг мозок людини може виконувати близько 100 трильйонів операцій в секунду - майже втричі більше, ніж найпотужніший у світі комп'ютер Earth Simulator. Розвиваючись за законом Мура, машини можуть досягти такої обробної потужності. Однак, щоб бути досить корисним, роботу не потрібні всі можливості людського мозку. Навіть позбавлені людського розуму, роботи-андроїди займуть частину ринку. Sony, Honda і деякі інші японські компанії пропонують роботів-компаньйонів.

В даний час різні фірми ABB, STAUBLI, REIS, MOTOMAN, MITSUBISHI і інші виробляють промислових роботів для маніпулювання, зварювання, фарбування, упаковки, шліфування, полірування і т.д. З великим спектром застосування і по точності, і за характером виконуваних операцій.

Основними споживачами в області промислової робототехніки є автомобільна і електронна промисловість.

*Військові роботи.* Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) є основним дослідницьким центром Міністерства Оборони США. На сьогодні в рамках цієї організації проводиться дуже амбітна програма - створення армії роботів. Перехід до повноцінної робототехнічної армії має відбутися до 2025 року. Завдяки впровадженню роботів, з військових дій виключається найважливіший фактор - присутність на полі бою живих солдатів. Використовуючи супутниковий зв'язок, управління такою армією можна вести з будь-якої точки світу. Вже є в наявності безпілотні літаки, легке і середнє наземне озброєння. У найближчому майбутньому буде передбачений і варіант з важкою бронетехнікою нового покоління.

*Роботи – охоронці* в даний час починають широко використовуватися для забезпечення безпеки. Німецькі компанії Robowatch і Diehl BGT Defence розробили ASENDRO – модульного розвідувального робота, який стояв на варті Чемпіонату Світу по Футболу 2006, що проходив в Німеччині. Всього, під час Чемпіонату Світу, на Берлінському Олімпійському стадіоні одночасно було присутнє мінімум 20 таких машин.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) за останні роки почали застосовуватися в США для забезпечення внутрішньої безпеки країни - від патрулювання кордонів, портів, трубопроводів й інших стратегічних об'єктів до спостереження за населенням.

*Роботи для будинку* стають таким же атрибутом домашнього господарства, як телевізор або холодильник. Китайської компанії "Сіньсун" вдалося першою блиснути двома зразками таких "помічників по будинку".

Міністр інформації Південної Кореї повідомив, що в 2021 році ціна на робітників істотно знизилася завдяки тому, що Корея розробляє пристрої, вартість яких не входить програмне забезпечення. Роботи в змозі постійно тримати зв'язок з Інтернетом і управлятися потужними суперкомп'ютерами, на яких і встановлені необхідні програми.

До недавнього часу в роботобудуванні в Японії центральне місце займали роботи промислового і медичного призначення. Однак в останній час, за оцінками експертів, на перший план вийшла індустрія зі створення роботів-помічників людини. У зв'язку з цим, зазначають фахівці, до порядку денного входить завдання широкомасштабного дослідження проблеми співіснування людини і робота-помічника, включаючи її психологічні та соціальні аспекти. За підрахунками експертів, обсяг ринку "побутових роботів" в Японії до 2025 року досягне річного обсягу в 8 трлн. Ієн (\$ 70. млрд.).

*Роботи для ігор і розваг* з'явилися не так давно, але вже встигли стати популярними. У 2000 році корпорація Sony оголосила про створення нового покоління роботів-собак AIBO. За шість років AIBO завоював світову популярність і став одним з брендів компанії SONY.

Південнокорейська компанія Dasatech розробила роботизовану собаку Genibo. Корейський робопес вміє розпізнавати голосові команди і розуміє близько сотні слів.

*Роботи для медицини* стають невід'ємною частиною сучасних клінік. Хірургічна система da Vinci компанії Intuitive Surgical представляє собою прецизійний маніпулятор для лікарів. Вона коштує трохи більше 1 млн дол. і може просвердлити кістку або зробити надріз. Ця система точно управляє своїми рухами і «бачить» тривимірне зображення, що допомагає зробити хірургічну операцію набагато менш болючою. А це, в свою чергу, сприяє швидкому одужанню, полегшуючи і здешевлюючи процес лікування. Сьогодні в клініках застосовується 192 систем da Vinci.

В Японії починають широко використовувати домашніх роботів для догляду за хворими, а в клініках США вже застосовують машини для доставки реєстраційних карт, роздачі ліків і навіть проведення хірургічних операцій.

*Космічні роботи* проводять дослідження космосу та інших планет. Автоматичні міжпланетні станції, планетоходи для вивчення поверхні планет сонячної системи є по суті складними роботами. Велика затримка поширення радіосигналу практично виключає телеуправління в реальному часі, тому планетохід повинен вміти приймати рішення на місці, тобто володіти властивостями інтелектуального робота.

*Мобільні роботи* на колісному ході, призначені для виконання тільки транспортних операцій з перевезення вантажів (робокари), часто не мають маніпуляторів, а забезпечуються спрощеними одно- і двоступеневими вантажно-розвантажувальними пристроями або останні операції виконуються стаціонарними маніпуляторами, що знаходяться в місцях зупинки транспортних роботів.

Поки не можна сказати, що вже настала ера робототехніки, але еволюція технологій відкриває абсолютно нові можливості. Це пов'язано, зокрема, з концепцією Інтернету речей та ідеєю персоналізації технологій. Якщо в

минулому йшлося переважно про промислових роботів, то в 21 столітті все більший інтерес викликає масове виробництво персональної робототехніки.

## 1.2 Типи систем управління робототехнічних систем

За типами систем управління розрізняють роботів з програмним, адаптивним і інтелектуальним керуванням. Управління рухом по окремим ступенях рухливості може бути безперервним (контурним) і дискретним позиційним. В останньому випадку управління рухом здійснюють, задаючи кінцеву послідовність точок (позицій) і подальше переміщення по ним кроками від точки до точки без контролю траєкторій між цими точками. Найпростішим варіантом дискретного управління є циклічне, при якому кількість точок позиціонування по кожній ступені рухливості мінімально, тобто найчастіше обмежена двома – початковою і кінцевою.

В даний час розрізняють три ступені покоління роботів:

- Програмні. Перманентно задана програма (циклограма).
- Адаптивні. Вони мають можливість автоматично перепрограмувати (адаптуватися) в залежності від задачі і обстановки. Спочатку задаються основи програми дій.
- Інтелектуальні. Завдання вводиться у загальній формі, а сам робот володіє можливістю приймати рішення або планувати свої дії в невизначеній або складній обстановці, що їм розпізнається.

На сьогоднішній день інтелектуальні роботи вийшли з області чисто наукових розробок і стають такими ж необхідними елементами у повсякденному житті, як телебачення і стільниковий зв'язок. Однак, щоб викликати повноцінний бум, необхідно подолати деякі ключові проблеми.

Залишаються завдання комунікації і координації. Вимагає опрацювання і механізм захоплення. Задача управління рухом мобільних колісних роботів, в останній час, представляє великий інтерес для дослідників.



*Ємнісні датчики* переміщення бувають двох типів - індуктивні та трансформаторні. В індуктивних датчиках переміщення, що виявляється, перетворюється в зміну індуктивності за рахунок зміни параметрів магнітного ланцюга котушки індуктивності. Недоліком таких датчиків є наявність значної електромагнітної сили, що діє рухому частину датчика. Для зниження цієї сили основне застосування отримали диференціальні індуктивні датчики, зібрані по містовій схемі, де вказані сили від двох котушок взаємно врівноважуються. Величина похибки сучасних індуктивних датчиків переміщення становить від 0,5 до 2%.



Рисунок 1.4 - Ємнісні датчики переміщення

*Фотоелектричні (оптичні) датчики* - це найточніші датчики переміщення, у яких переміщення контролюються за допомогою променя світла. Принцип дії цих датчиків полягає у розміщенні на контрольованому рухомому об'єкті екрану із системою отворів, через які проходить світло від деякого джерела та реєструється з іншого боку фотоприймачами. При переміщенні екрана змінюються умови їхнього освітлення, що і є мірою переміщення.

*Ємнісні (електростатичні) датчики* переміщення перетворюють переміщення, що виявляється, у величину ємності конденсатора шляхом зміни відстані між обкладками (електродами) конденсатора.

Існують такі датчики, у яких змінюється активна площа пластин конденсатора, наприклад, шляхом повороту однієї пластини щодо іншої. Основне застосування ємнісних датчиків - це вимір малих переміщень, в тому числі в датчиках тиску та прискорення.

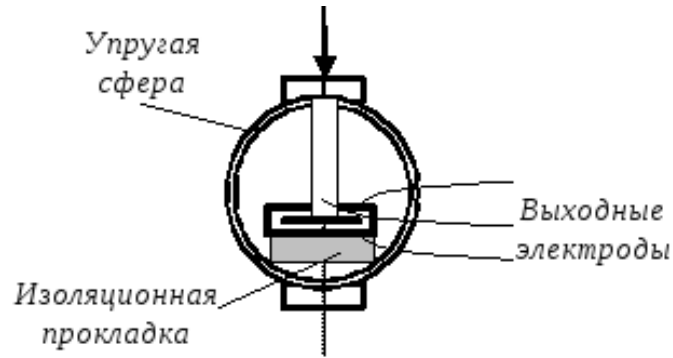


Рисунок 1.5 - Ємнісні (електростатичні) датчики переміщення

*Датчики переміщення з урахуванням ефекту Холла (датчики Холла).*

Власне ефект Холла полягає у впливі магнітного поля на електричний струм. Якщо до пластини або плівки, якою йде струм, прикласти перпендикулярно їй магнітне поле, між бічними краями пластини виникне різниця потенціалів. Таким чином безпосередньо ефект Холла дозволяє створювати датчики магнітної індукції, але він набув поширення і для створення датчиків переміщення пластини зі струмом щодо магніту. Як матеріал пластини використовуються напівпровідники GaAs, InAs, InSb та ін. Похибка датчиків Холла, що серійно випускаються, — 0,5–1,0%.

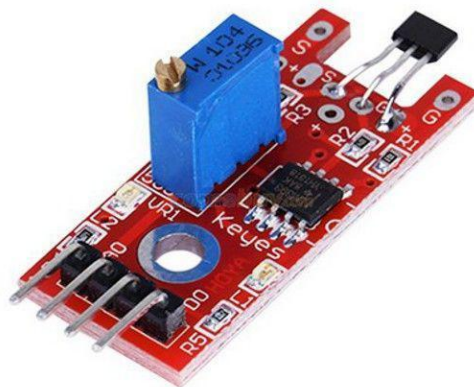


Рисунок 1.6 - Датчик переміщення з урахуванням ефекту Холла (датчики Холла)

*Датчики швидкості.* Величину швидкості лінійного та кутового переміщення можна отримати диференціюванням сигналу від розглянутих вище

датчиків переміщення. Проте точніше значення швидкості дають датчики, що безпосередньо відчувають швидкість. Основними типами таких датчиків є тахогенератори та дискретні датчики, що перетворюють швидкість на частоту імпульсів.

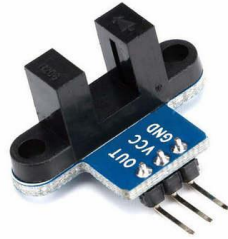


Рисунок 1.7 - Датчик швидкості

*Тактильні системи відчуття.* Вони фіксують факт торкання роботом об'єкта, визначають положення точок торкання та вимірюють контактні сили у цих точках.

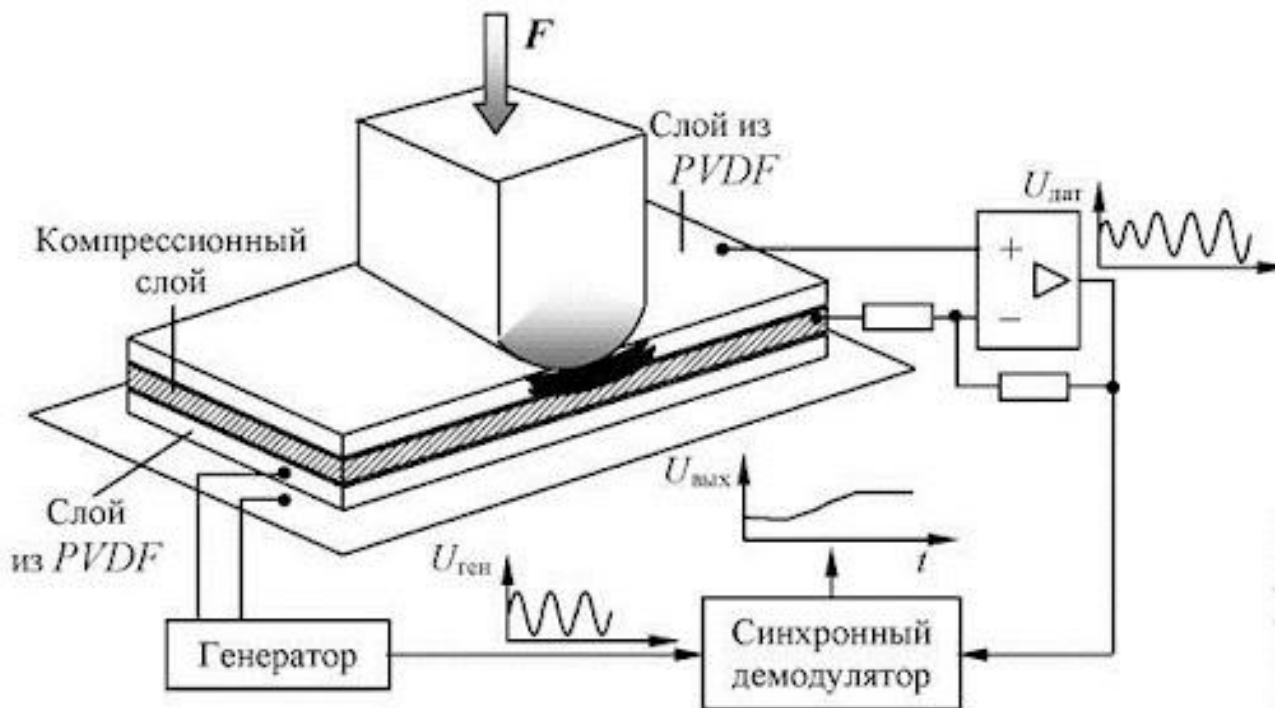


Рисунок 1.8 - Тактильні системи відчуття

Прообразом тактильних систем відчуття послужило почуття дотику, яким наділена людина. Він отримує інформацію про форму та текстуру поверхні

предметів шляхом обмацування останніх кінчиками пальців, шкіра яких має чутливі датчики. В основу побудови таких систем закладено п'єзоелектричний, електромагнітний, магнітоелектричний та інші ефекти. Тактильні датчики зазвичай поміщають на внутрішні та зовнішні поверхні схвату.

Приклад, коли в основу роботи тактильного датчика закладено ефект зміни під навантаженням електричного опору еластичного матеріалу, по всій масі якого в процесі виготовлення розподілені електропровідні мікрочастинки.

*Силомоментні системи відчуття* - це сенсорні пристрої, що забезпечують вимірювання компонент вектора сили та вектора моменту сил, що розвиваються роботом у процесі взаємодії з виробом у проекції деяку систему координат. Такі системи побудовані з урахуванням тензоперетворювачів.

Система складається з механічної конструкції з розміщеними на ній тензоперетворювачами, що формують сигнал, пропорційний деформації конструкції, узгоджувальних підсилювачів, комутатора, що дозволяє вибирати потрібний перетворювач та пристрої для обчислення вектора моменту сил. Аналоговий сигнал із виходу силомоментної системи сполучається з мікропроцесором за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Датчики системи силомоментного відчуття встановлюються між останньою ланкою робота та схватом.

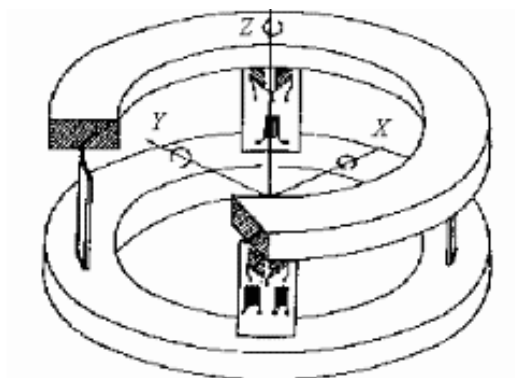


Рисунок 1.9 - Датчик силомоментної системи відчуття

### 1.3 Сенсори роботів - фізичні принципи роботи, засоби і класифікація

Сенсорні системи роботів – це чутливі пристрої, призначені для отримання оперативної інформації про стан довкілля. В окремих системах роботів також різні чутливі пристрої - датчики, необхідні для функціонування цих систем (наприклад, датчики зворотного зв'язку в приводах, у вторинних джерелах живлення тощо). Ці пристрої, орієнтовані внутрішні параметри робота, не специфічні йому цілим і тому ставляться до сенсорним системам робота.

По виду властивостей зовнішнього середовища сенсорні системи роботів поділяються на три групи:

- 1) сенсорні системи, що служать визначення геометричних властивостей об'єктів і довкілля загалом;
- 2) сенсорні системи, які виявляють інші фізичні властивості;
- 3) сенсорні системи, які виявляють хімічні характеристики.

Характерними представниками сенсорних систем першої групи є вимірювачі координат (скануючі локатори, координатори, інформаційні лінійки тощо). Друга група сенсорних систем, призначених визначення фізичних властивостей об'єктів найрізноманітніша. Тут насамперед слід виділити вимірники зусиль, густини, температури, кольору; оптичної прозорості тощо.

До третьої групи входять вимірювальні пристрої для визначення хімічного складу та хімічних властивостей середовища.

Інформація від сенсорних систем використовується в системі управління робота для виявлення та розпізнавання об'єктів зовнішнього середовища, для управління рухом робота та його маніпуляторів.

По дальності дії сенсорні системи діляться на контактні, ближні, дальні та наддалекі. Контактні сенсорні системи застосовують для відчуття робочих органів маніпуляторів та корпусу мобільних роботів. Вони дозволяють фіксувати контакт з об'єктами зовнішнього середовища завдяки тактильним датчикам, можуть зчитувати зусилля, які виникають у місці взаємодії (силометричні датчики), визначати прослизання об'єктів при їх утриманні захватним пристроєм. Контактним сенсорним системам властива простота,

однак вони накладають суттєві обмеження на динаміку і насамперед швидкодія управління роботом.

Сенсорні системи ближньої дії забезпечують одержання інформації про об'єкти, розташовані безпосередньо поблизу робочого органу маніпулятора або корпусу робота, тобто. на відстанях, порівнянних зі своїми розмірами. До таких систем відносяться, наприклад, локаційні сенсори, різні далекоміри ближньої дії, дистанційні вимірники щільності ґрунту тощо. Такі безконтактні пристрої технічно складніші за контактні, але дозволяють роботу виконувати завдання з більшою швидкістю, заздалегідь видаючи інформацію про об'єкти до контакту з ними. Сенсорні системи дальньої дії служать для отримання інформації про зовнішнє середовище в обсязі всієї робочої зони маніпуляторів роботів та навколишнього середовища мобільного робота.

Сенсорні системи наддальньої дії дають інформацію про об'єкти, що знаходяться поза робочою зоною маніпуляторів. Їх застосовують головним чином мобільних роботах. До таких пристроїв належать різні навігаційні прилади, координатори, локатори та інші сенсорні системи відповідної дальності дії. Ці пристрої знаходять застосування і в стаціонарних роботах при роботі з рухомими об'єктами, щоб передбачити їх появу в робочій зоні.

У безконтактних сенсорних системах для отримання необхідної інформації можуть бути використані спеціальні сигнали, що випромінюються ними (оптичні, радіотехнічні, радіаційні і т.д.) або природні випромінювання середовища та її об'єктів. Залежно від цього розрізняють активні та пасивні сенсорні системи. Активні сенсорні системи обов'язково включають передавальний пристрій, що випромінює первинний сигнал, і приймальний пристрій, що реєструє прямий сигнал або вторинний сигнал, що пройшов через середовище, відбитий від об'єктів середовища. Пасивні сенсорні системи мають лише приймальний пристрій, а роль випромінювача грають самі об'єкти довкілля. У зв'язку з цим пасивні сенсорні пристрої технічно зазвичай простіше і дешевші за активні, але менш універсальні.

Нарешті, сенсорні системи можна поділити на пристрої з фіксованим напрямом сприйняття та зі змінним напрямом сприйняття (скануючі).

В даний час для відчуття роботів найбільше широко застосовують системи технічного зору, локаційні, силOMETричні системи, а також тактильні сенсори.

Останні відносять до найпростіших чутливих пристроїв. Крім отримання інформації про контакт вони застосовуються і для визначення розмірів об'єктів (шляхом їх обмацування). Тактильні сенсори можуть бути технічно реалізовані на кінцевих вимикачах, герметизованих магнітокерованих контактах, п'єзокристалічних перетворювачах, на основі струмопровідної гуми (штучна шкіра) тощо. Важливою вимогою до цих пристроїв є висока чутливість (спрацьовування при зусиллі в одиниці та десятки грам) при малих габаритах, що поєднується з високою механічною міцністю та надійністю. Істотний недолік тактильних сенсорів, як згадувалося, у тому, що вони, зазвичай, накладають обмеження на швидкість роботи. Для підвищення надійності та швидкості виконання робочих операцій захватні пристрої робота часто відчують безконтактним рецепторним полем, наприклад, з використанням світлолокаційних та ультразвукових датчиків.

Технології, які направлені на виявлення перешкод мобільним роботом можна розділити на дві категорії: активного і пасивного сприйняття інформації.

Технології активного сприйняття інформації містять пристрій генерування сигналу, який відбивається від перешкод і повертається до сенсора. За рахунок визначення часу поширення сигналу, такі технології дозволяють визначати віддаль до перешкод. На відміну від них, технології пасивного сприйняття інформації, в основному, використовують попередньо освітлені або промарковані області середовища, які дозволяють визначати віддаль до перешкод за рахунок обробки зображень. Розглянемо докладніше характеристики основних типів сенсорів, які використовуються в робототехнічних системах.

*Ультразвукові сенсори.* Принцип роботи ультразвукових сенсорів, наприклад, які спроектовані компанією Baumer electric, базується на п'єзоефекті - зміні геометричних розмірів керамічної або кварцової пластини при подачі на неї електричного поля і виникненні електричного заряду на поверхнях пластини при механічних діях на неї. При подачі напруги частотою 30 кГц, пластина генерує звукові хвилі такої ж частоти, які поширюються в повітрі із швидкістю  $\approx 330$  м/с. Таким чином, пластина працює спочатку випромінювачем, а потім приймачем ультразвукових хвиль. Діапазон вимірювань сенсора регулюється зміною потужності випромінювання. Для надійної детекції перешкоди сенсором, її розмір повинен становити 30x30 мм на відстані менше 1 м, і 100x100 мм на відстані більше 1 м.

Перевагами ультразвукових сенсорів є низька ціна, малі розміри, простота використання і відносно висока лінійна точність. Недоліками є висока кутова невизначеність положень об'єктів в полі зору сенсора, затухання сигналу на великих відстанях, а також вплив температури, тиску та структури середовища на швидкість поширення ультразвуку. Крім того, можливе багатократне відбивання ультразвукового сигналу від перешкод. Сигнал ультразвукових сенсорів також залежить від типу поверхні перешкод, яка може відбивати або поглинати ультразвукові хвилі (в останньому випадку перешкода буде невидимою для ультразвукових сенсорів). В цілому, ультразвукові сенсори широко використовуються для навігації автономних мобільних роботів.

*Інфрачервоні сканери.* Інфрачервоні сканери випромінює імпульс інфрачервоного світла і за допомогою параболічного приймача сприймає відбиту енергію випромінювача. На відміну від ультразвукових сенсорів, час поширення світлового імпульсу інфрачервоні сканери набагато менший, тому визначити його важче. Приймач дає лише інформацію про отримання відбитого імпульсу. Таким чином визначення відстані є дещо ускладненим, проте положення об'єкта визначається з високою кутовою точністю.

Переваги інфрачервоних сканерів подібні до ультразвукових сенсорів і полягають у простоті використання, низькій ціні, малих розмірах, нечутливості

до кольорів поверхонь перешкод. Недоліками інфрачервоних сканерів є чутливість до атмосферних умов, таких як туман, дим, пил, тощо.

*Радари міліметрових хвиль.* Радари міліметрових хвиль (довжиною від 500 мікрометрів до 1 см), можуть використовуватись у технології активного сприйняття інформації. Швидкість поширення міліметрових хвиль відповідає швидкості світла, тому їх властивості подібні до інфрачервоних сканерів.

Перевагами застосування радарів міліметрових хвиль є їх нечутливість до атмосферних умов для виявлення перешкод автономними мобільними роботами.

*Лазери.* Лазери використовуються як радарні пристрої, подібно до інфрачервоних сканерів. У зв'язку із тим, що промінь лазера когерентний, він має малу кутову дисперсію. Крім того, енергія від лазера не розсіюється, що дозволяє добре визначати перешкоди на великих відстанях.

Враховуючи швидкість поширення лазерного імпульсу, затримка між надісланим і отриманим сигналом є малою, тому обробка сигналу сенсорів потребує великої швидкодії. Доступні сьогодні лазерні радарні пристрої дорогі та великі за розміром, особливо ті, що мають оптичні скануючі насадки для охоплення великої території. Крім того, потужні лазери небезпечні для здоров'я людини (вважають сітківку людського ока), промені є більш чутливі до атмосферних умов порівняно з ультразвуковими сенсорами та інфрачервоними сканерами. Sick Optick-Electronic Inc. розробила різні модулі лазерних випромінювачів, які часто застосовуються у робототехніці.

*Відеосенсори.* Бурхливий розвиток ринку периферійних мультимедійних пристроїв, вдосконалення технології виготовлення світлочутливих сенсорів привели до створення цифрових відеокамер, які використовують як світлочутливий елемент ПЗЗ (пристрій з зарядовим зв'язком) та КМОП (комплементарний метало-оксидний напівпровідник) матриці. Основний принцип дії ПЗЗ і КМОП сенсорів однаковий: під впливом світла у напівпровідникових матеріалах виникають носії заряду, які створюють електричний струм. Відмінність між ПЗЗ і КМОП сенсорами полягає перш за все

у способі накопичення і передачі заряду, а також у технології перетворення його в аналоговий сигнал. Слід відзначити, що КМОП-сенсори є значно дешевшими у виробництві і широко застосовуються у Web-камерах. Окрім оптичного об'єктиву і світлочутливого ПЗЗ- або КМОП-сенсора обов'язковими елементами Web-камер є аналого-цифровий перетворювач (АЦП), система формування кольору, підсистема компресії даних і контролер USB-інтерфейсу.

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ В РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

### 2.1 Основні характеристики локалізації

Локалізація та навігація – це два найважливіші завдання, які виконують мобільні роботи. Вони повинні знати своє поточне становище і те, як дістатися кінцевої мети. Ці дві задачі тісно пов'язані між собою. Якщо робот, намітивши траєкторію, не знає свого точного початкового положення, він зіткнеться з певними труднощами під час руху до місця призначення. Локалізація - це універсальний приклад робототехнічного сприйняття. Її завдання – визначення, де що знаходиться. Локалізація — одне з найпоширеніших завдань сприйняття в робототехніці, оскільки знання про місцезнаходження об'єктів і найчиннішого суб'єкта є основою будь-якої успішної фізичної взаємодії. Наприклад, роботи, що стосуються типу маніпуляторів, повинні мати інформацію про місцезнаходження об'єктів, якими вони маніпулюють. А роботи, що пересуваються у просторі, мають визначати, де вони самі, щоб прокласти шлях до цільових місцезнаходженням.

Існують три різновиди завдання локалізації із зростаючою складністю. Якщо початкова поза об'єкта, що локалізується, відома, то локалізація зводиться до завдання відстеження траєкторії. Завдання відстеження траєкторії характеризуються обмеженою невизначеністю. Більш складним є завдання глобальної локалізації, у якій початкове місцезнаходження об'єкта невідомо. Завдання глобальної локалізації перетворюються на завдання відстеження траєкторії відразу після локалізації об'єкта, що шукається, але в процесі їх вирішення виникають також такі етапи, коли роботу доводиться враховувати дуже широкий перелік невизначених станів. Завдання локалізації в невизначених обставинах (тобто раптове зникнення об'єкта, який він намагався локалізувати) називається завданням викрадення. Ситуація викрадення часто

використовується для перевірки надійності методу локалізації у вкрай несприятливих умовах. Припустимо, що робот повільно рухається на площині і що йому дано точну карту середовища. Поза такого мобільного робота визначається двома декартовими координатами зі значеннями  $x$  і  $y$ , а також його кутовим напрямком зі значенням  $\Theta$ . Якщо ці три значення будуть упорядковані у вигляді вектора, будь-який конкретний стан визначиться за допомогою співвідношення:

$$x_t = (x_t, y_t, \Theta_t)^T \quad (2.1)$$

Позначені значення позиції та орієнтації в моменти часу  $t$  та  $t+1$ , а оновлення позначені відповідно термами  $v_t \Delta t$  і  $\omega_t \Delta t$ . У цій кінематичній апроксимації кожна дія складається з "миттєвої" специфікації двох швидкостей - швидкості перенесення  $v_t$  та швидкості обертання  $\omega_t$ . Для невеликих часових інтервалів  $\Delta t$  груба детермінована модель руху таких роботів задається так:

$$\hat{x}_{t+1} = \frac{f(x_t, v_t, \omega_t)}{a_t} = x_t + \begin{pmatrix} v_t \Delta t \cos \Theta_t \\ v_t \Delta t \sin \Theta_t \\ \omega_t \Delta t \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Позначення  $X$  відноситься до детермінованого передбачення стану. Безумовно, поведінка фізичних роботів є досить непередбачуваною. Така ситуація зазвичай моделюється гаусовим розподілом із середнім  $f(x_t, v_t, \omega_t)$  та коваріацією  $\Sigma_X$ .

$$P(X_{t+1} | X_t, V_t, X \omega_t) = N(X_{t+1}, \Sigma_X) \quad (2.3)$$

Потім потрібно розробити модель сприйняття. Розглянемо моделі сприйняття двох типів. У першій їх передбачається, що датчики виявляють стабільні, помітні характеристики середовища, звані позначками. Для кожної

позначки вони повідомляють дальність та азимут. Припустимо, що стан робота визначається виразом  $x_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$  і він приймає інформацію про позначку, місцезнаходження якої, як відомо, визначається координатами  $(x_i, y_i)^T$ . За відсутності шуму дальність та азимут можна обчислити за допомогою простого геометричного співвідношення. Точне передбачення значень дальності і азимуту, що спостерігаються, може бути виконано за допомогою наступної формули:

$$\hat{z}_{t+1} = h(x_t) = \left( \begin{array}{c} \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} \\ \arctan \frac{y_i - y_t}{x_i - x_t} - \theta_t \end{array} \right) \quad (2.4)$$

Ще раз зазначимо, що отримані результати вимірів спотворені шумом. Для спрощення можна припустити наявність гаусового шуму з коваріацією  $\Sigma_y$ :

$$P = (z_t | x_t) = N(\hat{z}_t, \Sigma_z) \quad (2.5)$$

Для далекомірів такого типу часто більш прийнятною є трохи інша модель сприйняття. Такі датчики виробляють вектор значень дальності  $z_t = (z_1, \dots, z_n)^T$ , у кожному з яких азимуту є фіксованими по відношенню до роботи. За умови, що дана поза  $x_t$ , припустимо, що  $\hat{z}_j$  - точна відстань вздовж напрямку  $j$ -го променя від  $x_t$  до найближчої перешкоди. Як і описаному раніше випадку, ці результати можуть бути спотворені гаусовим шумом. Як правило, передбачається, що похибки для різних напрямків променів незалежні та задані у вигляді ідентичних розподілів, тому має місце така формула:

$$P(z_t | x_t) = \alpha \prod_{j=1}^M e^{-(z_j - \hat{z}_j) / 2\sigma^2} \quad (2.6)$$

Порівнюючи модель вимірювання дальностей з моделлю відміток, можна переконатися в тому, що модель вимірювання дальностей має перевагу в тому,

що не вимагає ідентифікації позначки для отримання можливості інтерпретувати результати вимірювання дальностей.

У більшості сучасних алгоритмів локалізації використовується або фільтр Калмана, що дозволяє подати довірчий стан у вигляді одного багатовимірного гаусового розподілу, або фільтр частинок, який представляє довірчий стан у вигляді колекції частинок, що відповідають стану.

Локалізація з використанням фільтрації частинок називається локалізацією Монте-Карло, або скорочено MCL (Monte Carlo Localization). Робота цього алгоритму полягає в тому, що частинки розподілені рівномірно відповідно до розподілу апіорних ймовірностей, що показує наявність глобальної невизначеності щодо положення робота. Спочатку, коли надходить перший ряд результатів вимірювань, частинки формують кластери в областях з високим розподілом апостеріорних довірчих станів. Потім, коли надійшло достатньо результатів вимірювань, необхідно перемістити всі частинки в одне місце.

Ще один важливий спосіб локалізації ґрунтується на застосуванні фільтра Калмана. Фільтр Калмана є апостеріорною ймовірністю  $P = (x_t | z_{1:t}, a_{1:t-1})$  за допомогою гаусового розподілу. Середнє цього гаусового розподілу буде позначено  $\mu_t$ , а його коваріація -  $\Sigma_t$ .

Основним недоліком використання гаусових довірчих станів є те, що вони замкнені лише при використанні лінійних моделей руху  $f$  та лінійних моделей вимірювання  $h$ . У разі нелінійних  $f$  або  $h$  результат оновлення фільтра зазвичай не є гаусовим. Таким чином, алгоритми локалізації, в яких використовується фільтр Калмана, лінеаризують моделі руху та сприйняття.

## 2.2 Алгоритми локалізації

Вирішення задачі локалізації дозволяє мобільній платформі визначити поточне положення. На вході алгоритму є карта, маршрут руху та показання

датчиків. На виході – кінцеві координати робота, розраховані з певною ймовірністю.

### 2.2.1 Ймовірнісна локалізація

Всі рухи робота і сенсорні вимірювання, які він проводить, певною мірою схильні до шуму. Метою ймовірнісної локалізації служить гранично відмінна оцінка поточного становища (зміни) робота, заснована на раніше отриманих даних та їх функціях розподілу. Кінцевою оцінкою буде не що інше, як ймовірнісне розподіл, оскільки системі властива внутрішня невизначеність. З методом ймовірнісної локалізації пов'язана одна велика проблема: оскільки простір конфігурацій має бути дискретним, становище робота можна задати лише дискретними числами.

Є, однак, простий спосіб подолати це обмеження – розробити дискретне уявлення з урахуванням точності показань датчиків та виконання команд. На жаль, при такому способі суттєво зростає кількість вимірювань та кількість дискретних відстаней (кожна зі своєю ймовірністю).

### 2.2.2 Фільтр частинок

На відміну від ймовірнісної локалізації дозволяє використовувати недискретні конфігураційні простори. В основі цього методу лежить така ідея: думка робота представимо у вигляді множини  $M$  з  $N$  частинок. Кожна частка складається з конфігурації  $X$  робота та ваги  $\omega \in [0,1]$ .

Після виконання команди пересування робот оновлює конфігурацію  $x_j$ -ої частинки. Для цього він формує безліч  $M$  шляхом вибірки із значень функції густини ймовірностей:

$$p(x_j | d, x_j') \quad (2.7)$$

(що має, як правило, форму гаусового розподілу). Після цього робот призначає  $j$ -ій частинці нову вагу:

$$W_j = p(s | x_j) \quad (2.8)$$

і проводить нормування ваги, про те, щоб їх сума дорівнювала одиниці. Нарешті робот повторно проводить вибірку, щоб сформувати безліч з частинок із найбільшими вагами.

### 2.2.3 Метод потенційного поля

Метод потенційного поля – це алгоритм глобальної побудови траєкторії на карті за допомогою віртуальних сил. Для цього методу необхідно знати початкову та кінцеву точки маршруту, а також положення всіх перешкод та стін.

Траєкторія будується за допомогою віртуальних сил тяжіння та відштовхування. Точка старту, всі перешкоди та граничні стіни відштовхують робота, а точка мети – притягує його. Величина кожної сили обернено пропорційна відстані до об'єкта. Робот просто рухається у силовому полі.

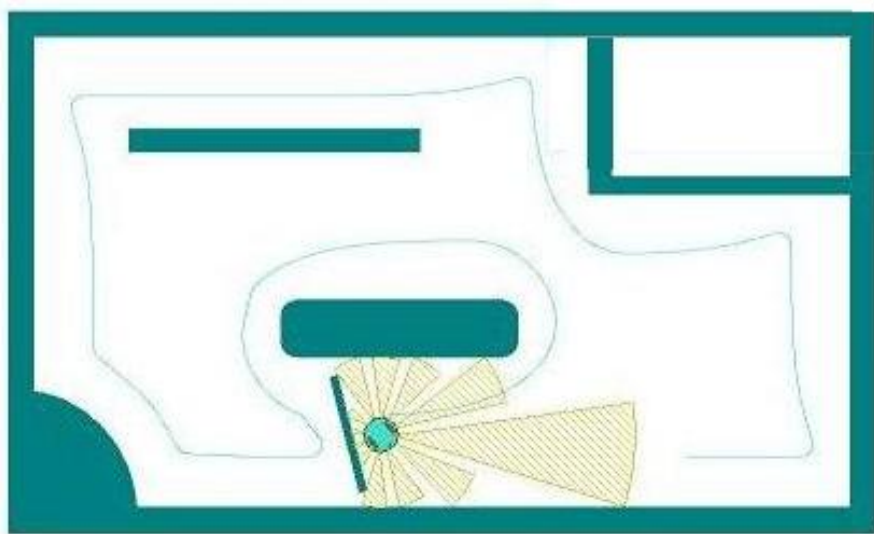


Рисунок 2.1 – Приклад побудови траєкторії на карті

### 2.2.4 Алгоритм блукаючої точки

Алгоритм блукаючої точки – це алгоритм локального планування траєкторії. Для його реалізації потрібне використання локального датчика відстаней. Алгоритм полягає в тому, щоб спробувати досягти цільової точки маршруту прямої лінії. При виявленні перешкоди необхідно виміряти кути повороту вправо та вліво, що забезпечують об'їзд перешкоди і повернути на менший кут. Далі слід рухатися вздовж межі перешкоди доти, доки вона не перестане заважати проходу до цільової точки. У реальних умовах робот рухається не строго за знайденими точками маршруту, а по апроксимуючій кривій. Недоліком цього є те, що з певною розміщені перешкод робот може зациклитися у своєму русі. У цьому випадку він нескінченно огинатиме перешкоди і ніколи не досягне мети.

### 2.2.5 Алгоритми сімейства Bug

Ці алгоритми вирішують задачу локального планування руху та гарантують її збіжність. Якщо траєкторія існує, то вона обов'язково буде знайдено, а якщо ні, то алгоритм визначить, що мета недосяжна. Алгоритми сімейства Bug використовують як вхідну інформацію координати робота (пройдена відстань), координати цільової точки та показання контактного датчика (для Bug1 та Bug2) або далекоміра (для DistBug). Суть алгоритмів сімейства Bug полягає в наступному:

Bug 1: рухатися прямо до мети, до зіткнення з перешкодою (до точки зустрічі). Цілком обійти перешкоду по контуру, реєструючи найкоротшу відстань до мети (у точці сходу). При повторному досягненні точки зустрічі повернутися до точки сходу і продовжити виконання алгоритму.

Bug 2: провести з точки старту в точку мети уявну пряму М. Рухатися вздовж М до зіткнення з перешкодою (до точки зустрічі). Слід уздовж межі

об'єкта до точки перетину з прямою  $M$ , яка є найближчою до мети (точка сходу). Продовжити виконання алгоритму.

**DistBug:** переміщення прямо до мети до зіткнення з перешкодою (до точки зустрічі). Слід уздовж межі перешкоди, реєструючи найкоротшу відстань до мети. Якщо мета стає видна чи якщо у її напрямі виявляється досить вільного простору, то продовжити виконання алгоритму цієї точки (точки сходу). Якщо, однак, робот повертається до колишньої точки зустрічі, значить, мета недосяжна. Цей алгоритм погано реалізуємо практично, оскільки реальні умови не забезпечують необхідної точності позиціонування робота і показань його далекоміра. Практично всі модифікації алгоритму **DistBug** чутливі до шуму сенсорних даних та похибок пересування робота.

### 2.3 Алгоритми навігації

При вирішенні завдань навігації мобільних роботів використовуються два основні підходи.

- Глобальний – визначення абсолютних координат пристрою під час руху довгими маршрутами. Траєкторія вибирається ще до початку руху на основі отриманої інформації.

- Локальний - визначення координат пристрою по відношенню до деякої (зазвичай стартової) точки. Планування задає лише невеликий відрізок траєкторії, у кінцевій точці якого вибирається подальша траєкторія.

Усі стани робота характеризуються точкою у просторі конфігурацій. Вводять поняття простору вільних конфігурацій ( $C_{free}$ ) - безліч тих станів об'єкта управління, проекція яких на робоче простір не перетинається з безліччю перешкод. Граф відбиває стани, в яких може бути робот, де кожен вузол представляє один стан робота (координата становища, кут орієнтації, швидкість). Таким чином, алгоритми руху по карті дозволяють визначити набір маршрутів у вільному просторі  $C_{free}$ .

Існує ряд методів, які відрізняються переважно вибором вузлів відповідного графа. Подібні методи зазвичай використовують у випадках повноти апріорної інформації про навколишнє середовище та її незмінності:

- алгоритм Дейкстри;
- метод, заснований на використанні графа взаємовидимих позицій;
- алгоритм A\*;
- метод Монте-Карло (з урахуванням вибірки) та інші.

### **2.3.1 Алгоритм Дейкстри**

Алгоритм Дейкстри як вхідні дані отримує зважений граф із невід'ємною вагою ребер. Принцип роботи можна охарактеризувати так: вершині графа ставиться в відповідність мітка, яка являє собою вартість шляху до цієї вершини із початкової. Робота алгоритму виконується покроково. На кожному з кроків на розгляд береться одна вершина і має на меті зменшити значення мітки суміжних вузлів. Після перебору всіх вершин робота алгоритму завершується. На виході отримуємо найкоротший шлях у цьому графі.

### **2.3.2 Метод, заснований на використанні графа взаємовидимих позицій**

При використанні графа видимості (графа позицій) за вузли приймають безліч вершин перешкод, ребра ж є доступними переходами між позиціями, утворюються такими парами вузлів, що пряма, що з'єднує їх, не перетинає перешкоди. Завдання пошуку шляху вирішується за допомогою алгоритмів пошуку у графах (наприклад, Дейкстри). Будується у просторах із полігональними перешкодами, тобто необхідно, щоб перешкоди являли собою багатокутники робочому просторі розмірністю 2D або багатогранники в тривимірному випадку. Під час руху в невідомому оточенні робот може в ході переміщення доповнювати граф видимості новими вершинами в міру того, як

вони відкриватимуться. Цей підхід може бути використаний, якщо у робота досить широкий кут огляду. Розглянутий алгоритм має ряд недоліків, обумовлених тим, що частина спланованого шляху збігається з краями перешкод, а отже є певна небезпека зіткнення. Ще одним значним мінусом є швидке зростання складності графа зі збільшенням кількості перешкод. Остання проблема вирішується шляхом застосування методу динамічного діаграми видимості чи концепції т-вектора (traversability vector) Дані підходи спрямовані на визначення того, які з перешкод у повному докілью необхідно враховувати під час руху робота, цим вони дозволяють скоротити складність графа взаємовидимих позицій.

Інший підхід описаний у методі структурування вільного простору (free space structuring method). Він призводить до побудови допустимого шляху, максимально віддаленого від перешкод. Застосовуючи даний метод у двовимірному просторі, виділяють відрізки, що з'єднують вершини перешкод та не перетинаються з перешкодами. Такі відрізки прийнято називати вільними ланками (free links). З вільних ланок збираються опуклі багатогранники, що описують області вільного простору. Далі ця інформація подається у вигляді спеціального графа (maklink), а спланований шлях в обхід перешкод будується алгоритмами пошуку шляхів у графі. Метод структурування вільного простору дає більш безпечний шлях з точки зору зіткнення з перешкодами, але призводить до збільшення загальної довжини колії.

### 2.3.3 Алгоритм A\*

Алгоритм A\* є евристичним уточненням алгоритму Дейкстри. На відміну від класичного методу, виробляється перебір лише найімовірніших вершин. Для цього приймають у увагу не тільки вартість проходження шляхом від поточної вершини до що знаходиться по сусідству, а також евристичну функцію пріоритету (у найпростіший випадок – це відстань від розглянутої точки до кінцевої точки), що значно звужує область пошуку. Таким чином, при обході

перешкоди робот вибиратиме найбільш вигідні, з погляду заданої евристики, позиції. Причому обрана евристика надає вплив на час роботи алгоритму: завдяки ефективно підбраній евристиці може досягати високої продуктивності за часом. Алгоритм  $A^*$  завжди знаходить оптимальний шлях, якщо евристична функція не переоцінює відстань від вузла до мети.

Суть алгоритму на основі вибірки полягає в тому, що простору вільних конфігурацій вибирається  $N$  конфігурацій, які використовуються як контрольні точки для створення плану руху. План руху з'єднує дві точки, якщо відрізок, утворений цими точками, повністю лежить у просторі вільних змін. Для того, щоб прокласти маршрут до мети з початкового положення, їх додають у план руху. Якщо відрізок, утворений точками, не належить або частково належить  $S_{free}$ , то план руху додаються додаткові контрольні точки. Даний алгоритм часто використовують у багатовимірних просторах змін, оскільки швидкість його роботи залежить від розмірності простору. Якщо розглядати застосування алгоритму у двовимірному випадку, то складений план руху буде графом видимості. У подібній ситуації достатньо залишити у графі видимості, що тільки стосуються перешкод в обох точках ребра. Методи на основі графів зручно використовувати у статичній навколишньому середовищі, оскільки побудова графа має на увазі використання повної інформації про навколишнє середовище, що має бути відома заздалегідь. Наявність динамічних перешкод у цих методах важко інтерпретується і дозволяє будувати граф.

Більшість методів, спрямованих на пошук найкоротшого шляху, вирішують завдання таким чином, що траєкторія руху робота з початкової точки до досягнення кінцевої є набір прямих ліній. Очевидно, що отримана таким чином ламана траєкторія не може бути точно відпрацьовано системою управління робота. Більш того, для збільшення точності підходу до цільовій точці доводиться знижувати швидкість, збільшуючи тим самим час роботи.

Завдання планування шляху є одним підзавданням автоматичного управління роботом. Робот повинен мати здатність вирішувати завдання планування шляху в реальних умовах довкілля без втручання людини.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО РОБОТА

### 3.1 Компоненти мобільного робота

Загалом при розробці мобільного робота були використані наступні компоненти [15-16]:

Таблиця 3.1 - Компоненти мобільного роботу

№ п/п	Назва компоненту	Зовнішній вигляд компоненту
1.	32-бітовий мікроконтролер виробництва STMicroelectronics	
2.	Ультразвукові датчики відстані безконтактного типу HC-SR04	
3.	Драйвери двигунів L9110S	
4.	Макетна плата та двигуни	

#### 1. 32-бітовий мікроконтролер виробництва STMicroelectronics.

Компанія STMicroelectronics є найбільшим виробником мікроконтролерів в світі, при цьому більша частина припадає на сімейства STM32. Популярність платформи STM32 багато в чому визначається величезним вибором моделей. На даний момент в номенклатурі STM32 налічується більше семи сотень представників, і кожен інженер зможе підібрати оптимальний мікроконтролер практично для кожної програми, виходячи з вимог, що пред'являються до продуктивності / рівню інтеграції / споживання / вартості.

## 2. Ультразвуковий датчик відстані безконтактного типу HC-SR04.

На відміну від інфрачервоних далекомірів на ультразвуковий датчик HC-SR04 не впливають джерела світла або колір перешкоди. Датчик відстані є приладом безконтактного типу, і забезпечує високоточне вимірювання і стабільність. Діапазон дальності його вимірювання складає від 0 до 150 см, точність досягає 3 мм.

## 3. Драйвер двигуна L9110S.

Модуль управління моторами на мікросхемі L9110S використовується для контролю / обертання двох незалежних моторів або одного 4-х дротового 2-х фазного крокового двигуна. Драйвер має два інтерфейси для підключення електроживлення, мікроконтролера і керованих пристроїв.

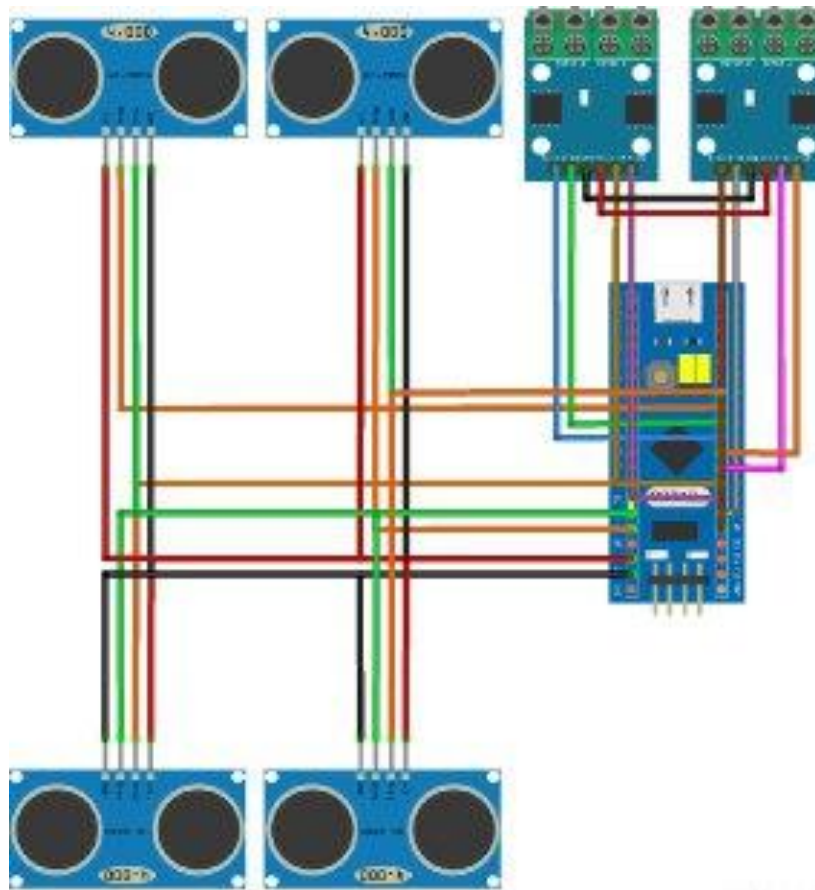


Рисунок 3.1 - Схема підключення компонентів мобільного робота

В роботі використано середовище розробки Keil  $\mu$ Vision [8], що представляє собою набір утиліт для виконання повного комплексу заходів з

написання програмного забезпечення для мікроконтролерів на мові програмування C++. Дозволяє працювати з проектами будь-якого ступеня складності, починаючи з введення і редагування вихідних текстів і закінчуючи внутрішньосхемним налагодженням коду і програмуванням ПЗП мікроконтролера.

Для зручності роботи з мікроконтролером була використана бібліотека `stm32f10x.h` [9], а саме застосовувалася для:

#### 1. Портів вводу/виводу.

Побітова настройка:

```
GPIOC->CRH &=~ (1<<26);
GPIOC->CRH |= (1<<27);
GPIOC->ODR &=~ (1<<14);
```

За допомогою засобів бібліотеки:

```
GPIOB->CRL &=~ GPIO_CRL_CNF1;
GPIOB->CRL |= GPIO_CRL_MODE1;
```

#### 2. Використання змінних типу `uint`.

```
uint32_t dist_front;
uint32_t dist_back;
uint32_t dist_left;
uint32_t dist_right;
```

#### 3. Читання вхідного сигналу.

```
GPIOC->IDR & 1 << 14 (функція дає 0 або 1)
```

Було використано для реалізації перемикачів між двома реалізованими режимами роботи мобільного робота:

- вибір безпечного місця, орієнтуючись на показники датчиків, відповідно до зазначених даних в програмі;
- автономне пересування, з пріоритетним переміщенням вперед, уникаючи зустрічних перешкод, напрямок повороту визначається шляхом порівняння показників датчиків.

#### 4. Зручного управління станом порту.

```
#define drv_1_0 GPIOA->BRR |= 1<<4
#define drv_1_1 GPIOA->BSRR |= 1<<4
```

```
#define drv_2_0 GPIOA->BRR  |= 1<<5  
#define drv_2_1 GPIOA->BSRR |= 1<<5
```

5. Роботи з таймерами всіх призначень, а так само для реалізації затримки в роботі програми [20].

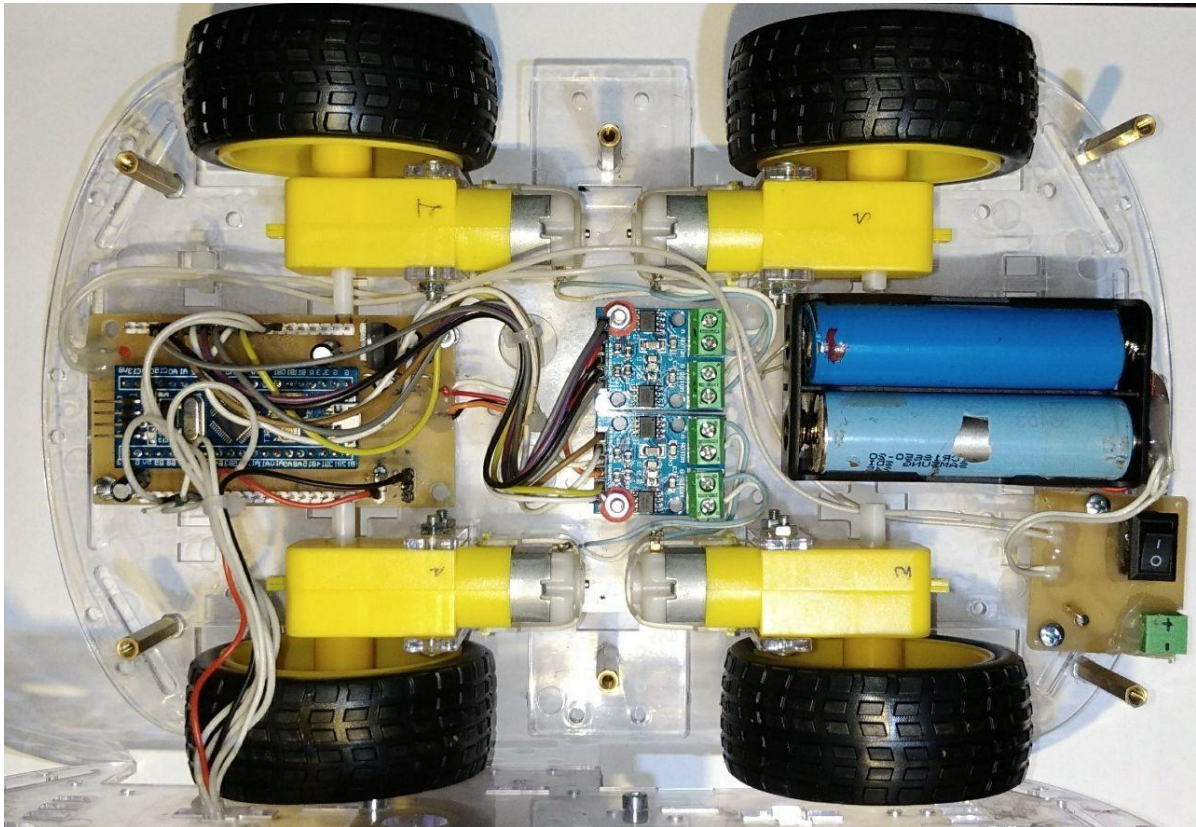


Рисунок 3.2 – Вигляд мобільного робота

В цілому, мобільний робот може рухатися вперед-назад і повертати; реалізовано режим автономного управління рухом, з можливістю уникання перешкод; корегує швидкість руху в залежності від відстані до перешкоди; також є простим для збирання і розбирання (для подальших модифікацій).

### 3.2 Локалізація мобільного робота

Здатність мобільного робота визначати своє поточне місцезнаходження та сканувати навколишнє середовище є основоположним для його автономної роботи, що зазвичай називається локалізацією. Методи локалізації засновані на

виборі орієнтирів зі сканування та їх розпізнаванні для отримання геометричного положення робота. Методи цього типу включають:

- локалізацію Маркова;
- локалізацію з використанням узагальненого фільтра Калмана (GKF);
- локалізацію методу фільтрації частинок.

Для здійснення уникнення перешкод роботом необхідно знати відстані до предметів навколо нього. Для оцінки зміни положення робота використовуються датчики кута двигунів (кодери), візуальні одометри або інерційні вимірювальні прилади. Дуже часто неточності в датчиках впливають на локалізацію мобільного робота. Ці неточності викликані різними факторами; це внутрішні перешкоди датчиків і шум навколишнього середовища. Для подолання цих шумів, для покращення локалізації мобільного робота необхідно застосувати метод фільтрації.

### 3.2.1 Принцип дії ультразвукових датчиків відстані

За допомогою ультразвукових хвиль датчики руху виконують сканування навколишнього середовища на наявність перешкод при переміщенні мобільного робота.

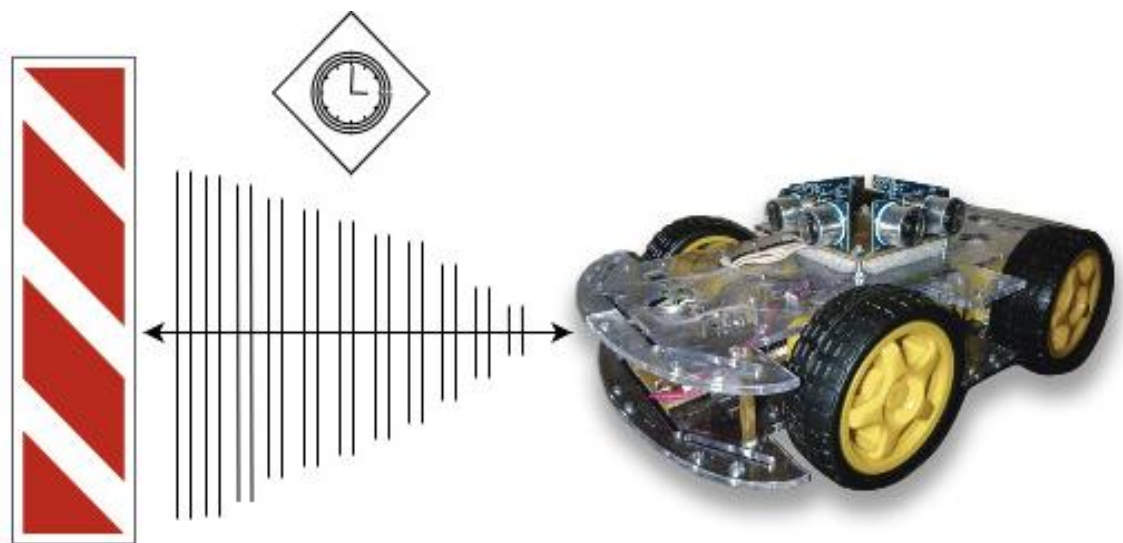


Рисунок 3.3 – Виявлення перешкоди на шляху мобільного робота

Принцип дії таких датчиків полягає в наступному: на платі модуля є п'єзо-ультразвуковий передавач та мікрофон, який відчуває високочастотну хвилю (25-40 кГц), яка відбивається перешкодою. Такі звукові хвилі не сприймаються людським вухом. Датчик нічого не обчислює самостійно, а лише дає імпульс певної тривалості. За допомогою мікроконтролера відбувається злагоджена робота приймача і передавача ультразвуку, обчислення відстані до об'єкту, розрахунок зміни параметрів ехо-імпульсу (рис. 3.3).

В основі роботи ультразвукових датчиків руху знаходиться ефект Допплера [18]. Відповідно до ефекту Допплера, будь-який предмет, що перетинає ультразвуковий потік, впливає на інтерференційну картину хвиль. Ефект Допплера полягає в тому, що випускаються джерелом звукові хвилі з певною частотою, сприймаються приймачем на частоті, відмінній від частоти, коли джерело і (або) приймач рухаються відносно один одного. Тобто, доплерівська частота  $f_d$  дорівнює:

$$f_d = \frac{-V_{rs}}{c} f_s, \quad (3.1)$$

де  $V_{rs}$  – швидкість приймача відносно джерела,  $f_s$  – частота джерела,  $c$  – швидкість поширення хвилі, яку випромінює джерело.

### **3.2.2 Застосування ультразвукових датчиків для локалізації мобільного робота**

Локалізація мобільного робота проводилась у типовому приміщенні, що містить різноманітні статичні перешкоди. Під час експериментів середня швидкість мобільного робота становила 0,4 м/с.

Робот визначає наявність предметів та відстань до них, спочатку надсилаючи ультразвуковий промінь, а потім отримуючи його із затримкою відбиття. Ультразвукові сигнали, що генеруються приймачем на частоті 40 кГц,

відбиваються від перешкоди і повертаються до неї через певний проміжок часу. Саме цей часовий проміжок стає характеристикою, яка допомагає визначити відстань до об'єкту.

Розрахунок відстані  $L$  базується на отриманому часі й обчислюється за такою формулою:

$$L = v \cdot t; t = T/2 \Rightarrow L = v \cdot T/2, \quad (3.2)$$

де  $t$  - час хвилі від датчика до об'єкту,  $T$  - час хвилі від датчика до об'єкту і назад,  $v = 340$  м / с - швидкість ультразвуку.

Поділ на два необхідний, оскільки сигнал проходить відстань до об'єкта і назад, коли потрібна лише відстань до об'єкту. Для вимірювання тривалості сигналу використовується таймер. Таймер встановлений так, що 1 біт становить 0,000001 с. Тому формула (3.2) виглядатиме так:

$$L = v \cdot T/2 \Rightarrow L = v \cdot T_{im} \cdot 10^{-6} / 2, \quad (3.3)$$

де  $T_{im}$  - кількість відкликів таймера в мікросекундах.

Заключна формула розрахунку виглядатиме так:

$$L = 340 \cdot T_{im} \cdot 10^{-6} / 2 = 170 T_{im} / 10^6, \quad (3.4)$$

Щоб виразити цю відстань у см:

$$L_{cm} = 17 T_{im} / 10^3 = 0,017 T_{im}. \quad (3.5)$$

Однак у мікроконтролері не передбачені операції з плаваючою комою. Тому для обчислення відстані необхідно використовувати формулу, де число 0,017 було замінено взаємно оберненим:

$$L_{cm} = T_{im} / 58. \quad (3.6)$$

Наведених формул цілком достатньо для правильного вимірювання відстані; однак, якщо є необхідність у вдосконаленні вимірювань точності, необхідно застосувати фільтрацію для регулювання інтенсивності шуму при адаптаційному взятті даних з датчиків. Тому для локалізації мобільного робота використано фільтр Калмана.

### 3.2.3 Фільтр Калмана

Усі різновиди фільтра Калмана належать до групи байєсівських підходів і можуть, зокрема, використовуватися для локалізації мобільних роботів.

Фільтр Калмана являє собою лінійний рекурсивний алгоритм прогнозування, що використовується для оцінки параметрів моделі процесу. Починаючи з початкових оцінок, фільтр Калмана дозволяє прогнозувати параметри моделі та коригувати його з кожним новим виміром. Його здатність поєднувати ефекти шуму як процесу, так і вимірювань, зробила його дуже популярним у багатьох галузях досліджень та додатках, зокрема в області автономної та допоміжної навігації. З цієї причини фільтр Калмана регулярно використовується системами, що розвиваються з плином часу, де оцінка стану в наступний момент отримується в два етапи. На першому етапі, який називається прогнозуванням, оцінка стану виконується на основі деякої моделі динаміки системи. Другий крок - корекція, оскільки оцінка покращується при деяких вимірюваннях. Таким чином, фільтр Калмана оцінює вектор стану динамічної системи і використовує ряд неповних, неточних вимірювань.

Оцінка відстані виконується за допомогою наступного алгоритму, розробленого авторами в [10-11] та оновленого відповідно до цілей локалізації мобільних роботів. Алгоритм складається з 5 етапів наступним чином.

*Крок 1.* Ініціалізація.

Встановити  $k = 0$ ,  $x_0^-$ ,  $P_0^-$ .

*Крок 2. Екстраполяція.*

а) Оцінка стану екстраполяції:

$$x_{k+1}^- = F \cdot x_k^- + B \cdot u_k, \quad (3.7)$$

де  $x_{k+1}^-$  - прогнозований час ехо-імпульсу до перешкоди в момент часу  $k+1$ ;  $x_k^-$  - прогнозований час в момент часу  $k$ ;  $F$  - матриця переходу станів (динамічна модель системи), яка описує залежність від часу між  $x_k^-$  та  $x_{k+1}^-$ , отриману з історичних даних;  $B$  - матриця застосування керуючого впливу;  $u_k$  - керуючий вплив в попередній момент часу.

б) Передбачення помилки коваріації:

$$P_{k+1}^- = F \cdot P_k \cdot F^T + Q_k, \quad (3.8)$$

де  $P_{k+1}^-$  - прогноз помилки;  $P_k$  - помилка в попередній момент часу;  $Q_k$  - коваріація шуму процесу.

*Крок 3. Обчислення коефіцієнту посилення фільтра Калмана*

$$K_k = \frac{P_k^- \cdot H^T}{H \cdot P_k^- \cdot H^T + R}, \quad (3.9)$$

де  $K_k$  - посилення Калмана;  $H$  - матриця вимірювань, що відображає ставлення вимірювань і станів;  $R$  - коваріація шуму вимірювання.

*Крок 4. Уточнення*

а) Уточнення оцінки з урахуванням виміру  $z_k$ :

$$x_k = x_k^- + K_k \cdot (z_k - H \cdot x_k^-), \quad (3.10)$$

де  $z_k$  - вимір в поточний момент часу.

б) Уточнення помилки коваріації:

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k^-, \quad (3.11)$$

де  $I$  - матриця ідентичності.

Якщо стан системи описується однією змінною, то  $I = 1$ , а матриці вироджуються в звичайні рівняння.

*Крок 5:* поки мобільний робот не досягне перешкоди, призначить  $k = k + 1$  і повернутися до кроку 2.

Нижче наведено фрагмент коду локалізації мобільного робота з вбудованою фільтрацією Калмана:

```
void TIM4_IRQHandler(void)
{
    int temp;
    int keep_temp;
        TIM4->SR &=~ 1<<4|1<<12|1<<0;
    keep_temp = TIM4->CCR2;
    keep_temp = keep_temp/58;
    #define kof 0.8
        if(keep_temp == 0){keep_temp = dist_front; }
        temp = keep_temp;
    out_filtr = kof*(float)temp + (1-kof)*data_old;
    data_old = out_filtr;
    dist_front = (int)out_filtr;
        if(dist_front<= 2 ){dist_front = 0;}
}
```

Цей метод відповідає за оновлення показань датчиків, які є контрольними точками. При зміні положення робота змінюється також поточне положення і нове положення оновлюється за допомогою фільтра Калмана. Після цього робот отримує орієнтири з навколишнього середовища і намагається об'єднати дані з тими, які були доступні раніше.

### 3.2.4 Результати тестування

В ході експерименту зчитувались показання ультразвукових датчиків руху мобільного робота. Частота опитування датчиків залежить від відстані між роботом і перешкодою та досягає 80 разів за секунду на відстані 20 см.

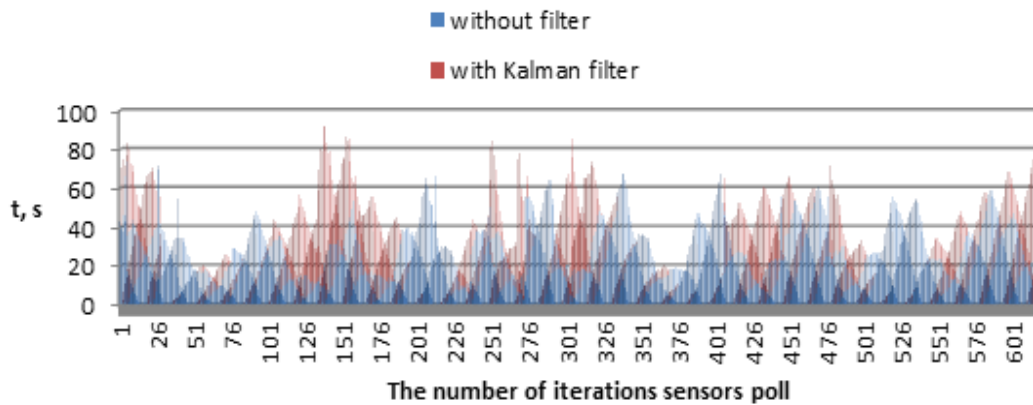


Рисунок 3.4 – Час руху ультразвукових хвиль

На рисунку 3.4 показано час руху ультразвукових хвиль від датчиків мобільного робота до перешкод з і без використання фільтра Калмана.

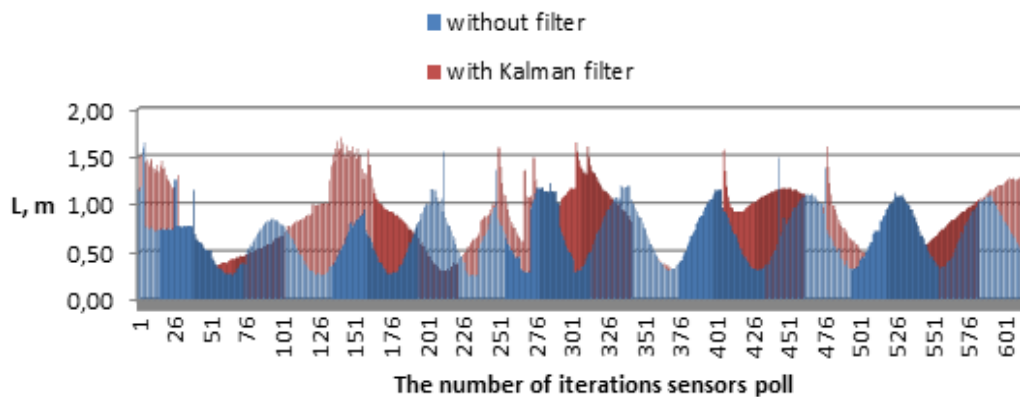


Рисунок 3.5 – Відстань між мобільним роботом і перешкодою

Отримані дані були перераховані згідно методу локалізації. На рисунку 3.5 показано відстань між мобільним роботом і перешкодою з фільтром Калмана і без нього.

На діаграмах 3.4-3.5 та з таблиці 3.2 видно, що застосування фільтра дозволило уникнути додаткових перешкод при зніманні даних з датчика, адаптивно регулювати інтенсивність шуму, що допомогло згладити показання ультразвукових датчиків мобільного робота, що покращує процес руху та визначення перешкод на шляху мобільного робота. Показник RMSE часу та відстані між мобільним роботом та перешкодою склав відповідно 4,15 с та 0,07 м.

Таблиця 3.2 – Оцінка точності даних

Характеристики	RMSE	
	$t_{im}$	$L_{cm}$
без фільтру	5.47 с	0.09 м
з фільтром Калмана	4.15 с	0.07 м

У цій роботі фільтр Калмана використовується для вдосконалення локалізації мобільного робота, оснащеного мікроконтролером та чотирма ультразвуковими датчиками. Запропоновано новий алгоритм запобігання уникненню перешкод у режимі реального часу, достатньо швидкий для впровадження на вбудованих мікроконтролерах автономних мобільних роботів. Застосування фільтра Калмана дозволяє роботів уникнути додаткових перешкод при передачі даних від датчика, адаптуючи адаптивну інтенсивність шуму, що забезпечує плавніше переміщення робота [17].

### **3.2.5 Залежність точності локалізації мобільного робота від температури повітря в приміщенні**

Швидкість звуку в повітрі залежить від температури. Це впливає на точність датчиків, а як наслідок і на точність локалізації мобільного робота [19]. Залежність швидкості звуку  $v$  від температури повітря (табл. 3.3) виражається формулою (3.12):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}, \quad (3.12)$$

де  $\gamma = 1,40$  – показник адіабати повітря;  $M = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль – молярна маса повітря;  $R = 8,31$  Дж/моль·К – газова постійна;  $T$  – температура повітря в Кельвінах.

Таблиця 3.3 - Залежність швидкості звуку від температури повітря

Температура повітря		Швидкість ультразвуку в залежності від температури повітря	
t, °C	T, K	м/с	км/год
0	273,15	331,0	1191,6
10	283,15	337,0	1213,2
20	293,15	342,9	1234,4
22	295,15	344,1	1238,8

Тоді, як зазвичай, для ультразвукових датчиків прийнято вважати  $v = 340$  м/с - швидкість ультразвуку.

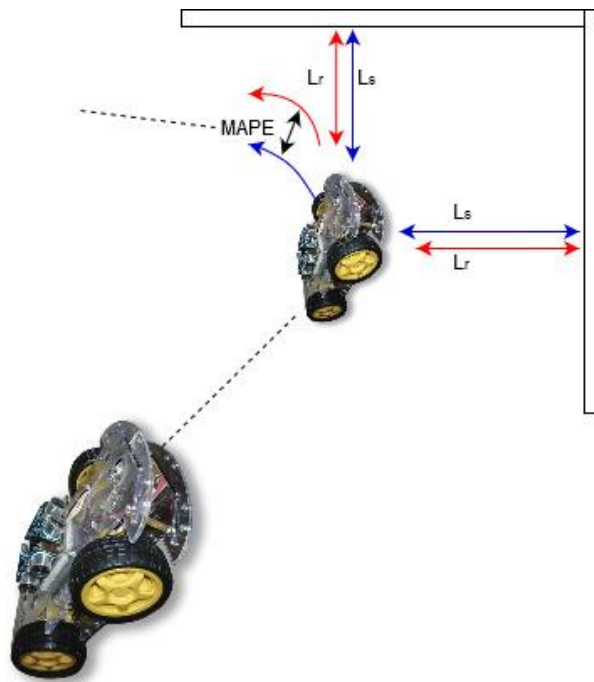


Рисунок 3.6 – Відстеження помилок

Це означає, що при зміні температури навколишнього середовища точність вимірювання даних ультразвукових датчиків мобільного робота знижується. На рисунку 3.6 показано, як похибка датчиків, викликана температурними умовами, впливає на значення отриманих відстаней до перешкоди, де  $L_r$  - відстань до перешкоди, засноване на розрахунку залежно від температури в приміщенні,  $L_s$  - відстань до перешкоди, виходячи з даних ультразвукових датчиків, МАРЕ - помилка локалізації мобільного робота. Як видно, це призводить до затримки повороту в обхід перешкоди і зменшує точність локалізації мобільного робота.

Для оцінки похибки, отриманої від датчиків, обчислюємо відстані до перешкоди для різних кімнатних температур (рис. 3.7). Отримані результати порівняли з даними ультразвукових датчиків.

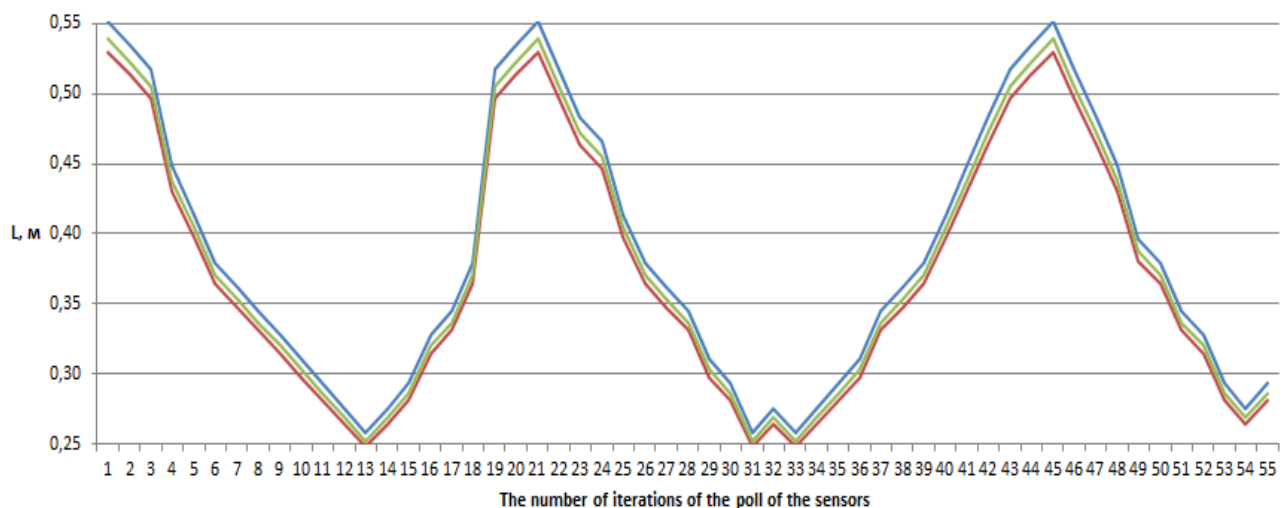


Рисунок 3.7 – Відстань до перешкод при різній кімнатній температурі (червона лінія для 0°C, зелена лінія для 10°C і синя лінія для 22°C)

Таким чином, найменша похибка при локалізації мобільного робота спостерігається при реальній температурі приміщення 22°C (табл. 3.4).

Вирішити ж проблему локалізації для різного температурного режиму можна, встановивши датчик температури і регулювати значення швидкості ультразвуку в залежності від показань датчика температури.

Таблиця 3.4 - Оцінка значень МАРЕ в залежності від температури приміщень

Температура t, °C	Швидкість ультразвуку, м/с	МАРЕ, %
0	331,0	4,00
10	337,0	2,26
20	342,9	0,55
22	344,1	0,21

### 3.3 Метод управління рухом

Завдання створення роботів, здатних переміщатися без допомоги людини, уникаючи зіткнення з перешкодами, тобто здійснення автономного руху, складається в основному з трьох задач. По-перше, спланований шлях повинен пролягатиме від точки А в точку В. По-друге, цей шлях повинен забезпечувати рух робота з обходом можливих перешкод. По-третє, шлях повинен серед всіх можливих шляхів, які відповідають першим двом вимогам, бути в певному сенсі оптимальним.

Основними методами управління рухом вважаються:

- методи на основі графів;
- методи на основі клітинної декомпозиції;
- методи потенційних полів [12];
- оптимізаційні методи;
- методи на інтелектуальних алгоритмах [13-14].

#### 3.3.1 Алгоритм управління рухом, ґрунтуючись на розташуванні мобільного робота

Управління руху ґрунтується на розташування мобільного робота, і як воно відноситься до світової системи координат, що дозволить йому рухатися по точному шляху вздовж послідовності заздалегідь певних точок (рис. 3.8).

Рух робота складається з прямолінійних відрізків окремо від розворотів на місці. Мобільний робот прагне звести до мінімуму загальну подолану відстань, так що завжди відразу повертається передньою частиною до наступної точки та їде прямо до неї.

На першому кроці управління руху, припустимо, що поточний стан мобільного робота  $(x, y, \theta)$  і наступної точкою є  $(W_x, W_y)$ .

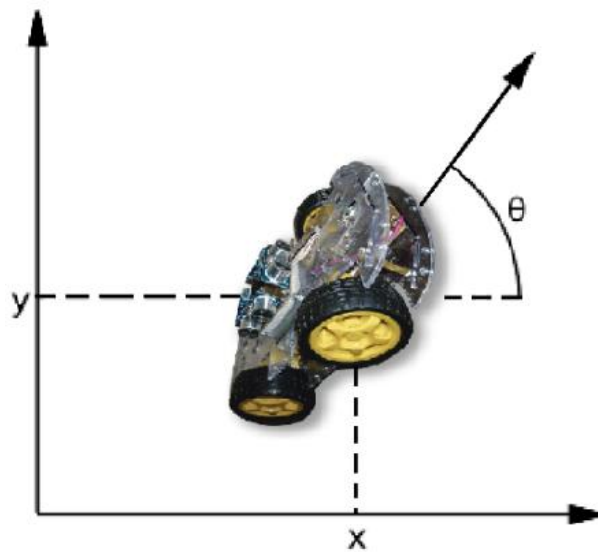


Рисунок 3.8 - Управління руху, ґрунтуючись на розташуванні мобільного робота

Спочатку робот повинен повернутися до зазначеної точки. Вектор спрямування повинен вказувати на:

$$\begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_x - x \\ W_y - y \end{pmatrix}. \quad (3.13)$$

Абсолютне значення кута в градусах  $\alpha$ , до якого мобільний робот повинен повернутися:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{d_y}{d_x}. \quad (3.14)$$

Необхідно переконатися, що  $\alpha$  знаходиться в правильному квадранті  $-\pi < \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ . Робот уже повернутий на певний кут, тому кут на який він повинен повернутися  $\beta = \alpha - \theta$ .

Щоб мобільний робот рухався найбільш ефективно, потрібно змстити кут, додавши або віднімаючи  $2\pi$ , щоб  $-\pi < \beta \leq \pi$ . Після цього, мобільний робот повинен рухатися по прямій на відстань:

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}. \quad (3.15)$$

Тобто, алгоритм управління рухом мобільного робота (рис. 3.9) полягає в тому, що робот сканує навколишнє середовище для визначення наявності перешкод на шляху.

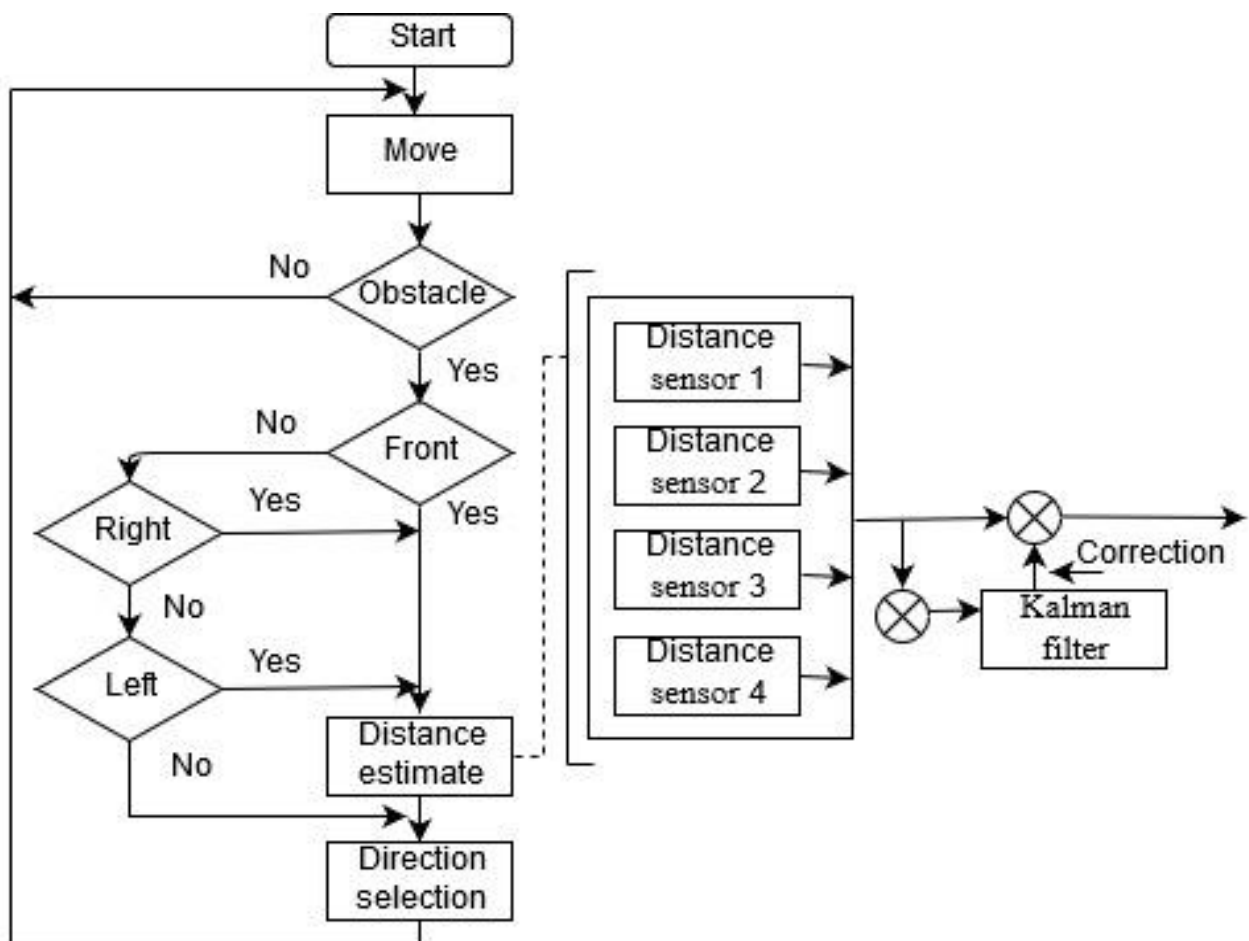


Рисунок 3.9 - Алгоритм управління рухом мобільного робота

Після знаходження шляху, на якому відсутні перешкоди, мобільний робот при русі електромоторів в різних напрямках робить розворот і починає рухатися вперед до тих пір, поки не зустрінеться з новою перешкодою (рис. 3.10).

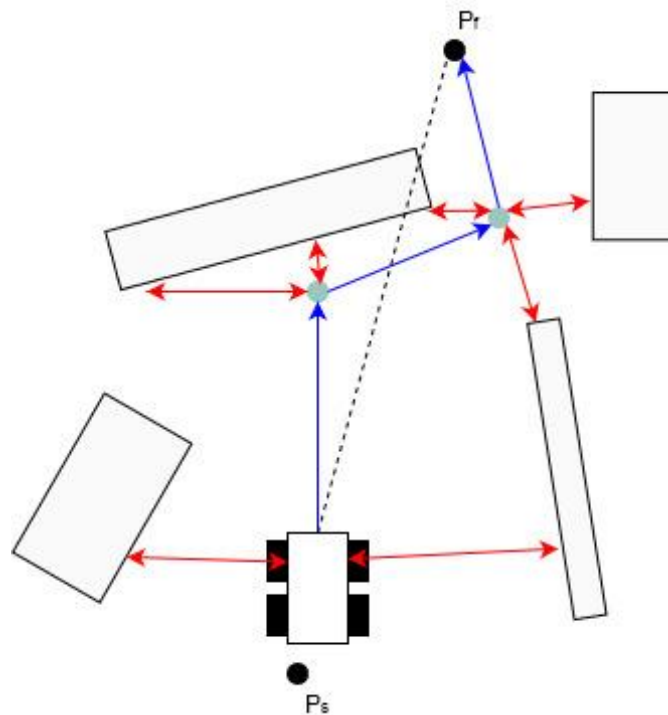


Рисунок 3.10 - Схема уникнення перешкод

### 3.3.2 Результати використання розробленого алгоритму

Згідно розробленого алгоритму було проведено тестування управління рухом мобільного робота, під час якого були взяті показання ультразвукових датчиків руху мобільного робота (рис. 3.11).

На діаграмі точки мінімуму відповідають максимальному наближенню мобільного робота до перешкоди, після чого здійснюється поворот до безпечного напрямку та рух на безпечну відстань.

Розроблено алгоритм управління руху, що базується на розташуванні мобільного робота, який передбачає наступне: спочатку робот рухається прямо до цілі. Якщо виявлена перешкода, то перше, що потрібно зробити, це визначити її розташування відносно робота; коли перешкода знаходиться безпосередньо на шляху робота, йому потрібно вирішити, в який бік повернути, тобто обрати

найбільш оптимальним напрямком руху. Мобільний робот перераховує напрямок, намагаючись знайти вільний шлях, і продовжує свій рух у новому напрямку, поки ціль не стане видимою або до появи нової перешкоди.

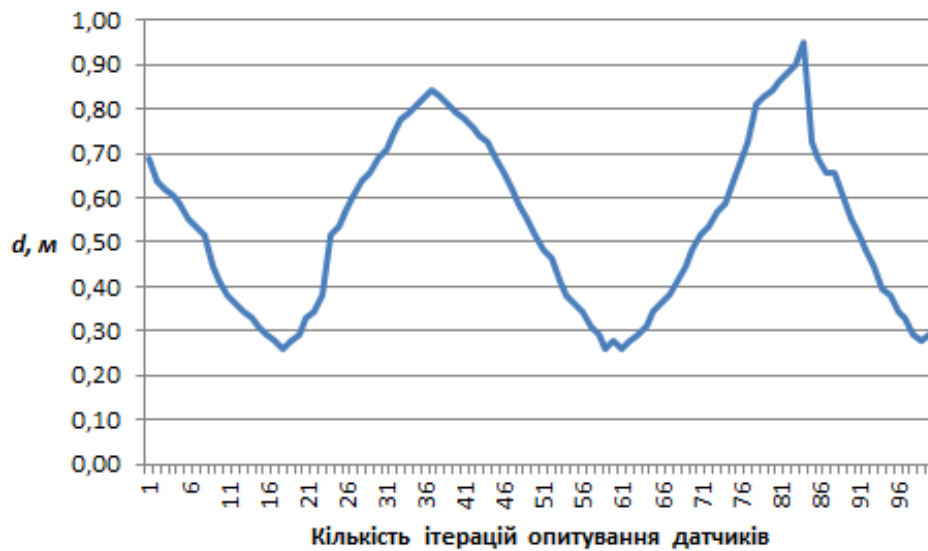


Рисунок 3.11 - Тестування алгоритму управління рухом мобільного робота

Результати, отримані завдяки тестуванню розробленого алгоритму, підтверджують прийнятність алгоритму, здатного автоматизувати пересування мобільного робота, який є головним кроком на шляху до створення повністю автономних і багатофункціональних роботів.

## ВИСНОВКИ

У науково-дослідній роботі поставлено та розв'язано актуальне наукове-прикладне завдання досліджено методи навігації на прикладі розробленого мобільного робота. Отримано наступні наукові та практичні результати роботи:

1. Проведено аналіз сучасного стану впровадження роботехнічних систем в залежності від галузі застосування. Виділені типи систем управління роботехнічних систем та сенсори роботів. Розглянуті основні характеристики та алгоритми локалізації. Досліджені методи навігації.

2. Розроблено мобільний робот з ультразвуковими датчиками відстані, які дуже затребувані в робототехнічних проектах через свою відносну простоту, достатню точність та доступність.

3. Удосконалено точність локалізації за рахунок використання фільтра Калмана, в результаті чого RMSE становив 4,15 с і 0,07 м, а також встановлено залежність точності локалізації від температури повітря в приміщенні, де відбувається тестування мобільного робота. Застосування фільтрації дозволяє уникнути додаткових перешкод при зніманні даних з датчика, регулювати інтенсивність шуму, що забезпечує плавніше переміщення робота. Наступною перевагою запропонованого підходу є те, що стабільність фільтра можна відстежувати в режимі онлайн, а також надійність та ступінь використання інформації спостережень адаптивно коригуються, завдяки чому продуктивність фільтра може бути поліпшена.

4. Розроблено алгоритм управління напрямком руху мобільного робота, принцип дії якого полягає в наступному: ультразвукові датчики сканують навколишню місцевість для визначення наявності перешкод на шляху мобільного робота. Після знаходження шляху, на якому відсутні перешкоди, мобільний робот при русі електромоторів в різних напрямках робить розворот і починає рухатися вперед до тих пір, поки не зустрінеться з новою перешкодою.

5. Запропоновані методи та алгоритми впроваджені при розробці курсів для навчального процесу.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Nagy C. Ultrasound-Based Indoor Robot Localization Using Ambient Temperature Compensation / C. Nagy, Z. Biró-Ambrus, L. Márton // *Acta Universitatis Sapientiae Electrical and Mechanical Engineering*. – Vol. 8. – 2016. – pp. 19-28.
2. Petrovski K. On the Kalman Filter Approach for Localization of Mobile Robots / K. Petrovski, S. Jovanovski, M. Mirchev, L. Basnarkov // *International Conference on ICT Innovations*. – 2016. – pp. 123-133.
3. Stączek P. Digital signal processing in ultrasonic based navigation system for mobile robots / P. Stączek // *ITM Web of Conferences*. – Vol. 15. – 2017.
4. Moussa M. Ultrasonic based heading estimation for aiding land vehicle navigation in GNSS denied environment / M. Moussa, A. Moussa, N. El-Sheimy // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – Vol. XLII-1. – 2018. – pp. 315-322.
5. Kondratenko Y. A simulation model for robot's slip displacement sensors / Y. Kondratenko, O. Gerasin, A. Topalov // *International Journal of Computing*. – Vol.15, Issue 4. – 2016. – pp. 224-236.
6. Li S.E. Kalman filter-based tracking of moving objects using linear ultrasonic sensor array for road vehicles / S.E. Li, G. Li, J. Yu, C. Liu, B. Cheng, J. Wang, K. Li // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – Vol. 98. – 2018. – pp. 173-189.
7. Keke G. A fuzzy controller: Using monocular computer vision to see and avoid obstacle for quadcopter / G. Keke, L. Wei, T. Liguó // *5th intern. workshop on computer science and engineering: Information processing and control engineering: WCSE 2015-IPSE: Proc. Chenghu: Science and Engineering Inst.* – 2015.
8. <https://www.keil.com/download/>
9. <http://www.keil.com/dd/docs/arm/st/stm32f10x/stm32f10x.h>
10. Mohd Nasir N.Z. Autonomous mobile robot localization using Kalman filter / N. Z. Mohd Nasir, M. A. Zakaria, S. Razali, M.Y. bin Abu // *MATEC Web of Conferences*. – Vol. 90. – 2017.

11. Skarga-Bandurova I. A Framework for Real-Time Public Transport Information Acquisition and Arrival Time Prediction Based on GPS Data / I. Skarga-Bandurova, M. Derkach, A. Velykzhanin // Dependable IoT for Human and Industry: Modeling, Architecting, Implementation. –River Publishers Series in Information Science and Technology (Eds. V. Kharchenko, Ah L. Kor, A. Rucinski). – 2018. – pp. 411-431.
12. Alvarez D. 3D robot formations path planning with fast marching square / D. Alvarez, J.V. Gomez, S. Garrido, L. Moreno // J. of Intelligent and Robotic Systems. – 2015. Vol. – 80, No. 3-4. – pp. 507–523.
13. Ma J.-C. Multi-behavior fusion-based path planning for mobile robot / J.-C. Ma, Q. Zhang, L.-Y. Ma, W. Xie // Beijing Ligong Daxue Xuebao // Trans. of Beijing Inst. of Technology. – 2014. – Vol. 34, No. 6. – pp. 576–581.
14. Yu J. Dynamical Tracking of Surrounding Objects for Road Vehicles using Linearly-Arrayed Ultrasonic Sensors / J. Yu, S.E. Li // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – 2016. – pp. 72-77.
15. Деркач М.В. Розробка алгоритму управління рухом мобільного робота / М.В. Деркач, Д.С. Матюк // Наукові вісті Далівського університету. Електронне видання. 2019. №17.
16. Матюк Д.С. Мобільний робот «SMART CAR» / Д.С. Матюк, О.Є. Мишко, М.В. Деркач // IT-Ідея – 2019: збірник науково-практичних праць. – Северодонецьк: Вид-во Східноукр. Ун-ту ім. В. Даля, 2019. – С.38–40.
17. Derkach M. Obstacle Avoidance Algorithm for Small Autonomous Mobile Robot Equipped with Ultrasonic Sensors / M. Derkach, D. Matiuk, I. Skarga-Bandurova // IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). - Kyiv, Ukraine, 2020. – pp. 236 – 241.
18. Матюк Д.С. Використання ефекту Допплера для регулювання руху мобільного робота / Д.С. Матюк, М.В. Деркач // Сучасні технології в науці та освіті: матеріали Третьої Міжнародної науково-практичної конференції; у 2-х ч. Ч. 1 / Гол. ред. О. І. Рязанцев; 27–28 лютого 2020 р., м. Северодонецьк. — Северодонецьк: вид-во СХУ ім. В. Даля, 2020. – 188с. – С. 111-113.

19. Матюк Д.С. Вплив температури повітря на точність локалізації мобільного робота / Д.С. Матюк, О.Є. Мишко, М.В. Деркач // «Інтелектуальний потенціал – 2020» - збірник наукових праць молодих науковців і студентів / Колектив авторів – Хмельницький: ПВНЗ УЕП, 2020. – Частина 1. – 100 с. – С.46–48.

20. Матюк Д.С. Реалізація переривань і таймерів на мікроконтролері STM32 при розробці мобільного робота / Д.С. Матюк, М.В. Деркач // Технологія-2020: матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Сєверодонецьк: СНУ ім.В.Даля, 2020.

21. Деркач М.В. Альтернативний метод для роботи з датчиком MPU-6050 по шині даних I2C / М.В. Деркач, Д.С. Матюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ", 2020. – № 2 (4). – С.55–67.

22. Матюк Д.С. Використання лазерно-прасувальної технології для виготовлення друкованої плати / Д.С. Матюк, М.В. Деркач // Технологія – 2021: XXIV матеріали міжнар. наук.-техн. конф. 16 квіт. 2021 р., м. Сєверодонецьк / [укл.: Тарасов В.Ю.]. – Сєверодонецьк: [Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля], 2021. – С. 206 – 208.