

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення методу прокладення траєкторії руху робота- сапера на основі даних
від металошукача
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи АУТПм-22-1
Лубінець М.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. Сичова О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2023р.

Я, як студент ХНУРЕ Лубінець М.С., розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата

П.І.Б.

04.01.2024

Лубінець М.С.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ
 Кафедра КІТАР
 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 КІТАР _____

(підпис)

«03» 11 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Лубінцю Максиму Сергійовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення методу прокладення траєкторії руху робота-сапера на основі даних від металошукача

Затверджена наказом по університету від 3 листопада 2023р. № 1286 СТ

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____

3. Вихідні дані до роботи _____

Мова програмування – С#

Спосіб моделювання – комп'ютерна модель

Тип детектування – металошукач

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ.

4.2 Аналіз вирішення завдань пошуку вибухонебезпечних предметів.

4.3 Аналіз методів пошуку вибухонебезпечних предметів

4.4 Вдосконалення методу планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем

4.5 Розробка програмного засобу для моделювання руху мобільного робота

4.6 Програмна реалізація запропонованого методу планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем

4.7 Висновки.

4.8 Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 15 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 літератури за темою атестаційної роботи	03.11 – 07.11.23	Виконано
2	Аналіз методів пошуку вибухонебезпечних предметів	07.11– 15.11.23	Виконано
3	Вдосконалення методу планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем	16.11 – 21.11.23	Виконано
4	Розробка програмного засобу для моделювання руху мобільного роботу	22.11 – 29.11.23	Виконано
5	Програмна реалізація запропонованого методу планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем	30.11 – 30.12.23	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	30.12.23	Виконано
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unicheck	12.01.24	Виконано
8	Подання роботи на рецензію	14.01.24	Виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.01.24	Виконано
10	Подання атестаційної роботи в ЕК		Виконано

Дата видачі завдання 03.11.2023 р.

Студент _____ Лубінець М.С.
 (підпис) прізвище, ініціали

Керівник роботи _____ доц. каф. КІТАР Сичова О.В.,
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 62 с., 24 рис., 16 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, МЕТАЛОДЕТЕКТОР, ТРАЄКТОРІЯ РУХУ,
ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІ ПРЕДМЕТИ.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес пошуку вибухонебезпечних предметів.

Предмет дослідження – методи планування траєкторії руху мобільного робота з урахуванням інформації про знайдені вибухобезпечні предмети.

Мета роботи розробка методу виявлення вибухонебезпечних предметів шляхом вдосконалення методики планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем.

Проведено аналіз методів пошуку вибухонебезпечних предметів. Аналіз показує, що наявні методи виявлення й розпізнавання, залежно від характеристик об'єктів пошуку та навколишніх умов, мають обмеження в імовірності виявлення й не забезпечують необхідного рівня продуктивності пошуку.

Наведено класифікацію методів виявлення за фізичними принципами та порівняння методів виявлення ВВП.

Проведено аналіз існуючих рішень планування траєкторії руху робота для пошуку ВВП та досліджено запропонований підхід для планування траєкторії руху мобільного робота під час пошуку вибухонебезпечних предметів.

Недоліком запропонованого рішення є наявність допоміжного іншого роботизованого пристрою та недоопрацьованість алгоритму планування маршруту в залежності від навколишнього середовища.

ABSTRACT

Explanatory note: 62 p., 24 figures, 16 sources.

MOBILE ROBOT, METAL DETECTOR, MOVEMENT TRAJECTORY, EXPLOSIVE OBJECTS.

The object of research in this work is the process of searching for explosive objects.

The subject of the research is methods of planning the trajectory of a mobile robot taking into account information about the found explosive objects.

The purpose of the work is to develop a method for detecting explosive objects by improving the method of planning the trajectory of a mobile autonomous robot with a metal detector.

An analysis of methods for detecting explosive objects has been carried out. The analysis shows that the existing methods of detection and recognition, depending on the characteristics of the search objects and environmental conditions, have limitations in the probability of detection and do not provide the required level of search performance.

The article provides a classification of detection methods by physical principles and a comparison of IED detection methods.

The existing solutions for planning the trajectory of a robot for finding ERW are analysed and the proposed approach for planning the trajectory of a mobile robot during the search for explosive objects is investigated.

The disadvantage of the proposed solution is the presence of an auxiliary robotic device and the lack of development of the algorithm for route planning

ЗМІСТ

Зміст.....	6
Вступ.....	9
1 Аналіз вирішення завдань пошуку вибухонебезпечних предметів	11
1.1 Аналіз методів пошуку вибухонебезпечних предметів	11
1.2 Аналіз існуючих рішень планування траєкторії руху роботу для пошуку ВНП.....	22
1.3 Постановка задач дослідження.....	27
1.4 Висновки до розділу 1	28
2 Вдосконалення методу планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем.....	29
2.1 Загальні вимоги щодо вдосконалення методу планування траєкторії руху мобільного роботу.....	29
2.2 Кінематична модель робота	29
2.3 Метод сканування території при пошуку ВНП	32
2.4 Розробка метода об'їзду знайдених ВНП.....	36
2.5 Висновки до розділу 2	42
3 Розробка програмного засобу для моделювання руху мобільного роботу..	43
3.1 Вибір засобів програмування.....	43
3.2 Програмна реалізація запропонованого методу планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем.....	44
3.3 Висновки до розділу 3	51
4 Експериментальні дослідження.....	52
4.2 Висновки до розділу 4	56

Висновки	57
Перелік джерел посилань	59
Додаток А Абробачія наукових результатів дослідження.....	62
Додаток Б Демонстраційний матеріал	78

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ББІС– багатоцільові безпілотні інтелектуальні системи;

ВНП – вибухонебезпечні предмети;

ІТ– інформаційні технології;

GPS– Global Positioning System;

SMAMD– Single-system Multi-mission Airborne Mine Detection

ВСТУП

Міни – одна з найбільших небезпек для людського життя. Щороку тисячі людей отримують поранення внаслідок випадкових вибухів наземних мін у відомому чи невідомому середовищі. У світі приблизно 100 мільйонів наземних мін закладено приблизно в 70 різних країнах. Сучасні методи можуть виявити лише близько 100 000 на рік. Процедура пошуку мін значно відрізняється залежно від таких факторів, як: розташування, рельєф місцевості, розподіл мін, щільність ґрунту, вік мінного поля, покривна рослинність і доступні місцеві ресурси [5].

Наразі одним з ефективних способів для виявлення та знешкодження наземних мін і вибухонебезпечних боєприпасів є застосування на підозрюваній місцевості безпілотного транспортного засобу, який оснащено системою виявлення та знешкодження. У сфері виявлення наземних мін величезна кількість досліджень була спрямована на сенсорні технології, такі як: датчики запаху, акустичні датчики, датчики електромагнітної індукції, датчики електричного опору, інфрачервоні та мікрохвильові, радіометричні та радарні [5].

Мета роботи розробка методу виявлення вибухонебезпечних предметів шляхом вдосконалення методики планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес пошуку вибухонебезпечних предметів.

Предмет дослідження – методи планування траєкторії руху мобільного робота з урахуванням інформації про знайдені вибухобезпечні предмети.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

– провести наліз аналогічних рішень та методів пошуку вибухонебезпечних предметів;

- виконати опис запропонованого методу сканування території та побудови траєкторії обходу знайдених ВНП.
- побудувати кінематичну модель робота та описати математичні моделі визначення координат ВНП і положення мобільного робота;
- виконати побудову алгоритму та розробити програму для проведення експериментальних досліджень;
- виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень.

1 АНАЛІЗ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ПОШУКУ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

1.1 Аналіз методів пошуку вибухонебезпечних предметів

Враховуючи важливість розчищення територій від вибухонебезпечних предметів (ВНП), численні дослідження проводилися щодо [6]: аналізу та класифікації наявних методів пошуку [7, 8], сучасних більш ефективних методів, зокрема з одночасним використанням декількох методів, що ґрунтуються на використанні комбінованих методів, коли пошук ведеться зокрема із застосуванням безпілотних апаратів [9, 10]. Досліджуються та випробовуються також біологічні методи пошуку, що ґрунтуються на особливих властивостях тварин, комах та мікроорганізмів.

Необхідно зазначити, що, попри великий обсяг досліджень, класифікації методів розроблені без урахування чіткого розрізнення демаскувальних ознак ВНП, фізичних принципів виявлення й розпізнавання, а також платформ, що використовуються для направлення устаткування до місця пошуку.

Аналіз показує, що наявні методи виявлення й розпізнавання, залежно від характеристик об'єктів пошуку та навколишніх умов, мають обмеження в імовірності виявлення й не забезпечують необхідного рівня продуктивності пошуку [6].

Наразі актуальними напрямками розробок є такі, що спрямовані на розроблення методології, моделей та інформаційних технологій створення та використання багатоцільових безпілотних інтелектуальних систем (ББІС) пошуку та знешкодження ВНП.

Для проведення аналізу методів виявлення ВНП визначимо такі елементи системи: ВНП, перешкоди (покривне та навколишнє середовище); інформаційно-вимірювальні засоби (сенсори), які використовують методи виявлення; платформи, що здійснюють направлення інформаційно-вимірювальних засобів (ББІС), та елементи інформаційних технологій (ІТ).

З огляду на те, що методи виявлення визначаються залежно від об'єктів пошуку та їхніх характеристик, почнемо з розгляду саме об'єктів пошуку (ВНП) та їхніх демаскувальних ознак. На сьогодні розроблено, виготовляється та застосовується понад 700 видів ВНП [11]. Доставка може здійснюватися різними способами: вручну, літальними апаратами й реактивними снарядами. Демаскувальні ознаки ВНП обумовлені низкою факторів, основні з яких мають місце практично завжди:

- наявність вибухової речовини (ВР);
- наявність локально розташованої маси металу чи іншого матеріалу;
- характерна форма;
- неоднорідності покривного середовища (порушення поверхні ґрунту, кольору рослинності, снігового покриву тощо).

Додатковими демаскувальними факторами є:

- дротові лінії управління;
- годинникові механізми або електронні таймери;
- сейсмічні, магнітні або оптичні датчики цілі;
- антени з радіоприймачем.

Отже, ВНП може виявлятися переважно завдяки трьом факторам:

- наявності хімічної речовини;
- характерної конструкції корпусу;
- порушення ґрунту.

Демаскувальні ознаки та перешкоди визначають методи виявлення, розпізнавання та набір інформаційно-вимірювальних засобів.

Для пошуку нових методів виявлення необхідно проаналізувати наявні методи з урахуванням фізичних властивостей демаскувальних ознак та інформаційно-вимірювальних засобів (сенсорів). Тому наведемо класифікацію відомих методів за фізичними принципами, що використовуються для виявлення та розпізнавання ВНП.

Авторами роботи [6] запропоновано підхід до класифікації, який відрізняється тим, що методи виявлення розглядаються за фізичними

принципами взаємодії з демаскувальними ознаками та окремо від інформаційно-вимірювальних засобів і платформ, на яких ці засоби розташовані. Класифікація з урахуванням цих підходів наведена в таблиці 1.1. Розглядати основні методи необхідно разом із параметрами, що впливають на ймовірність виявлення та продуктивність.

Таблиця 1.1 – Класифікація методів виявлення за фізичними принципами

№	Метод	Характеристика
1	Механічний	Контактний
		Механізований
2	Електромагнітний	Радіохвильовий
		Оптичний
		Рентгенівський
		Гамма-випромінювання
3	Хімічний	Газоаналітичний
		Біофізичний
4	Магнітний	Магнітометричний
5	Акустичний	Сейсмоакустичний

До механічних методів виявлення та знешкодження ВВП належать ручні, коли пошук і розмінування виконуються безпосередньо людиною, і механізовані, що виконуються спеціальними броньованими машинами.

Сучасні машини розмінування є більш безпечними та ефективними в розмінуванні ВВП із вмістом вибухівки до 15 кг (наприклад, міни, саморобні вибухові пристрої та касетні боєприпаси). Принцип дії цього методу ґрунтується на механічному пошуку та знешкодженні ВВП. Робочим елементом машин для розмінування є приводи з цівками, фрезами, культиваторами та спеціальними захватами [6].

Для підвищення якості знешкодження застосовуються комбіновані системи, наприклад, культиватора та ціпків. Такі платформи багатофункціональні, на них можна встановлювати різні інструменти, системи пошуку, навігації, дистанційного керування тощо. Основні технічні характеристики розглянемо на прикладі платформи MineWolf MW370 компанії Pearson Engineering: вага 23 т, ширина очищення 2,75 м, глибина очищення до 350 мм, швидкість очищення до 2,3 км/год, продуктивність розмінування до 3000 м²/день, витрати палива 40-50 л/г і відстань дистанційного керування до 1000 м [6].

Отже, механічний метод виявлення та розмінування є простим, але забезпечує високу ймовірність виявлення та знешкодження ВНП, а потужний броньований захист і системи дистанційного керування зменшують ризик травмування технічного персоналу.

Недоліки:

- незначна продуктивність та обмеженість використання залежно від рельєфу (неможливість працювати на мокрому та кам'янистому ґрунті, на уклоні понад 35°);
- високі вартість обладнання та витрати на виконання робіт;
- певні пошкодження екології.

Електромагнітні методи – це загальна назва групи методів, що працюють у різних частотних діапазонах і широко застосовуються для виявлення, побудови зображень та визначення властивостей об'єктів, що розташовані, зокрема, в оптично непрозорих середовищах, таких як ґрунт, бетон, цегляна кладка, асфальт, камінь, дерево та лід. Виявлення ВНП за допомогою електромагнітних методів ґрунтується на відмінності електромагнітних властивостей об'єкта та перешкод.

Умовно електромагнітне випромінювання, залежно від використовуваних частот, поділяється на: радіохвильове, оптичне, іонізуюче (рентгенівське та гамма-) випромінювання.

Системи, створені на базі цих методів, відрізняються робочою частотою, смугою електромагнітного спектра, типом сигналів, що передаються, інтерпретацією відбитих сигналів, типом передавача та приймача, а також алгоритмами оброблення.

Радіохвильовий метод – це найбільш поширений метод виявлення. На базі цього методу побудовані металодетектори (Metal Detector, MD), георадари (Ground Penetrating Radar, GPR), мікрохвильові радары (MWR), радары міліметрового діапазону (MMWR), радары електроімпедансної томографії (EIT).

Метод електромагнітної індукції (EMI) використовується в металодетекторах. Переваги цього методу – здатність виявляти металеві предмети розміром меншим за 1 см на глибині 50 см [12], незалежність від погодних умов і вологості ґрунту, низька вартість.

Недоліки методу.

- нездатність виявляти ВНП із незначним вмістом металу (наприклад, у пластиковому корпусі);
- неможливість розрізнити ВНП та металеві уламки, що спричиняє високий відсоток помилкових тривог;
- мала дистанція пошуку.

Георадари, радіолокаторы підповерхневого зондування або підповерхневі радіолокаторы – це загальна назва радіолокаційних пристроїв, що реалізують технології використання електромагнітних хвиль для побудови зображень і визначення властивостей об'єктів, що розташовані в оптично непрозорих середовищах, таких як, наприклад, ґрунт, бетон, цегла, асфальт, камінь, дерево та лід. Зазвичай, радіолокатор такого типу з дальністю дії 1 м працює в діапазоні частот від 300 МГц до 3300 МГц [6].

Для підвищення ймовірності виявлення та мінімізації хибних спрацьовувань застосовується поєднання методів: георадара та високочутливого металодетектора. Ці технології успішно використовуються для створення ручних мобільних приладів.

Розглянуті два методи реалізовані в міношукачі AN/PSS-14, спеціально розробленому для армії США. Додатково було застосовано алгоритми оброблення інформації, що забезпечило високі технічні характеристики за умови малої ваги: імовірність виявлення до 98,7 %, глибина виявлення ВНП до 300 мм, швидкість пошуку 3,2 м/хв, відстань сканування до 10 см, дистанційне керування не передбачено.

Мікрохвильові радары основані на використанні коротких радіоімпульсів та вимірюванні часу повернення відбитків. Відображення виникають на межах матеріалів із різною діелектричною проникністю. Підвищення частоти передачі забезпечує підвищення роздільної здатності, але водночас зростають і втрати в перешкодах.

Оптичний. Випромінювання в оптичному діапазоні (довжина хвилі 380 - 780 нм, частота $7,89 \times 10^{14}$ - $3,84 \times 10^{14}$ Гц) умовно поділене на ультрафіолетове, видиме та інфрачервоне. Методи, що застосовують фізичні властивості цього випромінювання, успішно використовуються для виявлення та розпізнавання ВНП.

Ультрафіолетове випромінювання охоплює діапазон довжин хвиль 100-400 нм. У цьому діапазоні прямих демаскувальних ознак ВНП не виявлено, але в процесі застосування певного зовнішнього впливу, можуть з'являтися додаткові демаскувальні ознаки. Наприклад, у разі розпилення над забрудненою територією спеціального штаму бактерій, які проростають за декілька годин і флуоресціюють під ультрафіолетовим випромінюванням за наявності в ґрунті вибухових речовин [6].

Видиме випромінювання, що використовується для виявлення ВНП, передбачає захоплення світла у видимому діапазоні хвиль за допомогою оптичної системи для формування зображень. Використання сучасних широкоформатних багатоспектральних фотокамер дає змогу обстежувати значні території за короткий термін. Швидкість обстеження визначається швидкістю платформи, на якій розташовані оптичні сенсори. У разі

використання літальних апаратів швидкість обстеження може перевищувати 100 км/год.

ВМС США продемонстрували прототип єдиної системи багатоцільового виявлення мін із повітря (SMAMD), розроблений компанією BAE Systems. У системі SMAMD використовується набір бортових оптичних датчиків, розміщених на борту безпілотного літального апарата (БПЛА) MQ 8C Fire Scout.

Обмеженням цього методу є те, що виявляти можна тільки ВНП, які розташовані на поверхні ґрунту. Також на якість виявлення впливають погодні умови та наявність маскувальних факторів (камуфляж, рослинність тощо).

Використання інфрачервоного випромінювання для виявлення ВНП ґрунтує на наявності різниці теплових характеристик між похованими об'єктами та навколишнім ґрунтом, що призводить до різниці температур між похованим об'єктом і ґрунтом. Цей температурний контраст вимірюється за допомогою термографічної камери, яка виявляє випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра.

Перевагами методу є те, що він пасивний, отже, не впливає на системи керування ВНП, які можуть спричинити вибух; також цей метод дозволяє підвищувати швидкість / продуктивність обстеження за допомогою застосування БПЛА як платформи.

Недоліки: на якість виявлення впливають параметри навколишнього середовища (сонячне світло, дощ та ін.) та перешкоди (покривний шар ґрунту, рослинність тощо). Це значно звужує можливості застосування.

Рентгенівське випромінювання. Фотони характеристичного (тобто що випускається під час переходів в електронних оболонках атомів) рентгенівського випромінювання, що відповідає випромінюванню з частотою від 3×10^{16} до 3×10^{19} Гц і довжиною хвилі 0,005-100 нм.

Цей метод ґрунтується на тому, що спостережувані частоти залежать від взаємодії між електричним квадрупольним моментом ядра та градієнтом електричного поля, що створюється в ядерному центрі зовнішніми зарядами.

Усі звичайні вибухові речовини містять квадрупольне ядро, яке генерує три набори резонансних частот, забезпечуючи однозначний метод виявлення та ідентифікації вибухової речовини. Він є похідним від ядерного магнітного резонансу та використовується без зовнішнього магнітного поля. Недоліком методу є виявлення тільки однієї групи, яка має бути відома заздалегідь.

Гамма-випромінювання. Ядерно-фізичні методи розрізняють за типом і енергією, що використовує джерело нейтронів, а також видом і енергією вторинного гамма-випромінювання, яке виникає під час взаємодії нейтрона з об'єктом пошуку – азотом (вуглецем чи киснем), що міститься у вибуховій речовині.

Недоліком цих приладів, що впливає із фізичного принципу їхньої роботи, можна вважати те, що вони не мають вибірковості щодо вибухових або наркотичних речовин.

Хімічний метод. Широке застосування набув хімічний аналіз повітря на наявність випарів у місцях розташування ВВП. Він ґрунтується на виявленні та кількісній оцінці специфічних хімічних вибухових речовин та їхніх компонентів, які містяться у ВВП і дифундують у навколишнє середовище. Цей метод дає змогу виявляти сліди вибухових речовин у ґрунті або в повітрі в місцях встановлення ВВП. Дифузія речовин на поверхню відбувається в малих кількостях і залежить від конструкції ВВП, що вкривають середовище та погодні умови.

Ураховуючи малі концентрації речовин, неоднорідність поширення, різноманітні маскувальні фактори, необхідно застосовувати дуже чутливі датчики. Вважаємо, доцільною є думка, що цей метод містить газоаналітичні та біофізичні методи.

Газоаналітичні прилади є досить численним класом і забезпечують високу чутливість. Газоаналітичні методи здебільшого стосуються випарів тротилу, гексогену та ПЕТ, тому їх можна розглядати як підземні джерела пари. Ця пара може транспортуватися за допомогою таких явищ, як молекулярна дифузія та процеси турбулентності. Ідея цього методу полягає у

створенні газових датчиків, здатних виявляти малі концентрації хімічних речовин ВНП. Існують певні обмеження в цій галузі досліджень, що пояснюється неможливістю встановити мінімальний рівень виявлення через мінливу природу парів.

Біофізичні методи. Необхідно наголосити на успішному використанні тварин для пошуку ВНП за хімічними ознаками. Для виявлення ВНП ще за часів Другої світової війни застосовувалися собаки (Mine detection dog, MDD). Окрім собак, у різних країнах ведуться дослідження з використання інших тварин для пошуку ВНП, які більш пристосовані для певних територій і дозволяють зменшити витрати на виховання та підготовку.

За програмою HeroRATs ведуться роботи з використання африканських гігантських мішкоподібних щурів (Mine detection rat, MDR), які допомагають знаходити наземні міни. Навчені щури можуть обстежити територію розміром із тенісний корт (23,77x10,97 м) за 30 хв. Також вивчаються особливості використання для пошуку ВНП інших тварин та комах. Необхідно зазначити, що тварини мають і кращі газоаналітичні здібності, ніж електронні газоаналізатори. Це дає змогу виявляти вибухові речовини в нижчих концентраціях та з більшою ймовірністю.

Штучне виявлення випарів конкурує з тваринами або використовується разом із ними. Однак тварини більш чутливі та можуть виявляти багато різних запахів одночасно, що досить важко відтворити штучно.

Окремо необхідно наголосити на перспективах застосування тварин у створенні інтелектуальних автоматизованих систем виявлення і знешкодження ВНП. Концепція основана на розміщенні на тваринах мобільної інтелектуальної системи, яка забезпечує навігацію, дистанційне наведення та спостереження. Такі системи підвищують імовірності виявлення ВНП.

Недоліками газоаналітичних методів є:

– необхідність переладнання / перенавчання в разі появи нових хімічних компонентів у ВНП;

- велика залежність якості вимірювань від навколишнього середовища та погодних умов;

- робота в небезпечній зоні (безпосередньо біля ВВП).

Магнітометричний метод. Використання магнітометрів як металошукачів ґрунтується на явищі локального спотворення природного магнітного поля Землі феромагнітними матеріалами, наприклад залізом. Порівняно з розглянутими вище принципами, магнітометри мають набагато більшу дальність виявлення залізних предметів. Залізні предмети створюють аномалії, які фіксуються цими приладами.

Цей принцип розвивається з метою розроблення якісного відеоаналізу, схованого під поверхнею об'єкта, силові магнітні лінії від якого знімають магнітометром.

Основні переваги цього методу:

- можливість виявлення у природних покривних середовищах;
- більша глибина й висока швидкість пошуку.

Недоліки методу:

- не детектує діелектричні матеріали;
- низька вибірковість та завадостійкість.

Акустичний метод. Акустичні хвилі можуть бути ефективним інструментом для виявлення та ідентифікації наземних мін. Ультразвукові методи та методи перетворення акустичних даних на сейсмічні (A/S) є поширеними методами акустичного виявлення. Недоліками цього методу є низька роздільна здатність та залежність від щільності ґрунту. Тому цей метод має малу ефективність для пошуку ВВП, особливо за наявності декількох перешкод із різними властивостями, наприклад, повітря-ґрунт.

За результатами аналізу методів виявлення та розпізнавання, визначені основні характеристики та виконане порівняння. Результати порівняння методів виявлення за основними характеристиками наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння методів виявлення ВНП

Характеристика	Контактний	Механізований	Радіохвильовий	Оптичний	Рентгівське випромінювання	Гамма-випромінювання	Газоаналітичний	Біофізичний	Магнітометричний	Сейсмоакустичні
Тип взаємодії з ВНП (А – активний, П – пасивний)	А	А	А	П	А	А	П	П	П	А
Тип платформи (Ст – стаціонарний, Моб – мобільний)	Ст	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Ст
Потенційна продуктивність	Low	Med	High	High	Med	Med	Med	Med	High	Low
Підтримка інформаційних технологій										
Оброблення даних та їхнє зберігання	–	–	+	+	+	+	–	–	+	+
Доступ до мережі та покриття	–	–	+	+	+	+	–	–	+	–
Передача даних у режимі реального часу	–	–	+	+	+	+	–	–	+	–
Параметри якості										
Безпека під час виконання робіт	Low	Med	High	Low	High	High	High	High	Low	Med
Імовірність виявлення	High	High	Med	Low	High	High	High	High	Med	Med

Продовження таблиці 2.2

Характеристика	Контактний	Механізований	Радіохвильовий	Оптичний	Рентгеновське випромінювання	Гамма-випромінювання	Газоаналітичний	Біофізичний	Магнітометричний	Сейсмоакустичні
Роздільна здатність (вибірковість)	High	Low	Med	Med	High	High	High	Low	Low	Low
Надійність	High	High	High	High	High	High	Low	Low	Med	Med
Економічні показники										
Вартість	Low	Med	Med	Med	High	High	Med	Low	Med	Med

1.2 Аналіз існуючих рішень планування траєкторії руху роботу для пошуку ВВП

В роботі [5] запропоновано підхід для планування траєкторії руху мобільного роботу під час пошуку вибухонебезпечних предметів.

Архітектура системи виявлення мін наведена на рисунку 1.1.

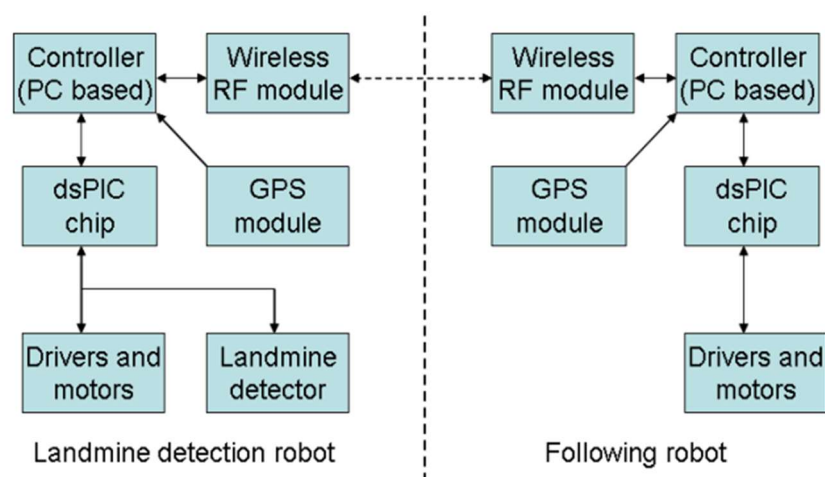


Рисунок 1.1 – Архітектура системи виявлення мін

У системі є два мобільних роботи. Один – робот-пошукач мін, а інший – робот для розмінування або знешкодження ВВП. Контролером робота-

детектора мін є персональний комп'ютер, який керує двома серводвигунами постійного струму через мікросхему dsPIC 30F4011.

Мобільний робот може визначити розташування мін у небезпечному регіоні за допомогою міношукача та GPS-модуля і передає розташування мін наступному мобільному роботу за допомогою бездротового радіочастотного модуля. Наступний робот програмує траєкторію, щоб уникнути мін і підвищити безпеку пересування в зоні мін. Система драйверів наступного робота подібна до робота-детектора мін.

Платформа робота-детектора мін показана на рисунку 1.2.

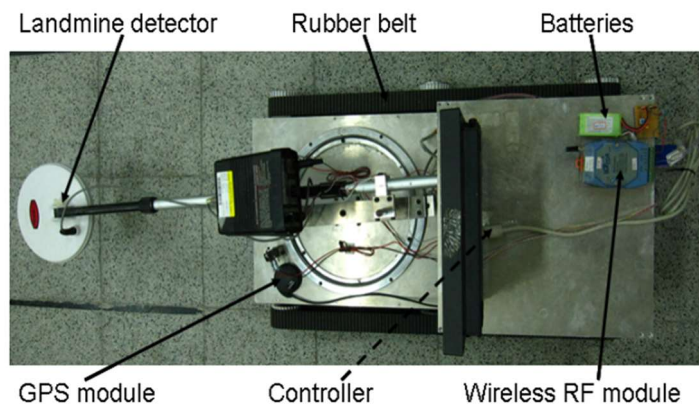


Рисунок 1.2 – Платформа робота-детектора мін

Мобільний робот має форму прямокутника, а його довжина, ширина і вага становлять 80 см, 50 см і 10 кг. Гумовий ремінь використовувався як гусениця для переміщення по землі. Мобільний робот приводить в рух гумовий ремінь за допомогою сервомотора постійного струму.

Міношукач розташований на передній частині мобільного робота і приводиться в рух кроковим двигуном з редуктором. Діапазон кута обертання становить близько 50 градусів, і обертається вперед і назад на фіксованому суглобі. Модуль GPS знаходиться збоку від міношукача, щоб фіксувати місце розташування міни.

Платформа наступного робота показана на рисунку 1.3.

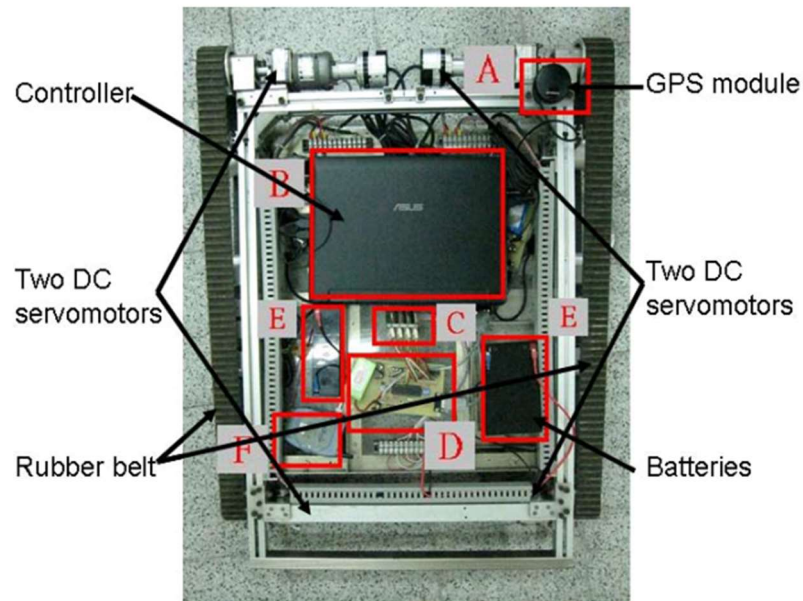


Рисунок 1.3 – Розташування керуючих елементів в корпусі робота

Мобільний робот має форму прямокутника. Його довжина, ширина і вага становлять 90 см, 71 см і 12 кг відповідно. Мобільний робот приводиться в рух чотирма серводвигунами постійного струму. Кожен гумовий ремінь приводиться в рух двома серводвигунами постійного струму, щоб збільшити вантажопідйомність. Контролер мобільного робота розташований на передній частині мобільного робота. Модуль GPS знаходиться на передній частині мобільного робота для запису координат наступного мобільного робота.

GPS – це єдина глобальна навігаційна супутникова система (GNSS). GPS використовує групу із 24 – 32 супутників на середній навколосемній орбіті (MEO), які передають точні мікрохвильові сигнали для визначення поточного місцезнаходження, часу та швидкості. Ці сигнали поширюються і приймач використовує їх час прибуття для вимірювання відстані та положення. Для визначення координати робота ми використовуємо GPS виробництва компанії GARMIN. GPS приймає значення довготи та широти із супутника [13]. Кут σ і відстань d обчислюються за допомогою формули:

$$\sigma = \arccos(\sin \varphi_s \sin \varphi_f + \cos \varphi_s \cos \varphi_f \cos \Delta\lambda), \quad (1.1)$$

$$d = r\sigma, \quad (1.2)$$

де φ_s – це початкове значення широти;
 φ_f – кінцеве значення широти;
 $\Delta\lambda$ – різниця довгот;
 d – відстань від місця старту до місця призначення;
 r – радіус Землі.

Мобільний робот для виявлення мін виявляє міни за допомогою міношукача, що рухається у вільному просторі, і передає розташування мін і поточне положення робота-виявлення мін наступному мобільному роботу. Наступний робот відстежує робота-детектора мін відповідно до поточної координати.

Результат моделювання показано на рисунку 1.4.

Мобільний робот рухається вперед від початкової точки до цільової точки та виявляє протипіхотні міни. Після виявлення міни він зупиняється і передає координати знайдених мін наступному роботу через бездротовий радіочастотний інтерфейс.

Мобільний робот повертає праворуч, щоб уникнути міни, і перетинає небезпечну зону, показану на рисунку 1.4. Нарешті, робот-детектор мін рухається до цільового місця та передає координати фіксоване положення від шляху руху до наступного робота.

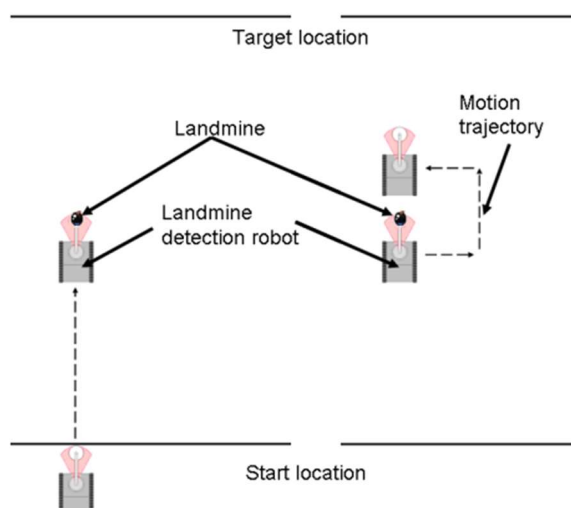


Рисунок 1.4 – Схема переміщення мобільного робота шукача мін

Наступний мобільний робот рухається вперед відповідно до траєкторії, яка побудована з використанням фіксованої координати від робота шукача мін, і отримує інформацію про місце розташування мін від робота-виявлення мін через бездротовий радіочастотний інтерфейс. Мобільний робот рухається попереду міни на 3 м і повертає праворуч, рухаючись вперед на 3 м, щоб перетнути зону міни.

Результат моделювання показано на рисунку 1.5

Потім мобільний робот повертає ліворуч, рухаючись вперед приблизно на 6 м. Мобільний робот повертає ліворуч, рухаючись на 3 м, щоб уникнути міни. Нарешті мобільний робот повертає праворуч і рухається до цільового місця. Результат моделювання показано на рисунку 1.5.

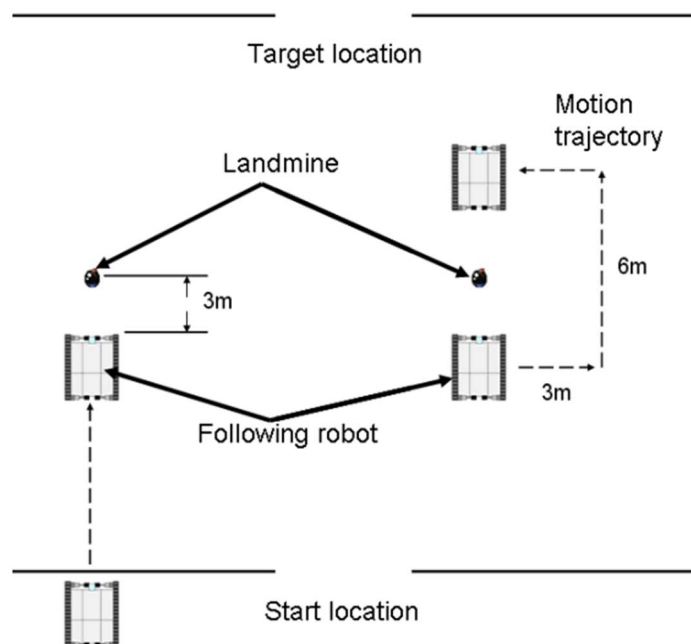


Рисунок 1.5 – Результат моделювання

В роботі [5] показано результат експерименту під час виявлення протипіхотних мін. Зовнішній вигляд роботу показано на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд експериментального роботу

Мобільний робот для виявлення мін рухається вперед від початкової точки. Мобільний робот використовує міношукач для виявлення координат мін на полі та передає координати міни наступному мобільному роботу.

1.3 Постановка задач дослідження

Таким чином, для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести наліз аналогічних рішень та методів пошуку вибухонебезпечних предметів на відкритій місцевості;
- виконати проектування автоматизованої системи управління автономним роботизованим засобом;
- виконати розробку алгоритму планування та корекції траєкторії руху мобільного робота на мінному полі;
- розробити програму для імітації руху мобільного робота на мінному полі для тестування запропонованого алгоритму;
- виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень.

1.4 Висновки до розділу 1

У цьому розділі було проведено детальний аналіз різних методів пошуку вибухонебезпечних предметів. Було виявлено, що кожен метод має свої переваги та недоліки, а також специфічні області застосування. Наприклад, деякі методи ефективні для виявлення вибухівки в металевих предметах, тоді як інші - для виявлення неметалевих предметів.

Також було виявлено, що комбінація різних методів може значно підвищити ефективність пошуку вибухонебезпечних предметів. Однак, необхідно враховувати, що використання декількох методів може збільшити вартість та складність системи безпеки.

Враховуючи вищезазначене, для підвищення ефективності пошуку вибухонебезпечних предметів необхідно розробити комплексний підхід, який би включав в себе найкращі методи та технології, адаптовані до конкретних умов та вимог.

2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ МОБІЛЬНОГО АВТОНОМНОГО РОБОТА ІЗ МЕТАЛОШУКАЧЕМ

2.1 Загальні вимоги щодо вдосконалення методу планування траєкторії руху мобільного робота

Для ефективного пошуку вибухонебезпечних предметів та оптимізації часу на виконання поставленої задачі пропонується наступне вдосконалення існуючих методів обробки забруднених територій:

- перекриття зони пошуку при плануванні траєкторії руху мобільного робота;
- автоматичний розрахунок траєкторії об'їзду знайдених вибухонебезпечних предметів;
- автоматичне повернення на основну траєкторію руху після виконання етапу об'їзду ВВП.

Як біло зазначено раніше, метод пошуку вибухонебезпечних предметів включає етап планування руху автономного мобільного робота на забрудненій ділянці. Для ефективного виявлення вибухонебезпечних предметів необхідно, щоб траєкторія сканування перетиналась при русі вперед та назад (рис. 2.1).

Для визначення траєкторії руху необхідно враховувати кінематичну модель мобільного робота.

2.2 Кінематична модель робота

Кінематична модель робота необхідна як при визначенні поточних координат знайдених ВВП і передаванні їх на сервер для відображення на карті місцевості, так і для виконання задачі симуляції руху мобільного робота за допомогою тестового програмного засобу.

Тестовий програмний засіб в реальному часі відображає не тільки лінійне переміщення, але й повороти пристрою в спеціальних точках траєкторії з встановленою швидкістю і на заданий алгоритмом кут.

На рисунку 2.1 наведено принцип поєднання глобальної та локальної системи відліку для робота [14]. Щоб визначити положення робота на карті місцевості, встановлюється зв'язок між глобальною системою відліку в просторі та локальною системою відліку робота.

Осі X_I і Y_I визначають координати на карті місцевості, як глобальну систему відліку з заданій початкової точці $O: \{X_I, Y_I\}$.

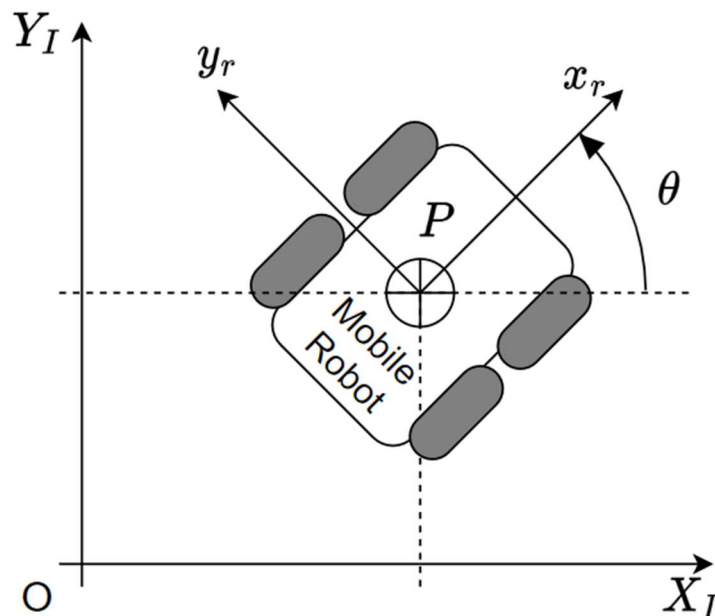


Рисунок 2.1 – Принцип поєднання глобальної та локальної системи відліку для робота

Щоб визначити положення робота, обираємо точку P на шасі робота, що є центром обертю платформи. Точка відліку $P: \{x_r, y_r\}$ визначає дві осі відносно P на шасі робота і, таким чином, є локальною системою відліку робота.

Положення точки P у глобальній системі відліку визначається координатами x і y , а кутова різниця між глобальною та локальною системами відліку задається θ .

Тепер можна описати положення робота на площині, як вектор із цими трьома елементами:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Математична модель робота представлена рівнянням кінематики та динаміки твердого тіла [15]:

$$MR_i = R_i(\theta_i)x_i, \quad (2.2)$$

де θ_i – вектор, що визначає положення i -го робота в нерухомих декартових координатах;

x_i – вектор швидкостей, пов'язаний з координатами мобільного робота;

R_i – матриця, що описує кінематику робота.

Матриця ортогонального оберту R записується у вигляді:

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Матрицю R_i можна використовувати для відображення руху в глобальній системі відліку $\{X_I, Y_I\}$ на рух у термінах локальної системи відліку $\{x_r, y_r\}$.

Вектор швидкостей x_i визначається наступним чином:

$$v_i = M_i^{-1}(F_{ui} + F_{di}), \quad (2.4)$$

де M_i – матриця інерційних параметрів;

F_{ui} – вектор керування;

F_{di} – вектор інших сил і моментів, що впливають на мобільного робота;

$i = \overline{1, N}$;

N – число роботів в на полі при груповому пошуку вибухонебезпечних предметів.

2.3 Метод сканування території при пошуку ВНП

Пропонована схема руху мобільного робота в процесі пошуку ВНП показана на рисунку 2.2.

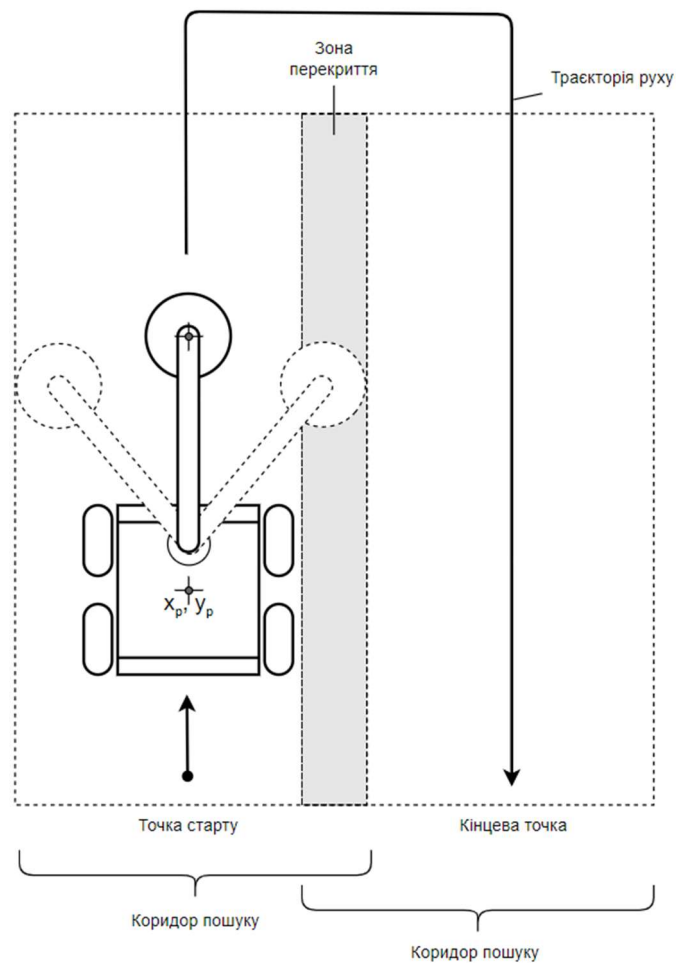


Рисунок 2.2 – Схема руху мобільного робота в процесі пошуку ВНП

Рух мобільного робота відбувається певними коридорами. Кожен коридор має певну ширину, що визначається габаритами мобільного роботу та довжиною штанги, на кінці якої встановлено чутливий елемент – метало детектор.

Для ефективного пошуку ВНП, щоб уникнути невизнаних предметів в ґрунті методом, що пропонується, передбачено наявність зон, що перекриваються.

Мобільний робот починає рух в точці старту, рухається визначеним коридором, і в разі, якщо ВНП не знайдено, розгортається на 90° , переїжджає в зону іншого коридору, знов розгортається на 90° та починає рух новим коридором до кінцевої точки.

На рисунку 2.3 показана схема розташування металодетектора на мобільній платформі та можлива траєкторія руху чутливого елемента – електромагнітної котушки.

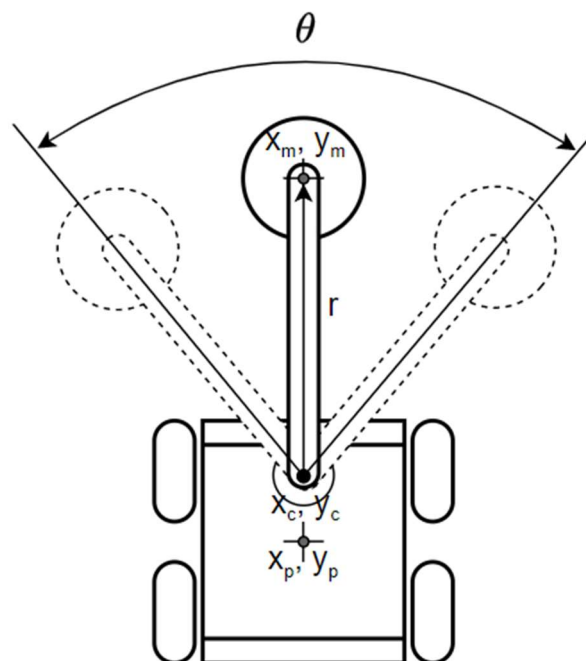


Рисунок 2.3 – Схема розташування металодетектора на мобільній платформі та можлива траєкторія руху чутливого елемента

Для знаходження координат x_m, y_m точки на окружності (траєкторії руху котушки детектору металу) з центром у точці (x_c, y_c) та радіусом r в залежності від кута повороту штанги металошукача θ , необхідно скористатися параметричними рівняннями кола.

Параметричні рівняння кола з центром у точці (x_c, y_c) та радіусом r виглядають наступним чином:

$$x_m = x_c + r \cdot \cos(\theta), \quad (2.5)$$

$$y_m = y_c + r \cdot \sin(\theta), \quad (2.6)$$

де: x_c, y_c – координати центра кола;

r – радіус кола, на якому лежить дуга m_l, m_r ;

θ – кут в радіанах.

Ці рівняння додають координати центра (x_c, y_c) до координати точки на окружності з параметричних рівнянь. Таким чином, можна знайти координати будь-якої точки на колі в залежності від заданого кута.

Якщо вхідний кут задано в градусах, його можна конвертувати в радіани за допомогою формули:

$$angle_{radian} = \frac{angle_{degrees} \cdot \pi}{180}, \quad (2.7)$$

де $angle_{radian}$ – кут в радіанах;

$angle_{degrees}$ – кут в градусах.

В разі, коли потрібно визначити координати знайденого вибухонебезпечного предмета на плані місцевості, потрібно знати такі параметри:

- координати центру мобільної платформи x_p, y_p ;
- координати центру кріплення штанги металошукача x_c, y_c ;
- координати центру котушки металошукача x_p, y_p ;

- кут оберту мобільної платформи відносно осі y , α ;
- кут оберту штанги металошукача відносно центральної осі мобільної платформи θ ;
- відстань між центром мобільної платформи x_p, y_p та центром кріплення штанги металошукача x_c, y_c, k ;
- довжину штанги металошукача, r .

На рисунку 2.4 показана схема визначення координати знайденого вибухонебезпечного предмета на плані місцевості.

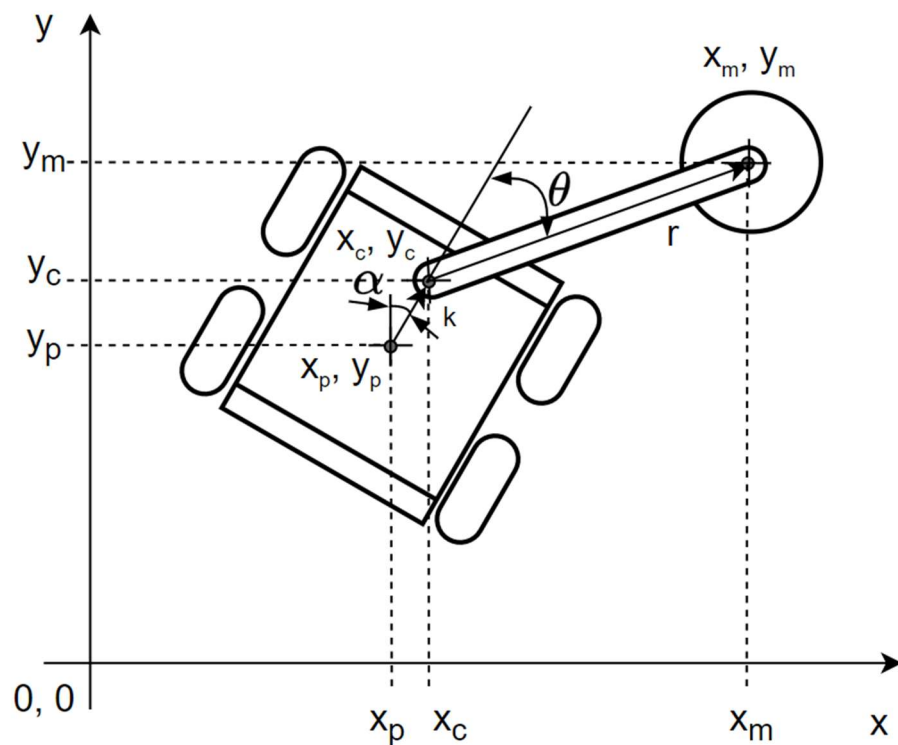


Рисунок 2.4 – Схема визначення координати знайденого вибухонебезпечного предмета на плані місцевості

Знаходження координат x_m, y_m відбувається в наступній послідовності.

На першому кроці знаходяться координати кріплення штанги металошукача після повороту мобільної платформи на кут α .

Координати кріплення штанги металошукача x'_c, y'_c після повороту можна знайти за допомогою наступних формул повороту відносно початку координат:

$$x'_c = x_p + (x_c - x_p) \cdot \cos(\alpha) - (y_c - y_p) \cdot \sin(\alpha), \quad (2.8)$$

$$y'_c = y_p + (x_c - x_p) \cdot \sin(\alpha) - (y_c - y_p) \cdot \cos(\alpha), \quad (2.9)$$

де x_c, y_c – координати кріплення штанги металошукача;
 x_p, y_p – координати центру мобільної платформи;
 α – кут оберту мобільної платформи.

Наступним кроком визначаються координати x_m, y_m розташування котушки металошукача:

$$x_m = x'_c + r \cdot \cos(\theta), \quad (2.10)$$

$$y_m = y'_c + r \cdot \sin(\theta), \quad (2.11)$$

де x'_c, y'_c – координати кріплення штанги металошукача після повороту мобільної платформи на кут α ;

r – довжина штанги металошукача;

θ – кут повороту штанги металошукача відносно центрально осі мобільної платформи.

2.4 Розробка метода об'їзду знайдених ВВП

Метод об'їзду знайдених вибухонебезпечних предметів включає декілька стадій. На першій стадії визначається крайня границя об'єкту зліва або справа відносно центральної вісі мобільного робота.

На рисунку 2.5 показано випадок визначення правої границі об'єкту, що розташовано справа від центральної вісі роботи.

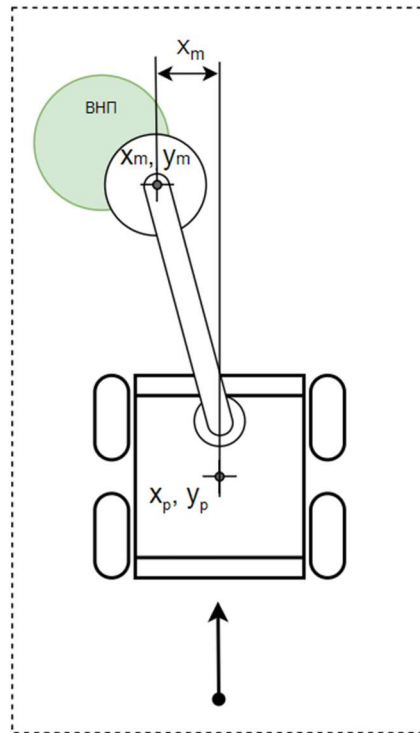


Рисунок 2.5 – Визначення правої границі об'єкту, що розташовано справа від центральної вісі роботи

На даному етапі потрібно в автоматичному режимі розрахувати лінійне зміщення мобільного роботу в правий бік, щоб виконати безпечний об'їзд ВНП.

Одним з варіантів є використання фіксованого коефіцієнту зміщення K . Даний коефіцієнт обирається експериментально. Наприклад, на рисунку 2.6 коефіцієнт зміщення K дорівнює:

$$K = 1.3 \cdot R_m, \quad (2.12)$$

де R_m – радіус магнітної котушки детектору металів.

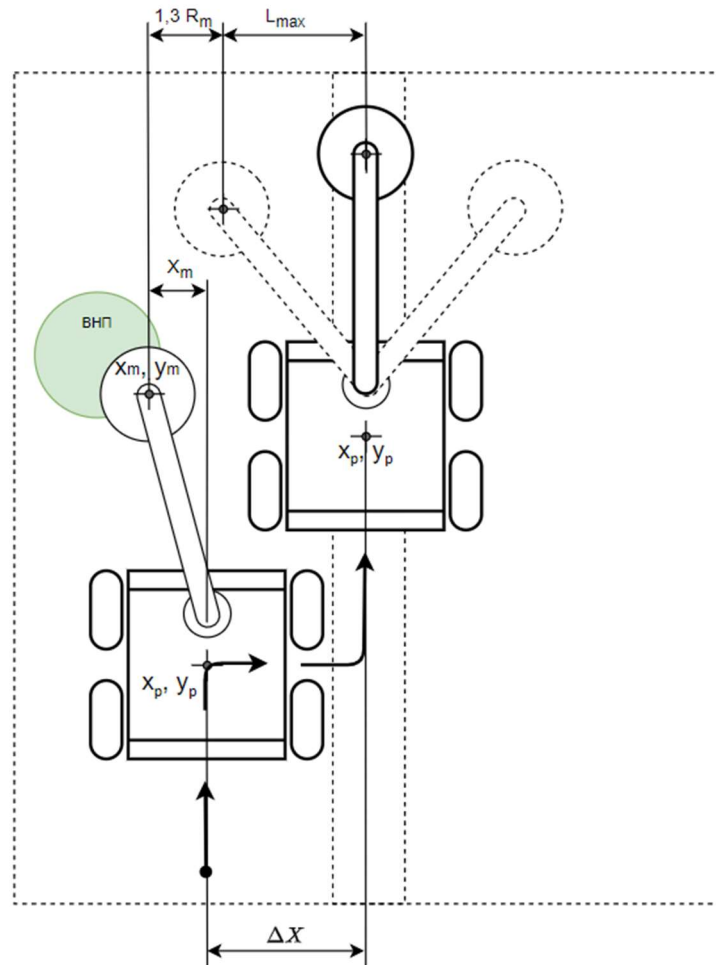


Рисунок 2.6 – Визначення лінійного зміщення ΔX мобільної роботизованої платформи

Таким чином, загальне зміщення мобільного робота ΔX можна розрахувати за формулою:

$$\Delta X = K + L_{max} + X_m, \quad (2.13)$$

де K – коефіцієнт зміщення, $K = 1.3 \cdot R_m$;

L_{max} – максимальна відстань (виліт) штанги з металодетектором в напрямку осі X ;

X_m – відстань знайденого ВНП відносно центральної осі мобільного робота.

Параметр X_m може приймати негативне значення, якщо ВНП знаходиться зліва від центральної осі, та позитивне, якщо справа.

Метод, що пропонується, гарантовано забезпечує безпечний проїзд мобільного робота повз ВНП до заданої точки попереду мобільної платформи до розвороту. Але даний метод не контролює форму та розташування ВНП у ґрунті, що ускладнює подальший розрахунок траєкторії руху, якщо об'єкт виявиться неправильної форми.

На рисунку 2.7 показана версія вдосконаленого методу обходу перешкоди у вигляді ВНП. Даний метод дозволяє контролювати наявність, форму та орієнтацію предмету впродовж всього обхідного маневру.

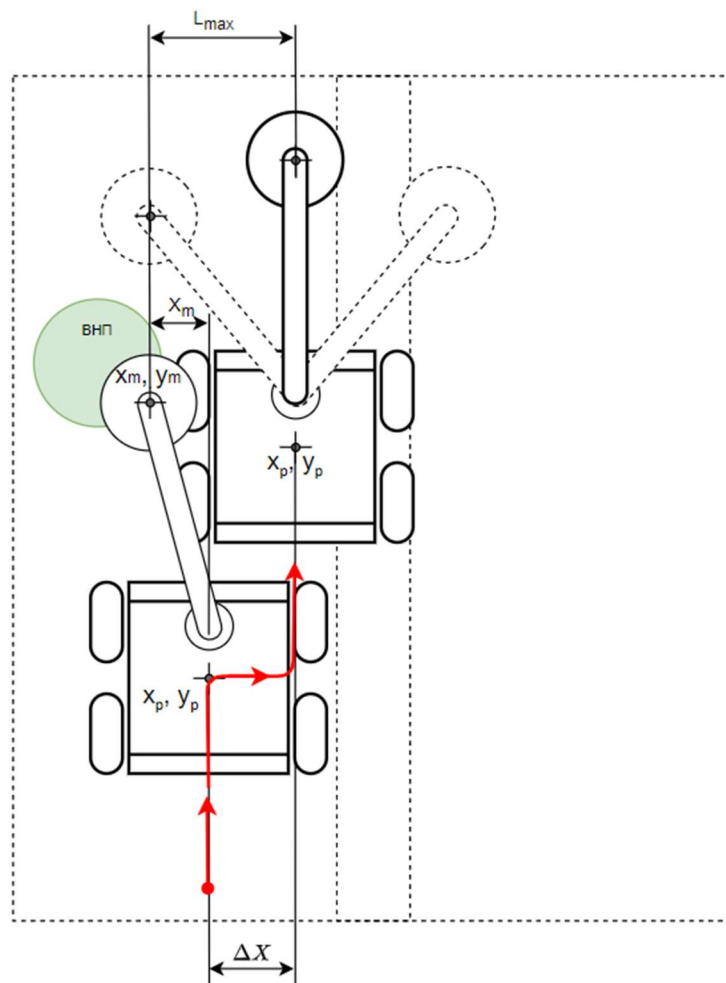


Рисунок 2.7 – Вдосконаленого метод обходу перешкоди у вигляді ВНП

Як можна бачити з наведеного рисунку мобільний робот за допомогою металошукача постійно контролює наявність ВНП при його об'їзді. Для цього застосовується наступна послідовність дій.

При визначені ВНП розраховується його відстань та положення відносно центральної осі роботи.

Зміщення роботу ΔX розраховується по формулі:

$$\Delta X = L_{max} + X_m, \quad (2.14)$$

де L_{max} – максимальна відстань (виліт) штанги з металодетектором в напрямку осі X;

X_m – відстань знайденого ВНП відносно центральної осі мобільного роботу.

Як і в попередньому методі, параметр X_m може приймати негативне значення, якщо ВНП знаходиться зліва від центральної осі, та позитивне, якщо справа.

пропонований метод передбачає рух роботу вперед доки не буде виявлено відсутність ВНП в полі зору металодетектору.

З цього моменту починається наступний етап – визначення максимального зміщення роботу за напрямком осі Y до точки розвороту та повернення на основну траєкторії руху.

Принцип розрахунку дистанції зміщення мобільного роботу відносно осі Y показано на рисунку 2.8.

Зміщення ΔY розраховується за формулою:

$$\Delta Y = y_m + y_c + \Delta Y_m + L_{max}, \quad (2.15)$$

де y_m – координата у останнього положення магнітної котушки при якому ще відбувалося детектування ВНП;

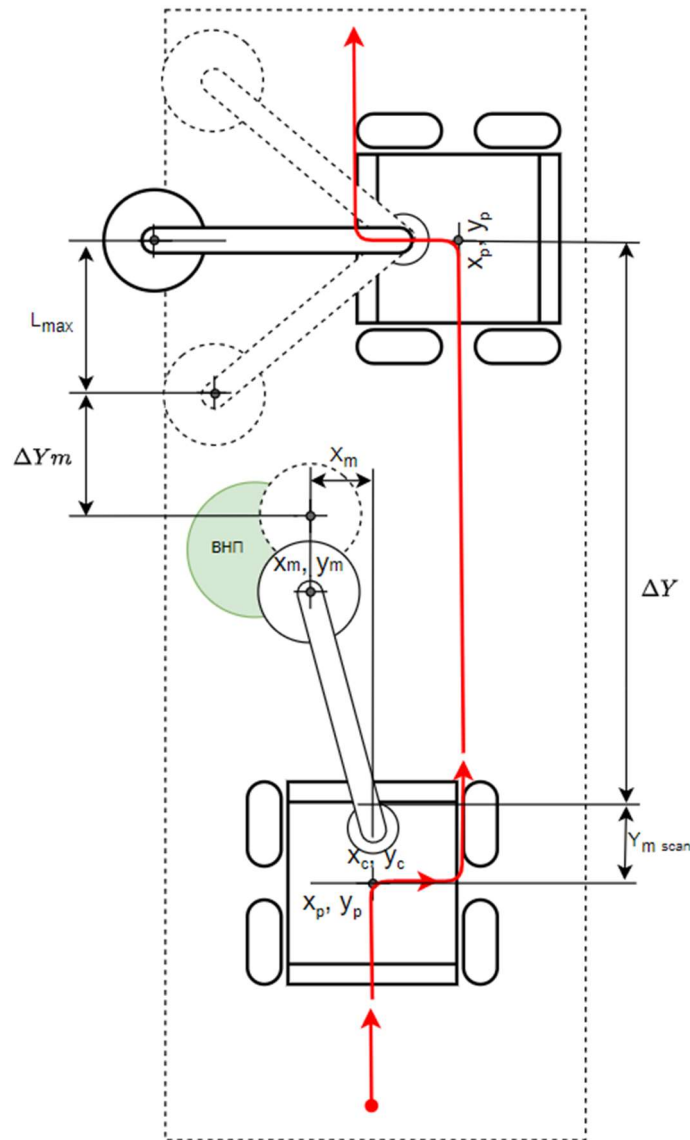


Рисунок 2.8 – Принцип розрахунку дистанції зміщення мобільного роботу відносно осі Y

Y_c – координата у центру кріплення штанги металодетектора на мобільному роботі;

ΔY_m – гарантована безпечна відстань від ВНП;

L_{max} – максимальна відстань (виліт) штанги з металодетектором в напрямку осі Y.

Після обчислення дистанції руху мобільного роботу до точки розвороту та повернення на задану траєкторію, пристрій починає переміщення з одночасним пошуком ВНП за допомогою металошукача.

У випадку, якщо при виконанні задачі об'їзду перешкоди виявиться новий небезпечний об'єкт, процедура розрахунку точок обходу виконується аналогічним чином.

2.5 Висновки до розділу 2

У цьому розділі було розглянуто загальні вимоги до методів планування траєкторії руху мобільного роботу. Важливість цієї проблеми обумовлена необхідністю забезпечення ефективного, безпечного та надійного руху роботів у різних умовах.

Було визначено ключові аспекти, які необхідно враховувати при вдосконаленні методів планування траєкторії, включаючи точність, швидкість, гнучкість, адаптивність до змін умов та здатність до самонавчання.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МОБІЛЬНОГО РОБОТУ

3.1 Вибір засобів програмування

В якості мови програмування для виконання експериментальних досліджень обрано C#.

C# – це об'єктно-орієнтована мова програмування, розроблена компанією Microsoft у 2002 році. Вона є частиною платформи .NET Framework і широко використовується для розробки веб-сайтів, додатків для Windows, мобільних ігор та інших програм.

Однією з основних особливостей C# є її строга статична типізація. Це означає, що типи даних усіх змінних і операторів повинні бути визначені на етапі компіляції. Така система типізації допомагає запобігти багам і помилкам у коді.

C# також підтримує поліморфізм, що дозволяє використовувати один і той самий код для роботи з різними типами даних. Це робить код більш лаконічним і зручним у використанні.

Мова має велику бібліотеку класів, яка включає в себе широкий спектр функцій і компонентів, що використовуються для створення додатків. Ця бібліотека робить процес розробки більш швидким і простим.

C# є відносно легкою мовою для вивчення. Її синтаксис близький до синтаксису інших об'єктно-орієнтованих мов, таких як Java і C++.

Ось деякі інші особливості C#:

- підтримка багатопотоковості та асинхронного програмування;
- підтримка мови розмітки HTML;
- підтримка мови програмування SQL;
- підтримка хмарних обчислень.

C# – це потужна і гнучка мова програмування, яка може бути використана для створення широкого спектра додатків. Вона є популярним вибором для розробників, які працюють на платформі Windows.

3.2 Програмна реалізація запропонованого методу планування траєкторії руху мобільного автономного робота із металошукачем

На рисунку 3.1 показано алгоритм роботи програми для дослідження методу планування траєкторії руху мобільного робота, що виявляє вибухонебезпечні предмети в автоматичному режимі.

На початку роботи задається ділянка на якій відбувається пошук ВНП. Ділянка розбивається на сектори (коридори) в межах яких рухається мобільний робот. У випадку, якщо на шляху мобільного робота виявляється ВНП, пристрій повинен в автоматичному режимі виконати дві основні дії:

- відмітити на карті координати знайденого ВНП;
- побудувати траєкторії безпечного об'їзду ВНП за розробленим вище методом.

В процесі дослідження виділеного сектору робот виконує рух вперед в заданому напрямку та в межах описаної в програмі дистанції. Максимальна дистанція руху впродовж одного циклу сканування – 0,5 радіусу скануючої магнітної котушки.

Мобільний робот виконує дискретні рухи вперед на задану відстань та зупиняється на час, поки металошукач виконає повний цикл сканування поверхні в обидва боки відносно центральної вісі пристрою.

Якщо впродовж виконання процесу сканування не було виявлено ВНП, робот виконує черговий дискретний рух вперед.

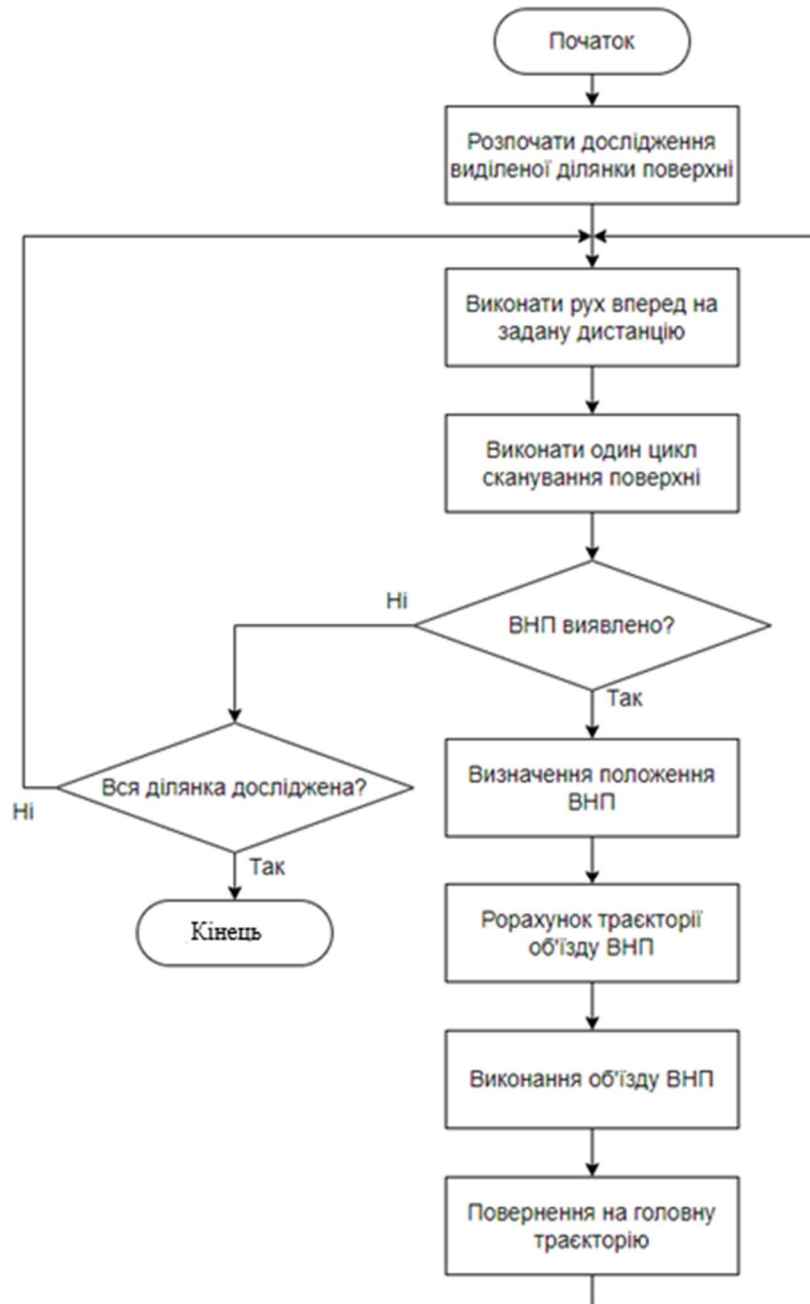


Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи програми для дослідження методу планування траєкторії руху мобільного робота, що виявляє вибухонебезпечні предмети в автоматичному режимі

Після кожного руху вперед перевіряється, чи не закінчено сканування виділеного сектору. Якщо сканування сектору завершено, робот переходить на наступну ділянку і пошук ВНП продовжується.

Якщо ВНП знайдено, фіксується координати його місця знаходження та планується траєкторія безпечного об'їзду.

Траєкторія об'їзду потребує розрахунку параметрів:

- dX – відстань переміщення за координатою X ;
- dY – відстань переміщення координатою Y вздовж ВНП.

Після виконання об'їзду мобільний робот повертається на задану головну траєкторію руху.

На рисунку 3.2 показана структурна схема програми.

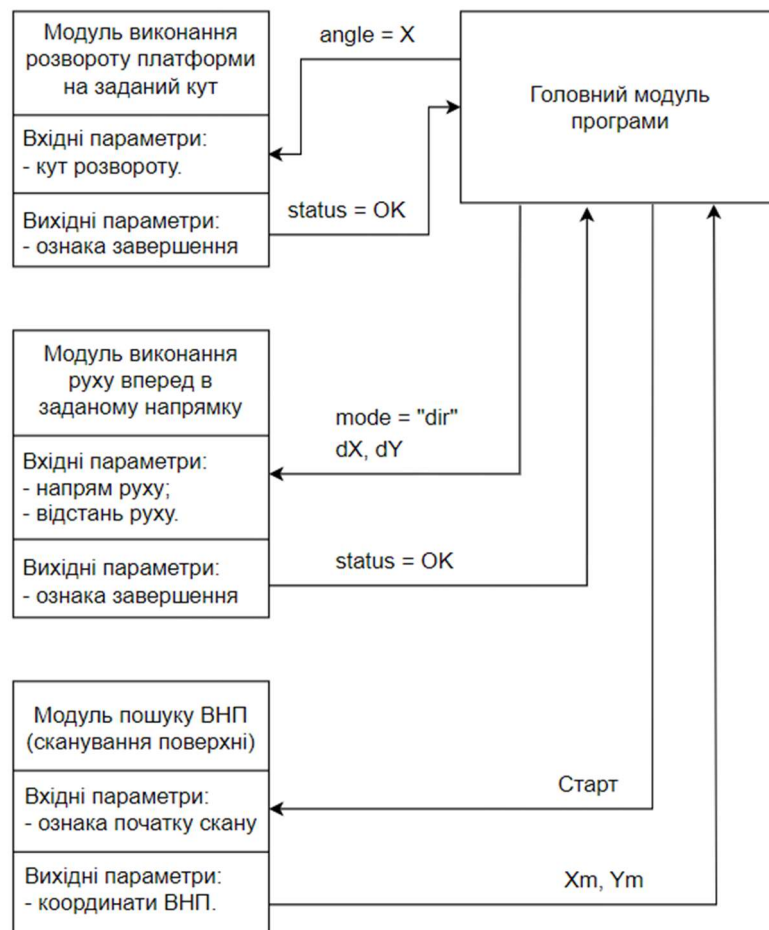


Рисунок 3.2 – Структурна схема програми

Програма складається з чотирьох основних модулів:

- головний модуль програми;
- модуль виконання розвороту платформи на заданий кут;
- модуль виконання руху вперед в заданому напрямку;

– модуль пошуку ВВП (сканування поверхні).

Головний модуль розподіляє задачі між допоміжними та контролює загальну роботу програмного емулятора мобільного робота. За наданими координатами знайденого ВВП на карті місцевості робиться відмітка про наявність небезпечного предмету.

Фрагмент програмного коду модуля виконання розвороту мобільного робота показано на рисунку 3.3.

```
private void timer_rotate_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    if (AngleRotate != CurrAngle)
    {
        if (AngleRotate > CurrAngle)
        {
            CurrAngle++;
            pictureBox1.Image = RotateImage(Properties.Resources.robot3, CurrAngle);
        }
        else
        {
            CurrAngle--;
            pictureBox1.Image = RotateImage(Properties.Resources.robot3, CurrAngle);
        }
    }
    else
    {
        timer_rotate.Enabled = false;
        CurrAngleVodilo = CurrAngle;
        pictureBox1.Image = RotateImage(Properties.Resources.robot1, CurrAngle);
        pictureBox2.Image = RotateImage(Properties.Resources.vodilo2, CurrAngleVodilo);
        pictureBox2.Visible = true;
        pictureBox2.Left = 44;
        pictureBox2.Top = 0;
        findMine = false;

        run_up.Enabled = true;
    }
}
```

Рисунок 3.3 – Фрагмент програмного коду модуля виконання розвороту мобільного робота

Цей фрагмент коду використовує таймер (timer_rotate), який викликається періодично з частотою 10 мс. Принцип роботи цього коду полягає в плавному повороті зображення робота (pictureBox1) та штанги металопукача (pictureBox2) на заданий кут AngleRotate.

На початку роботи перевіряється, чи потрібно ще провести поворот. Якщо `AngleRotate` (заданий кут для повороту) не дорівнює поточному куту `CurrAngle`, тоді потрібен ще поворот.

Якщо `AngleRotate` більше, ніж `CurrAngle`, то робиться поворот вправо, інакше робиться поворот вліво. Поточний кут `CurrAngle` збільшується або зменшується на одиницю, і зображення робота оновлюється з використанням функції `RotateImage`.

Якщо поворот завершено (коли `AngleRotate` дорівнює `CurrAngle`), то таймер вимикається (`timer_rotate.Enabled = false`). Встановлюються нові значення для кутів повороту `CurrAngle` та `CurrAngleVodilo`. Зображення робота та штанги металошукача оновлюються для відображення остаточного стану. Також встановлюються деякі параметри для подальших подій (наприклад, `run_up.Enabled` стає `true`).

Фрагмент коду для виконання пошуку ВНП показано на рисунку 3.4.

На початку роботи виконується встановлення параметрів радіуса (R) сканування та початкових координат центру (X_c , Y_c) кріплення штанги металошукача. Значення L_{max} використовується для встановлення радіуса сканування.

Далі виконується визначення координат центру (X_c , Y_c) в залежності від напрямку (`mode`). Це може бути "up", "right", або "left".

Далі відбувається обчислення координат точки (X_m , Y_m) центру чутливої котушки металошукача з врахуванням кута повороту `CurrAngleVodilo`.

При скануванні поверхні виконується відображення інформації про результати сканування та знайденої міни на зображенні поверхні місцевості, а також виклик функції `drawEllipse` для рисування маркера міни на `pictureBox3`.

```

private void testMine(int CurrAngleVodilo)
{
    int R = Lmax;
    int Xc = 0;
    int Yc = 0;

    if (mode == "up")
    {
        Xc = curX + (int)(pictureBox1.Width / 2) - 20;
        Yc = curY + (int)(pictureBox1.Height / 2) - 80;
    }
    else if (mode == "right")
    {
        Xc = curX + (int)(pictureBox1.Width / 2) + 50;
        Yc = curY + (int)(pictureBox1.Height / 2) - 20;
    }
    else if (mode == "left")
    {
        Xc = curX + (int)(pictureBox1.Width / 2) - 100;
        Yc = curY + (int)(pictureBox1.Height / 2) - 20;
    }

    double angle = (CurrAngleVodilo - 90) * 3.14 / 180;
    int Xm = Xc + (int)(R * Math.Cos(angle));
    int Ym = Yc + (int)(R * Math.Sin(angle));

    label1.Text = String.Format("Scan: Xm={0}; Ym={1}", Xm, Ym);
    if (Xm < Xmin) Xmin = Xm;
    if (Xm > Xmax) Xmax = Xm;
    label3.Text = String.Format("Mine: Xmin={0}; Xmax={1}", Xmin, Xmax);
    Color c = Color.Green;
    if (checkMine(Xm, Ym)) c = Color.Red;
    drawEllipse(pictureBox3, Xm, Ym, 10, 10, 10, c);
    pictureBox1.BackColor = Color.Transparent;
    pictureBox2.BackColor = Color.Transparent;
}

```

Рисунок 3.4 – Фрагмент коду для виконання пошуку ВВП

Фрагмент програмного модуля руху вперед показано на рисунку 3.5.

```

private void scan_up()
{
    pictureBox1.Top = curY;
    pictureBox1.Left = curX;

    if (mode == "up")
    {
        pictureBox2.Left = 0;
        pictureBox2.Top = -42;
    }
    else if (mode == "right")
    {
        pictureBox2.Left = 44;
        pictureBox2.Top = 0;
    }
    else if (mode == "left")
    {
        pictureBox2.Left = -44;
        pictureBox2.Top = 0;
    }

    if (mode == "up")
    {
        AngleVodilo = AngleUpList[CurrStepVodilo];
    }
    else if (mode == "right")
    {
        AngleVodilo = AngleRightList[CurrStepVodilo];
    }
    else if (mode == "left")
    {
        AngleVodilo = AngleLeftList[CurrStepVodilo];
    }

    timer_vodilo.Enabled = true;
}

```

Рисунок 3.5 – Фрагмент програмного модуля руху вперед

Загальна ідея цього фрагменту коду полягає в ініціалізації положення та вигляду мобільного робота та металошукача, визначенні кута повороту металошукача залежно від напрямку, а також у включенні таймера для подальшого керування рухом.

В залежності від поточного напрямку руху встановлюється положення металошукача (pictureBox2). Задано, що робот може рухатися вперед, вправо або вліво.

Залежно від напрямку руху, вибирається відповідний кут повороту для металошукача. Заданий діапазон кутів задається у відповідних списках для кожного напрямку (AngleUpList, AngleRightList, AngleLeftList).

3.3 Висновки до розділу 3

В цьому розділі було розглянуто різноманітні аспекти, що впливають на вибір мови програмування та інших технічних засобів у процесі розробки програмного продукту.

Важливо також враховувати специфіку проекту, розмір команди розробників, наявність досвіду та інші фактори при виборі мови програмування. Також, стає важливим вибір інструментів та фреймворків, які допоможуть полегшити роботу розробників та забезпечити ефективне використання обраної мови.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зовнішній вигляд інтерфейсу програми для дослідження методу планування траєкторії руху мобільної платформи при пошуку вибухонебезпечних предметів показано на рисунку 4.1.

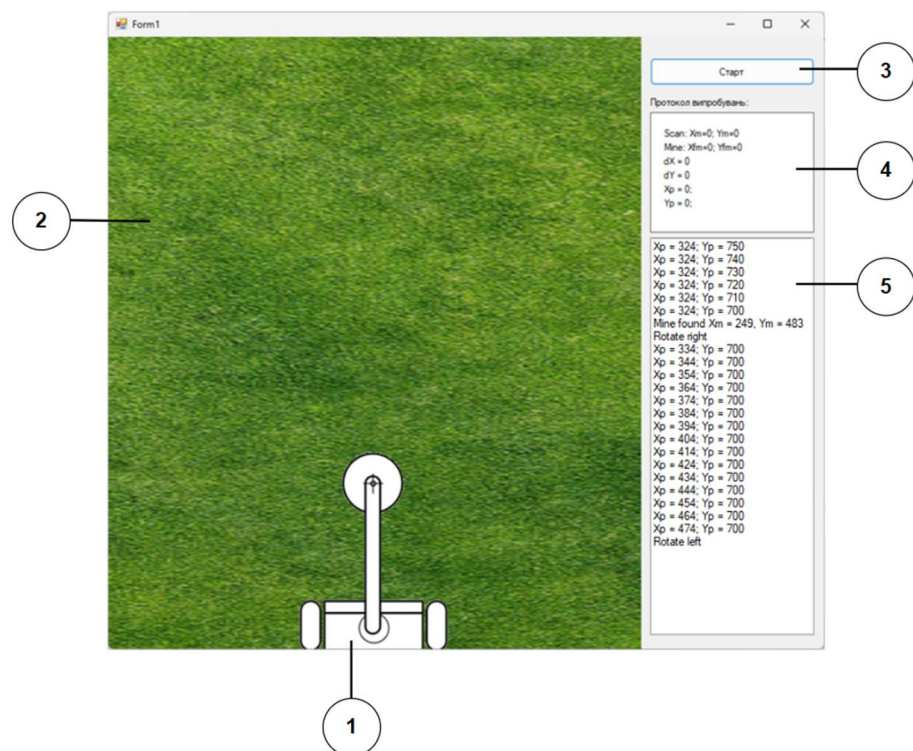


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд інтерфейсу програми для дослідження методу планування траєкторії руху мобільної платформи при пошуку вибухонебезпечних предметів

Інтерфейс програми має наступні елементи:

- графічне зображення мобільного робота (1);
- зображення ділянки навколишнього середовища (2);
- кнопка запуску експерименту (3);
- поточні розрахункові дані експерименту (4);
- протокол дослідження (5).

Завдяки автономному програмному модулю графічне зображення мобільного робота може динамічно переміщуватись по зображенню ділянки навколишнього середовища.

Після натискання кнопки «Старт» програмний аналог мобільного робота починає рух заданою ділянкою. В процесі руху відбувається сканування поверхні з метою пошуку ВНП. Одночасно цей процес візуалізується рухами штанги металодетектора вліво або вправо відносно центральної вісі мобільного робота.

Якщо в процесі руху металодетектор виявляє наявність ВНП, то на екрані це позначається у вигляді спеціальної мітки.

На рисунку 4.2 показана мітка, знайденого ВНП.



Рисунок 4.2 – Мітка, знайденого ВНП

Мітка зроблена у вигляді міни, яка зафарбована у червоний колір для помітності на фоні ландшафту місцевості. Проскановані ділянки місцевості на яких не біло виявлено ознак ВНП помічаються зеленим кольором.

На рисунку 4.3 показано інтерфейс поля пошуку ВНП в програми для дослідження запропонованого методу планування траєкторії руху мобільного робота.

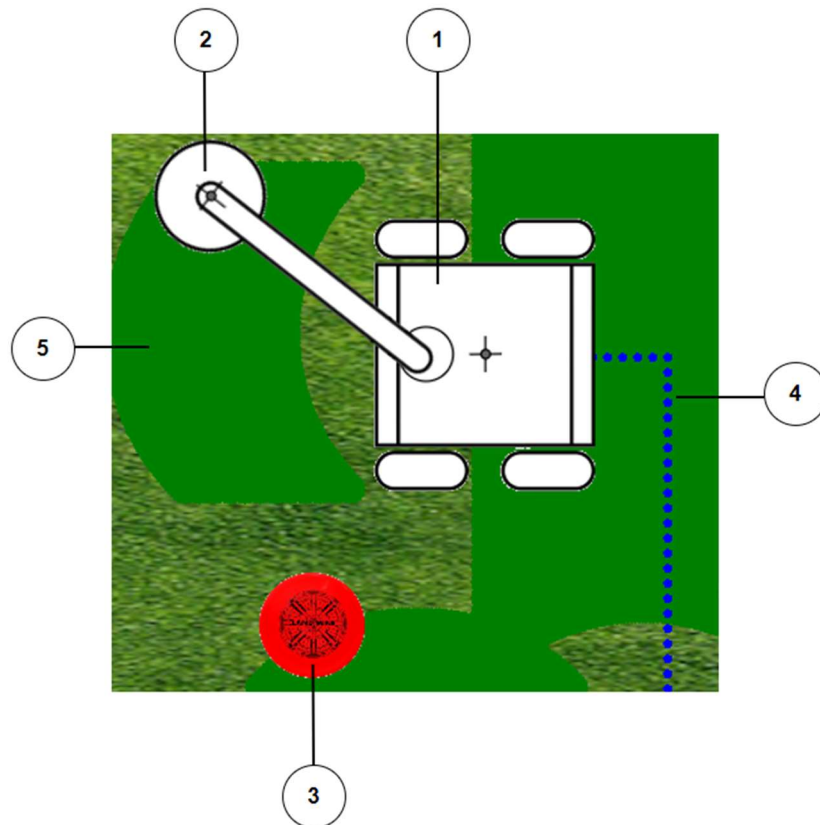


Рисунок 4.3 – Інтерфейс поля пошуку ВВП в програми

На рисунку 4.3 показані такі графічні елементи:

- мобільний робот (1);
- чутливий елемент металошукача (магнітна котушка) (2);
- знайдений ВВП (3);
- траєкторія руху мобільного робота (4);
- просканована ділянка сектора пошуку ВВП (5).

При виявленні ВВП виконуються розрахунки дистанції його обходження за розробленим раніш методом. На рисунку 4.4 показано приклад розрахункових даних для одного з експериментів.

На даному рисунку показані:

- координати поточного розташування котушки металошукача (Scan);
- координати знайденого ВВП (Mine: X_{fm} ; Y_{fm});
- розрахункові дистанції обходу ВВП (dX ; dY);
- поточні координати розташування мобільної платформи (X_p ; Y_p).

```

Scan: Xm=454; Ym=313
Mine: Xfm=249; Yfm=483
dX = 149
dY = 411
Xp = 474
Yp = 530

```

Рисунок 4.4 – приклад розрахункових даних для одного з експериментів

На рисунку 4.5 показано декілька послідовних стадій обходу вибухонебезпечних предметів.

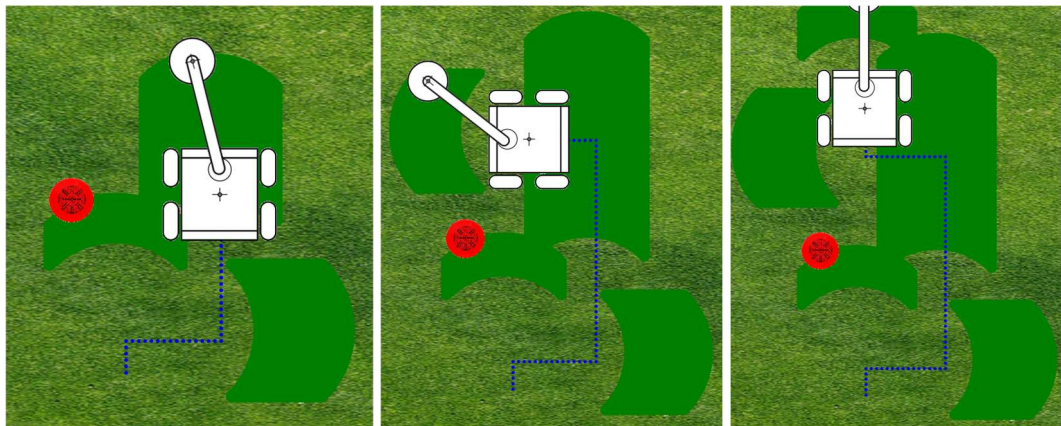


Рисунок 4.5 – Послідовність обходу перешкоди у вигляді ВНП

З наведеного рисунку можна бачити, експериментальні дослідження показали доцільність використання розробленого методу прокладання траєкторії руху мобільного робота з металодетектором в процесі виявлення ВНП.

Запропонований метод дозволяє в автоматичному режимі змінювати головну траєкторію руху мобільного робота при виявленні ВНП для безпечного об'їзду та знов повернення на задану траєкторію.

Розроблений метод дозволяє в процесі обходу ВВП продовжувати виконувати дії з пошуку небезпечних предметів та корегувати нову траєкторію в залежності від зміни навколишньої ситуації.

Однак, експериментальні дослідження показали й недолік запропонованого методу. Так, в процесі виконання дій з об'їзду перешкоди не всі ділянки місцевості виявляються просконованими. Це можна побачити на рисунку 4.5 у вигляді розривів в зелених зонах, що були оброблені металодетектором.

Таким чином, в остаточному висновку можна зазначити, що запропонований метод є дієздатним, але потребує доопрацювання для реального застосування при програмуванні реальних роботизованих пристроїв.

4.2 Висновки до розділу 4

Експерименти показали, що розроблений метод ефективно використовує дані від металодетектора для прокладання оптимального шляху, уникаючи потенційно небезпечних зон. Це дозволяє роботу-саперу працювати більш безпечно і ефективно.

Також було виявлено, що розроблений метод може бути поліпшений шляхом використання більш точних алгоритмів для обробки даних від металодетектора. Це може допомогти збільшити точність визначення потенційно небезпечних зон і, відповідно, збільшити ефективність роботи-сапера

ВИСНОВКИ

В результаті проходження професійної практики проведено аналіз методів пошуку вибухонебезпечних предметів. Аналіз показує, що наявні методи виявлення й розпізнавання, залежно від характеристик об'єктів пошуку та навколишніх умов, мають обмеження в імовірності виявлення й не забезпечують необхідного рівня продуктивності пошуку.

Наведено класифікацію методів виявлення за фізичними принципами та порівняння методів виявлення ВВП.

Праведно аналіз існуючих рішень планування траєкторії руху роботу для пошуку ВВП та досліджено запропонований підхід для планування траєкторії руху мобільного роботу під час пошуку вибухонебезпечних предметів.

Недоліком запропонованого рішення є наявність допоміжного іншого роботизованого пристрою та недоопрацьованість алгоритму планування маршруту в залежності від навколишнього середовища.

Проведено аналіз загальних вимог щодо вдосконалення методу планування траєкторії руху мобільного роботу.

Побудована кінематична модель робота. Ця модель необхідна як при визначенні поточних координат знайдених ВВП і передаванні їх на сервер для відображення на карті місцевості, так і для виконання задачі симуляції руху мобільного робота за допомогою тестового програмного засобу.

Виконано опис запропонованого методу сканування території при пошуку ВВП та вдосконалення методу побудови траєкторії обходу знайдених ВВП.

Виконано побудову алгоритму роботи програми для проведення експериментальних досліджень. Описана структурна схема програми та основні програмні функції.

Запропонований метод дозволяє в автоматичному режимі змінювати головну траєкторію руху мобільного робота при виявленні ВНП для безпечного об'їзду та знов повернення на задану траєкторію.

Розроблений метод дозволяє в процесі обходу ВНП продовжувати виконувати дії з пошуку небезпечних предметів та корегувати нову траєкторію в залежності від зміни навколишньої ситуації. Однак, експериментальні дослідження показали й недолік запропонованого методу. Так, в процесі виконання дій з об'їзду перешкоди не всі ділянки місцевості виявляються просконованими.

Таким чином, в остаточному висновку можна зазначити, що запропонований метод є дієздатним, але потребує доопрацювання для реального застосування при програмуванні реальних роботизованих пристроїв.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту 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, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с
3. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.
4. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: [https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf]
5. Luo J., Ma J. An Adaptive Trajectory Planning for Autonomous Driving Using Trapezoidal Decomposition. DOI: 10.1109/CAC57257.2022.10055875.
6. Федоренко Г., Фесенко Г., Харченко В. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2022. № 4(22). С. 20-31.
7. Karur K., Sharma N. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots. P. 449-453.

8. Lei M., Huang M. Improved Rapid-Expanding-Random-Tree-Based Trajectory Planning on Drill ARM of Anchor Drilling Robots. DOI: 10.3390/machines11090858. P.4-15.
9. Молочко С. М., Башинський В. Г., Каламурза О. Г., Журахов В. А. Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на БПАК / Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. № 2 (8). P. 80–90. DOI: 10.37701/dndivsovt.8.2021.09.
10. Fernandez M. G., Lopez Y. A., Arboleya A. A., Valdes B. G., Vaqueiro Y. R., Andres F. L. H., Garcia A. P. Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 45100–45112. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2863572.
11. Van Verre W., Podd F. J., Daniels D. J., Peyton A. J. (2021). “A Review of Passive and Active Ultra-Wideband Baluns for Use in Ground Penetrating Radar”. Remote Sensing, Vol. 13, Issue 10. DOI: 10.3390/rs13101899.
12. Kumar S., Gupta R. (2019). “A survey on trajectory planning algorithms for mobile robots in hazardous environments”. Robotics and Autonomous Systems, 45(2), p. 123-134.
13. Kaneko A., Fukushima E. (2011). “Development of an automatic landmine detection and marking system for the Demining Robot Gryphon”. J Adv Comput Intell Inform 15(6). DOI: 10.20965/jaciii.2018/ P. 737-741.
14. Li Z., Wu Q. (2020). “Metal Detector Data Fusion for Improved Trajectory Planning in Robot Mine Clearance”. Automation Science and Engineering, 15(2), P. 678-691.
15. Лубінець М.С., Новоселов С.П. (2023). “Розроблення методу прокладення траєкторії руху робота-сапера на основі даних від металошукача”. Автоматизація та приладобудування, Вип.2, № 4, С.97–103.

16. Невлюдов І. Ш. Застосування цифрових двійників технічних засобів автоматизації для розроблення програмно-технічних комплексів АСУ ТП : Навчальний посібник / І. Ш.Невлюдов, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2023. – 267 с. ISBN 978-617-8059-95-8, DOI: 10.30837/978-617-8059-95-8.