

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(позначення документа)

Радіоелектронна система комплексного збору та обробки інформації і
визначення орієнтації мобільного наземного робота
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи СТМм-22-2
Максим ПЕЧЕНОВ
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Системи, технології і
комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Володимир КАРТАШОВ
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис) Володимир КАРТАШОВ
(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма "Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа"

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Печенову Максиму Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Радіоелектронна система комплексного збору та обробки інформації і визначення орієнтації мобільного наземного робота

затверджена наказом по університету від " 20 " 11 2023 р. № 1371 СТ

2. Термін подання студентом роботи 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

1. Аналіз підходів технічного бачення та існуючих методів планування шляху

2. Вибір і прийняття методу планування шляху відповідно до специфікацій вибраної системи технічного зору.

3. Удосконалення обраного методу планування шляху за рахунок додавання етапів постобробки.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

ВСТУП

1. Аналітичний огляд існуючих систем для визначення орієнтації мобільного наземного робота

2. Розробка структурної та функціональної схеми системи комплексного збору та обробки інформації

3. Аналіз методів комплексного збору та обробки інформації для планування шляху мобільного робота

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ДОДАТКИ

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

1. Постановка задачі; 2. Схема методу вимірювань координат; 3. Сфера застосування; 4. Актуальність; 5. Структура мобільного робота 6. Визначення понять; 7. Основні оптичні прилади та системи навігації; 8. Функціональна схема системи; 9. Розробка моделі оптичної системи навігації мобільних роботів; 10. Аналіз експериментальних даних; 11. Висновки

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термин виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналітичний огляд існуючих систем для визначення орієнтації мобільного наземного робота	20.11.23–28.11.23	
2.	Розробка структурної та функціональної схеми системи комплексного збору та обробки інформації	21.11.23–28.11.23	
3.	Аналіз методів комплексного збору та обробки інформації для планування шляху мобільного робота	23.11.23–02.12.23	
4.	Графічна частина роботи	15.12.21–20.12.23	
5.	Перевірка керівником	20.12.23–24.12.23	
6.	Перевірка на академічний плагіат	24.12.23–26.12.23	
7.	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	27.12.23–31.12.23	

Дата видачі завдання _____ 20.11.2023 р.

Студент _____ Максим ПЕЧЕНОВ
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Володимир КАРТАШОВ
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи має: 69 с., 21 рис., 1 табл., 2 додатка, 46 джерел.

МОБІЛЬНІ РОБОТИ, НАВІГАЦІЯ, ЛОКАЛЬНА НАВІГАЦІЯ, ОПТИЧНІ СИСТЕМИ, ЗОРОВІ ДАНІ, МІСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ПЕРЕШКОДИ

Об'єкт дослідження – система комплексного збору та обробки інформації.

Предмет дослідження – удосконалення методів планування шляху і визначення орієнтації мобільного наземного робота.

Мета кваліфікаційної роботи – аналіз методів вдосконалення планування шляху, використовуючи конфігурацію динамічного мережевого графіка та 3D-лазерну систему технічного бачення для створення 3D-хмари точок середовища.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, статистична обробка даних, створення алгоритмів.

В ході роботи над кваліфікаційною роботою, для вирішення поставлених задач, було проведено аналітичний огляд існуючих систем для визначення орієнтації мобільного наземного робота. Розглянуті традиційні методи виявлення зіткнень на основі візуалізації, які потребують обробки величезного обсягу зображень у режимі реального часу або потребують попередньо створеної моделі реального світу, яку або важко завершити на борту для мікроробота з обмеженими ресурсами, або навряд чи здатний справлятися з динамічним середовищем. Показано, що загалом ці методи вирішують завдання планування руху самостійного робота в групі. Очевидно, що обмін даними між n роботами в групі є хорошим інструментом для отримання додаткової інформації. Це може служити для більш ефективної реалізації всіх

перерахованих в роботі методів. Основна ідея полягає в тому, щоб якнайшвидше дати кожному окремому роботу в групі більше знань про сектор. Крім того, в деяких випадках певна частина інформації може бути недоступною для i -го індивіда з його власної позиції.

ABSTRACT

The explanatory note of the qualification work has: 69 pages, 21 figures, 1 tables, 2 appendices, 46 sources.

MOBILE ROBOTS, NAVIGATION, LOCAL NAVIGATION, OPTICAL SYSTEMS, VISION DATA, URBAN ENVIRONMENT, OBSTACLES

The object of research is methods of path planning.

The subject of the study is the improvement of the selected path planning method by adding post-processing stages.

The purpose of the qualification work is to analyze methods for improving path planning using dynamic network graph configuration and a 3D laser technical vision system to create a 3D point cloud of the environment.

Research methods – theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modeling, statistical data processing, creation of algorithms.

In the course of the work on the qualification work, in order to solve the tasks, an analytical review of the existing systems for determining the orientation of the mobile ground robot was carried out. Traditional visualization-based collision detection methods are reviewed, which require processing a huge amount of images in real-time or require a pre-built model of the real world that is either difficult to complete on-board for a resource-constrained microrobot or is unlikely to cope with a dynamic environment. It is shown that, in general, these methods solve the task of planning the movement of an independent robot in a group. Obviously, sharing data between n robots in a group is a good tool to get more information. This can serve for more effective implementation of all the methods listed in the work. The main idea is to give each individual working in the group more knowledge about the sector as soon as possible. In addition, in some cases, a certain part of the information may not be available to the i -th individual from his own position.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДСА - діаграма спрямованості антени;

КВ НКІ ЕМВ - комплекс впливу надкороткоімпульсного;
електромагнітного випромінювання;

КВА - контрольно-вимірювальна апаратура;

МЕК - міжнародна електротехнічна комісія;

ЗЗ - зворотний зв'язок;

ПК - персональний комп'ютер;

ППРЧ (FHSS) – псевдовипадкове переналаштування частоти;

РРЛ - радіорелейні лінії;

РЕБ - радіоелектронна боротьба;

РЕП - радіоелектронне подавлення;

РЕЗ- радіоелектронні засоби;

СПО - спеціальне програмне забезпечення;

НШС – надширокосмуговий;

НКІ ЕМВ - надкороткоімпульсне електромагнітне випромінювання;

ТС - технічний засіб;

ЧТС - частотно тимчасовий сигнал;

ШРД - широкосмуговий радіодоступ;

ШПС - широкосмугові сигнали;

ШШС - шумоподібний широкосмуговий сигнал;

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – метод модуляції з ортогональним частотним розділенням;

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) - метод розширення спектра методом прямої послідовності;

PSK (Phase Shift Keying), BPSK, QPSK - метод модуляції з стрибкоподібною зміною фази;

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - метод амплітудно фазової модуляції;

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	7
Вступ.....	10
1 Аналітичний огляд існуючих систем для визначення орієнтації мобільного наземного робота.....	11
1.1 Традиційні методи виявлення зіткнень на основі візуалізації	12
1.2 Методи виявлення зіткнень на основі біотехнологій.....	13
1.3 Принцип камери ToF	14
1.4 Системи засновані на основі камери ToF	15
1.5 Висновки до розділу	16
2 Розробка структурної та функціональної схеми системи комплексного збору та обробки інформації.....	18
2.1 Розробка структурної та функціональної схеми системи комплексного збору та обробки інформації.....	18
2.1.1 Розробка узагальненої структурної схеми системи комплексного збору та обробки інформації мобільного робота.....	18
2.1.3 Узагальнена функціональна схема системи комплексного збору та обробки інформації	20
2.2 Аналітичний огляд існуючих систем СТЗ.....	23
2.3 Аналіз системи вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі.....	25
2.4 Вирішення задачі покращення розпізнавання поверхні	29
2.5 Висновки до розділу	37
3 Аналіз методів комплексного збору та обробки інформації для планування шляху мобільного робота	39
3.1 Аналіз алгоритмів знаходження шляху	40

3.2 Аналіз навігаційних алгоритмів	44
3.3 Навігація за допомогою системи технічного зору.....	44
3.4 Аналіз методів виявлення зіткнень і уникнення перешкод.....	47
3.5 Висновки до розділу	56
Висновки	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	60
Додатки.....	69
Додаток А.....	70
Додаток Б	74

ВСТУП

Загальна мета кваліфікаційної роботи аналіз методів вдосконалення планування шляху, використовуючи конфігурацію динамічного мережевого графіка та 3D-лазерну систему технічного бачення для створення 3D-хмари точок середовища. Мобільного наземного робота оснащено 3D лазерною системою технічного зору. Під час руху вам потрібно відвідати всі цікаві точки та створити тривимірну хмару точок навколишнього середовища.

Конкретні цілі:

1. Аналіз підходів технічного бачення та вибір системи.
2. Аналіз існуючих методів планування шляху.
3. Вибір і прийняття методу планування шляху відповідно до специфікацій вибраної системи технічного зору.
4. Удосконалення обраного методу планування шляху шляхом додавання етапів постобробки.

Ці цілі дуже важливі в поведінці мобільного робота та для розробки навігаційної системи, яка дозволяє роботу вільно пересуватися в середовищі з перешкодами, динамічно перераховуючи шлях відповідно до виявлених змін в оточенні.

Представлена навігаційна система складається з двоетапної системи планування шляху з постобробкою на основі алгоритму A^* , системи технічного бачення для виявлення перешкод і вдосконаленого за допомогою провідного методу зміни, який дозволяє роботам розраховувати оптимізований шлях усередині попередньо відомого середовища (виявлені роботи-купівлі у групі) або навіть уникати частин під час навігації у випадку тупика. Це дозволить роботу зіткнень переміщатися в невідомому середовищі та безпечно досягати точок інтересу та мети.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ МОБІЛЬНОГО НАЗЕМНОГО РОБОТА

Кожен математичний/обчислювальний блок у традиційному алгоритмі автономного робота (рис. 1.1) під час своєї роботи базується на даних, отриманих від його датчиків.

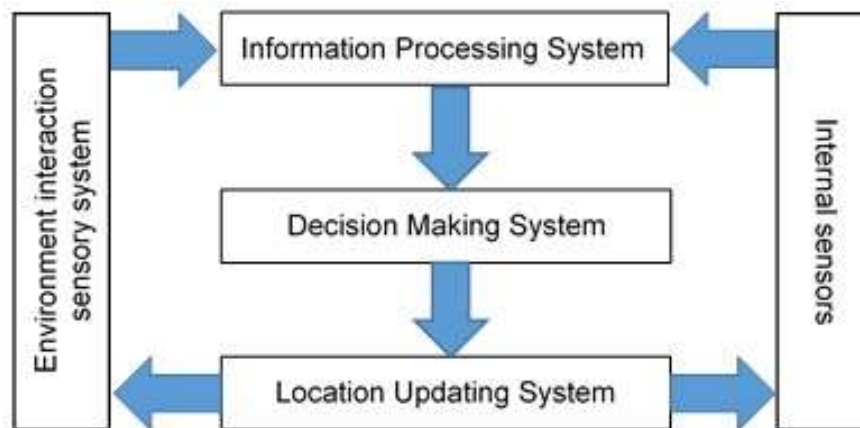


Рисунок 1.1 - Автономна роботизована система

Для завдання навігації зазвичай використовуються гідролокатори як базове рішення, лазерні далекоміри як більш точна альтернатива гідролокаторам, LIDAR (може повертати детальне оточення, але залежить від його форм-фактора), роботи на основі камери ([13-14]) і дрони [15] або дорожче обладнання, як-от камери ToF (Time-of-Flight) [16]. Для деяких завдань можливе використання лише інерціальної навігаційної системи [1].

Багато досліджень і рішень у сфері виявлення перешкод і навігації, як згадувалося раніше, базуються на камерах і лазерних системах. Попередньо буде розглянуто деякі роботи.

У [17] автори представляють легку, недорогу систему стереобачення на основі комах. Вони використовували дві камери, розташовані дуже схожі на очі медоносної бджоли, і отримали поле огляду приблизно 280° на 150° . У [18]

автори використовують камеру зору для уникнення перешкод у режимі реального часу за допомогою двоногих роботів. Стаття [19] описує уникнення перешкод для кишенькового дрона на основі даних зі стереокамери. У [20] рішення використовує Arduino з піксі камерою колісного робота для завдання стеження за лінією та уникнення перешкод. Рішення, згадане в [21], може бути застосоване для автономних автомобілів і демонструє метод розробки системи виявлення транспортних засобів на основі датчиків стереозору.

Стаття [22] описує переваги використання довгохвильового інфрачервоного стереобачення та комбінації 3D-LIDAR у випадку пожежі. В іншій публікації [23] представлені системи LIDAR на основі MEMS для використання в автономному транспортному засобі. У роботі [24] запропоновано метод LIDAR-одометрії та картографування в реальному часі та його застосування на безпілотах і автомобілях.

Також такі системи можна використовувати для подібних завдань в інших сферах. Автори [25] використовували промислову роботизовану руку зі встановленою системою зору на основі 3D-камери для сканування об'єктів, подібно до них у [26] використовують промислових роботів із камерою для відстеження рухів другого робота в положенні [27]. Робота контролюється маркером відстеження зі світлодіодами, а в [28] було запропоновано відстеження пози людини та класифікацію за допомогою камер стерео бачення та 3D-моделі. Також можна згадати [29] автоматизацію на основі стереозображення для рішення збирання сміття.

Як видно, лазерні системи більше підходять для цілей автомобільної навігації. Це пояснюється їх принципами представлення навколишнього середовища, що допомагає уникнути тривалої постобробки, як у камерах.

1.1 Традиційні методи виявлення зіткнень на основі візуалізації

Виявлення зіткнень на основі зору широко використовується в робототехніці [80], [81]. Наприклад, Saha et al. [32] запропонував

монокулярний метод виявлення та уникнення перешкод для БПЛА. Вони використовували математичну модель, щоб оцінити відносну відстань від камери БПЛА до перешкоди шляхом виявлення характерних точок у полі зору БПЛА, яке не є бортовою системою. Yaghmaie та ін. [33] запропонував новий метод навігації роботів у динамічних середовищах, який називається алгоритмом виходу, який базується на методі силового поля, який належить до сімейства одночасної локалізації та відображення. У їхньому алгоритмі рух динамічних перешкод прогнозується фільтром Калмана для виявлення зіткнень у поєднанні з наближенням до потенційного поля. Традиційні візуальні методи виявлення зіткнень потребують обробки величезного обсягу зображень у режимі реального часу або потребують попередньо створеної моделі реального світу, яку або важко завершити на борту для мікроробота з обмеженими ресурсами, або навряд чи здатний справлятися з динамічним середовищем.

1.2 Методи виявлення зіткнень на основі біотехнологій

Крім того, існує кілька методів уникнення зіткнень і планування маршруту, натхненних біологією, значна частина яких залежить від елементарного детектора руху (EMD), наприклад, Zhang et al. [32], Badia та ін. [33] і Franceschini et al. [34]. Методи, засновані на ЕМД, можуть бути важко застосовувати через їх внутрішній характер — презентація обмежена певними візуальними темпами. Методи, засновані на гігантському локаторі руху лобули (LGMD), можуть адаптуватися до значної частини майбутніх зіткнень, не звертаючи уваги на візуальну швидкість. Blanchard та ін. [35] був першим, хто впровадив нейронні системи на основі LGMD у роботів для постійного розпізнавання ударів і випробував це на роботах Khepera I. Badia та ін. [36] запропонували один тип моделі розпізнавання зіткнення на основі LGMD і випробували її на роботі "Страйдер" з віддаленою камерою для захоплення та передачі зображень на ПК для обробки. Сільва та ін. [37] запропонував іншу

модель LGMD, яка об'єднала дві роботи з [38-39] для все більш сильного виявлення колізій, яка більше зосереджена на моделюванні, а не на розробці вбудованих систем. Була зроблена спроба оновити технології, натхненні біотехнологіями, у величезних масштабах, об'єднуючи чіпи, такі як програмований у полі кластер (FPGA), Meng et al. [39] додали додаткову комірку для розпізнавання розробки зверху вниз, Харрісон [40] запропонував просту інтегральну схему для виявлення зіткнень залежно від EMD, а Окуно та Ягі [41] оновили змішані аналогові/цифрові вбудовані схеми з FPGA. Ці спроби є недоцільними для роботів меншого масштабу через величезні розміри або потужне використання схем FPGA.

1.3 Принцип камери ToF

Оцінки глибини залежать від помітного стандарту часу прольоту (ToF) [942] шляхом використання або імпульсної, або безперервної хвильової (CW) модуляції. Деякі камери ToF використовують обидва типи модуляції. Щоб продемонструвати більш глибокі принципи, буде розглянуто камери ToF на основі CW. Датчики на основі дискретної імпульсної модуляції вимірюють час проходження оптичного імпульсу для обчислення глибини, тоді як датчики на основі блокування вимірюють різницю фаз між переданим і прийнятим сигналами. Система випромінює ближнє інфрачервоне світло (NIR) через світлодіод і потім відбиває його назад на датчик. Кількість світла, відбитого сценою, вимірюється кожним пікселем датчика з рівними інтервалами в кожному циклі (m_0, m_1, m_2 і m_3), щоб його фаза (1.1), зміщення (1.2) і амплітуда (1.3) можна вимірювати паралельно.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{m_3 - m_1}{m_0 - m_2}\right), \quad (1.1)$$

$$\beta = \frac{m_0 + m_1 + m_2 + m_3}{4}, \quad (1.2)$$

$$A = \frac{\sqrt{p(m_0 + m_1)^2 + (m_2 + m_3)^2}}{2}. \quad (1.3)$$

Цю процедуру фазової демодуляції зазвичай називають «чотирьохствольним» дослідженням, за допомогою якого можна легко обчислити цільову глибину (1.4).

$$D = L \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (1.4)$$

Для прогнозування якості вимірювання використовували інтенсивність (В) і амплітуду (А). Частота модуляції (f_m) випромінюваного світла визначає однозначний діапазон відстані датчика (2.5), де c — швидкість світла у вакуумі.

$$L = \frac{c}{2f_m}. \quad (1.5)$$

1.4 Системи засновані на основі камери ToF

До цієї групи підходить кілька технік, наприклад, глибина від фокусування/дефокусування/неясність, глибина від руху, глибина від форми, звукова система та стратегії організованої світлової тріангуляції [43]. Методи, засновані на глибині, використовують зміну фокусу, оцінку руху та визначення зміни форми. Ці методи створюють неоднозначність і сингулярності, і часто вимагають використання численних зображень для вирішення проблеми, що передбачає додатковий час, простір і обчислювальні витрати. З іншого боку, дані про глибину, отримані за допомогою камер ToF, мають високу точність за допомогою одного кадру даних (зображення).

Стратегії триангуляції можна розділити на пасивні (стереобачення) та активні (техніки методів структурованого світла).

Для пасивних методів триангуляції потрібна пара камер, ізольованих за стандартом, який визначає обмежений діапазон робочої глибини (чим більша глибина, тим більша основа потрібна). Ці методи повинні вирішити наступну проблему: визначити відповідні точки із зображень камери, які є еталонами подібної 3D-точки. Це обчислювально дороге та складне питання, оскільки системи стереовізійних систем не можуть порівнювати точки в однорідному оточенні [44]. Камери ToF і системи на основі лазера не мають цієї проблеми, оскільки вони отримують ці дані миттєво.

Методи активної триангуляції на відміну від попередніх методів, методи активної триангуляції вимагають лише однієї камери та організованого випромінювача світла, який дає мінімум одну лінію шаблону. Порівняно з ToF-камерами та лазерними системами бачення поточний метод має деякі недоліки: неповні/відсутні оцінки глибини, потреба у винятковому джерелі живлення та концентрованому світлі, перевірка світла через сцену та винятково контрольовані умови освітлення, які підказують основні обмеження в локальному або відкритому застосуванні автономних транспортних засобів.

1.5 Висновки до розділу

В ході роботи над кваліфікаційною роботою, для вирішення поставлених задач, було проведено аналітичний огляд існуючих систем для визначення орієнтації мобільного наземного робота. Розглянуті традиційні методи виявлення зіткнень на основі візуалізації, які потребують обробки величезного обсягу зображень у режимі реального часу або потребують попередньо створеної моделі реального світу, яку або важко завершити на борту для мікроробота з обмеженими ресурсами, або навряд чи здатний справлятися з динамічним середовищем.

Також розглянуті методи виявлення зіткнень на основі біотехнологій та з використанням оцінки глибини залежать від помітного стандарту часу прольоту (принцип камери ToF) та системи засновані на основі камери ToF. І прийшли до висновків, що ці методи створюють неоднозначність і сингулярності, і часто вимагають використання численних зображень для вирішення проблеми, що передбачає додатковий час, простір і обчислювальні витрати. З іншого боку, дані про глибину, отримані за допомогою камер ToF, мають високу точність за допомогою одного кадру даних (зображення). Стратегії тріангуляції можна розділити на пасивні (стереобачення) та активні (техніки методів структурованого світла).

Для пасивних методів тріангуляції потрібна пара камер, ізольованих за стандартом, який визначає обмежений діапазон робочої глибини (чим більша глибина, тим більша основа потрібна). Ці методи повинні вирішити наступну проблему: визначити відповідні точки із зображень камери, які є еталонами подібної 3D-точки. Це обчислювально дороге та складне питання, оскільки системи стереовізійних систем не можуть порівнювати точки в однорідному оточенні [44]. Камери ToF і системи на основі лазера не мають цієї проблеми, оскільки вони отримують ці дані миттєво.

Методи активної тріангуляції на відміну від попередніх методів, методи активної тріангуляції вимагають лише однієї камери та організованого випромінювача світла, який дає мінімум одну лінію шаблону. Порівняно з ToF-камерами та лазерними системами бачення поточний метод має деякі недоліки: неповні/відсутні оцінки глибини, потреба у винятковому джерелі живлення та концентрованому світлі, перевірка світла через сцену та винятково контрольовані умови освітлення, які підказують основні обмеження в локальному або відкритому застосуванні автономних транспортних засобів.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КОМПЛЕКСНОГО ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Розробка структурної та функціональної схеми системи комплексного збору та обробки інформації

Відповідно до поточного завдання підвищення точності вимірювання за рахунок введення в систему додаткових блоків, що забезпечать можливість сканувати об'єкт в горизонтальній площині з усіх боків, що підвищує точність сканування та до 10 % точність обчислювання поточної координати.

2.1.1 Розробка узагальненої структурної схеми системи комплексного збору та обробки інформації мобільного робота

Узагальнена структурна схема системи комплексного збору та обробки інформації представляє собою схему з блоків-компонентів робота та зв'язків між ними, що забезпечує коректну роботу робота та виконання його основних функцій. Дана схема зображена на рис. 2.1 з наступним описом.

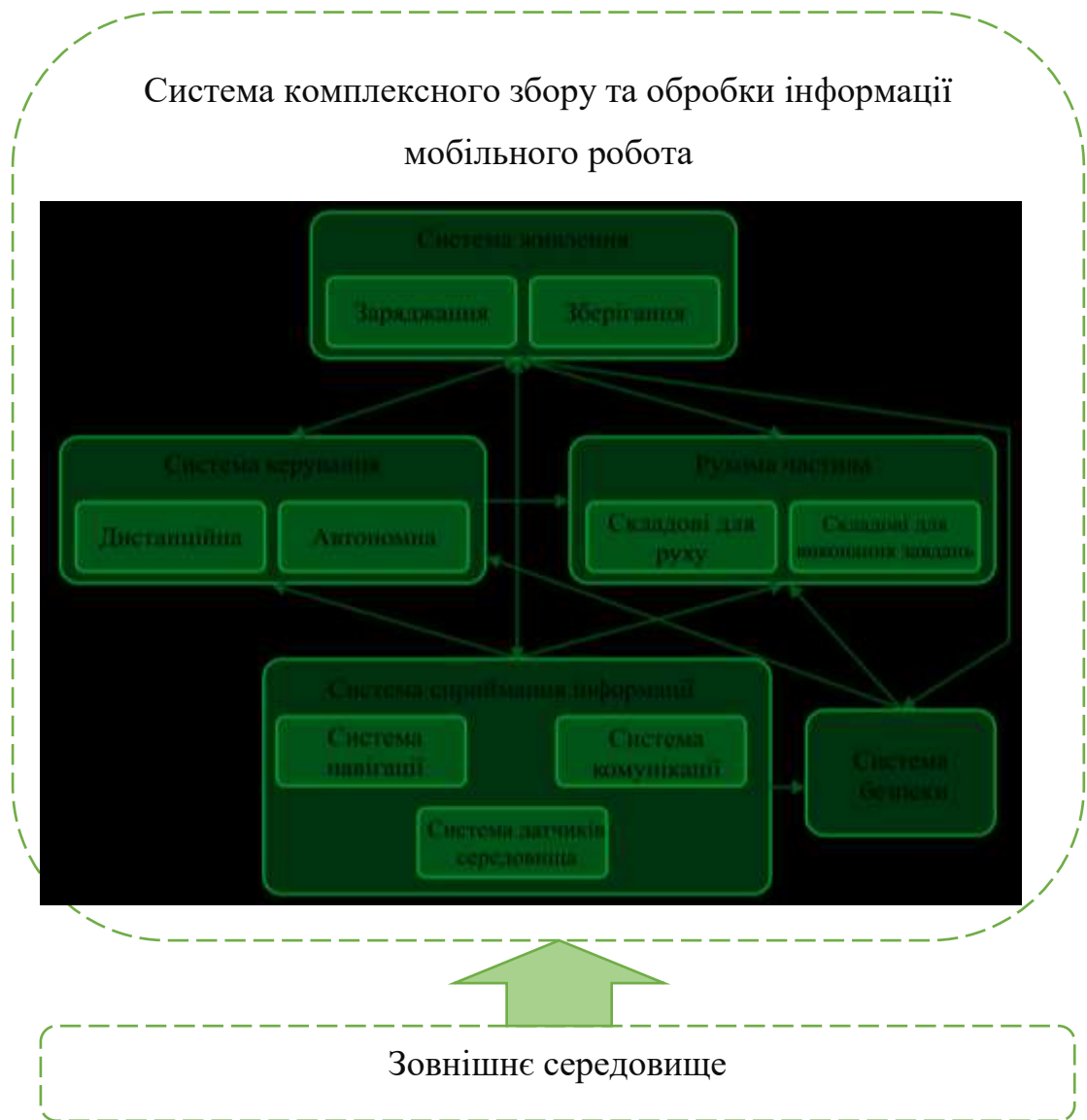


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи комплексного збору та обробки інформації

Система живлення забезпечує живлення мобільного робота енергією. В неї входять пристрої зарядження (різноманітні засоби та джерела живлення, такі, як сонячні батареї тощо.), за допомогою яких енергія потрапляє в накопичувальні та зберігальні елементи – акумулятори, батареї тощо. Система живлення впливає на всі інші системи, рівномірно розподіляючи між ними накопичену енергію. Проте, кожна з систем також має свій вплив на систему живлення, розряджаючи її.

Система керування включає в себе електроніку для дистанційного або автономного керування роботом. Дистанційне керування здійснюється оператором за допомогою пульта дистанційного керування або мобільного додатку. Проте треба загадати про систему автономної навігації для різного роду ситуацій: маневрування між перешкодами, забезпечення збору інформації про ландшафт в різних ситуаціях.

Рухома частина може складатися з частини, котра рухає самого робота (гусениці, колеса, механізми тощо). Ця система особливо важлива для виконання роботом його завдань, управління здійснюється - системою керування.

Система сприйняття інформації, котра має вплив на всі інші системи мобільного робота. Оскільки вона складається з систем навігації, комунікації та датчиків, котрі збирають інформацію з навколишнього середовища та від оператора й на основі зібраної інформації корегує роботу робота: створює план дії, рекомендований маршрут та інше.

Система безпеки робота, це – датчики температури, тиску, вологості, рівнів газу та радіації – все це сприймається, обробляється роботом та перевіряється на присутність небезпеки для робота. Таким чином, система безпеки здійснює контроль на виявлення внутрішніх неполадок робота.

Слід також зазначити, що великий вплив на робота має навколишнє середовище, інформація про яке збирається датчиками.

2.1.3 Узагальнена функціональна схема системи комплексного збору та обробки інформації

Функціональна схема системи комплексного збору та обробки інформації описує основні функції та дії, котрі виконуються роботом, а також їх зв'язки між собою. Дана схема продемонстрована на рис. 2.2 й надалі йде пояснення її елементів та взаємозв'язки між ними.

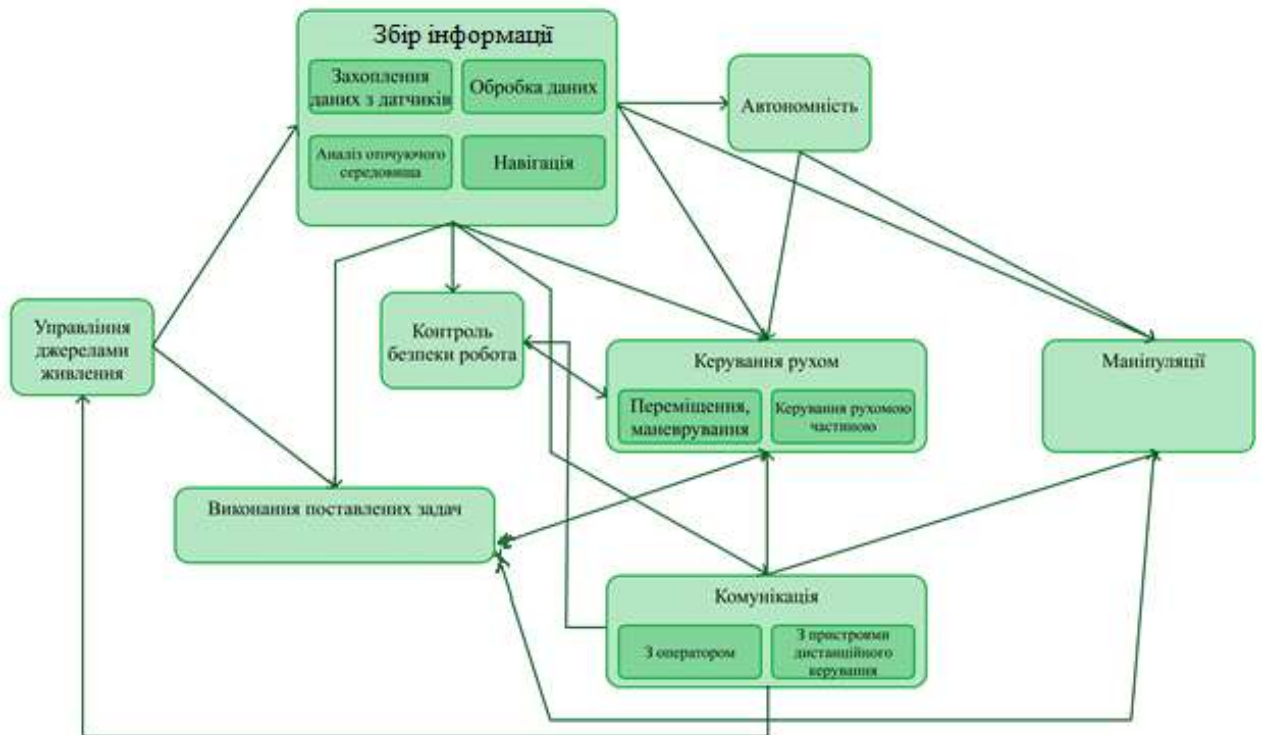


Рисунок 2.2 – Функціональна схема системи комплексного збору та обробки інформації

Функція збору інформації включає всі етапи обробки інформації: зчитування інформації з датчиків, котрі захоплюють дані про навколишнє середовище, подальша її обробка та аналіз, щоб розуміти загальну навколишню обстановку, виконувати навігацію й будувати наступні дії спираючись на проаналізовані данні. Цей функціональний блок впливає на продуктивність більшості інших функцій робота: на автономність, коли робот порівнює ситуацію із запрограмованими алгоритмами та самостійно приймає рішення; на керування рухом та здійснення маніпуляцій; на виконання поставлених задач; на комунікацію робота з оператором, щоб передавати йому отримані дані; на контроль безпеки робота, щоб мінімізувати вплив навколишнього середовища на цілісність робота.

Наступний блок – функція автономності, тобто здатності робота самостійно приймати рішення на основі встановлених алгоритмів та аналізу інформації з навколишнього середовища. Дана функція потрібна, щоб дещо

полегшити роботу оператора, доручивши виконання найпростіших маневрів (стабільне положення потерпілого, маневрування між перешкодами, рекомендації кращого маршруту та інше) на самого мобільного робота. Автономність впливає на здатність робота рухатися та виконувати маніпуляції незалежно від оператора в моменти, коли це можливо та дозволено.

Функція керування рухом складається з функції керування рухомою частиною та самої функції робота рухатися та виконувати маневри. На неї впливає функція збору інформації, особливо її складова навігації та побудови маршрутів (щоб робот мав розуміння куди саме він має та не має рухатися), функція автономності (запрограмовані рухи), функція комунікації, коли над роботом здійснює контроль оператор, змушуючи його рухатися в потрібному напрямку, а також функція безпеки робота, котра здатна активувати рух робота в небезпечній ситуації, щоб покинути її, або заблокувати рух, щоб врятувати робота від поломки.

Функція виконання маніпуляцій включає керування пристроями для взаємодії. Дана функція має залежність від тих функцій, від яких залежить функція керування рухом (окрім функції безпеки робота).

Функція комунікації здійснює зв'язок робота з оператором для керування та зв'язку з пристроями дистанційного керування для обміну інформації. Окрім вищезгаданих функція комунікації має вплив на контроль безпеки робота, коли оператор сам помітив поломку або небезпеку й хоче здійснити засоби збереження, а також на управління джерелами живлення, коли оператор перемикає постачання живлення від різних джерел, здійснює необхідну підзарядку або вимушене вимикання живлення для збереження цілісності робота.

Контроль безпеки робота здійснює перевірку всіх систем робота на наявність пошкоджень та несправностей. А також дана функція аналізує отриману інформацію з навколишнього середовища та від оператора, щоб запобігти майбутній можливій шкоді роботу. Із завданням забезпечити

безпеку робота, дана функція має вплив на керування рухом мобільного робота.

Функція управління джерелами живлення стежить за рівнем заряду батарей або інших джерел енергії, постачає енергію у відповідні системи, контролює постачання енергії, щоб максимально заощаджувати її, запобігає критичному розряджанню батарей, здійснює підзарядку від джерел живлення (сонячної батареї), коли це критично необхідно, надає рекомендації по часу підзарядки та інші функції. Має вплив на функцію інформаційного збагачення, підживлюючи датчики для збору інформації, а також на виконання роботом його основних функцій (оскільки, без достатньої кількості енергії, робот-рятувальник не зможе навіть рухатися).

Для повноцінної роботи системи комплексного збору та обробки інформації проведемо детальний аналіз систем технічного зору.

2.2 Аналітичний огляд існуючих систем СТЗ

Усі рішення, що базуються на системі технічного зору (СТЗ) [45], яка використовує принцип динамічної тріангуляції [46]. У [47] запропоновано метод покращення роздільної здатності 3D СТЗ та його реалізацію для поверхневого розпізнавання. Такий підхід до розпізнавання перешкод був реалізований для навігації одного робота в роботі [48]. Концепції передачі даних в рамках роботизованої групи вперше представлені в [49]

Подальший розвиток 3D СТЗ знайшов своє використання та розвиток у внутрішніх змінах та застосуванні як системи машинного зору для БПЛА.

Незважаючи на всі дослідження та результати, представлені в цьому розділі, все ще існує спільна проблема: усі вони присвячені одній проблемі одночасно. Тому представлено дослідження спрямоване на спільне вирішення проблем машинного зору, планування шляху та передачі даних за допомогою згаданої раніше 3D СТЗ.

Представлена система технічного зору в реальному часі (СТЗ) є інструментом для оптимізації розглянутої задачі покращення колективної поведінки робототехнічної групи. Переваги нашої системи, порівняно з іншими методами 2D/3D лазерних датчиків, полягають у наступних моментах:

- оригінальні СТЗ мають властивість природного фізичного фільтра [96], [2] надлишкової інформації про оточення робота, регулюючи кількість сканованих точок в межах FOV відповідно до вимог поточного практичного застосування.
- цей СТЗ у порівнянні з іншими методами 2D/3D лазерних датчиків має значно ширший кут зору [26], [23] завдяки оригінальній запатентованій ротаційній сенсорній частині. Ця обставина дозволяє двоє: краще одночасне захоплення переваг детальних даних про навколишнє [24], і більш широку можливість варіювати секторізацію сценарію між учасниками, оснащеними ідентичними СТЗ [49], [55].
- сучасний СТЗ, як показано в [106], природно представляє дані в тій самій декартовій системі координат, у якій працює робот, що усуває необхідність будь-якого часу на постобробку, і в тій же системі позначення, що й матриця стану робота, що спрощує будь-які додаткові трансформації в рамках сценарію.
- численні експериментальні результати [6-8] показують, що отримані дані сканування дуже підходять для застосування нейронних мереж у ректифікації сканованої поверхні, і після цього є значно кращими, ніж будь-яка реконструкція поверхні за допомогою систем стереозору.
- зручність роботи в даному випадку враховується частотою роботи. Відповідно до [9] наш СТЗ має функцію змінного кроку сканування, що дозволяє на різних етапах ройової місії регулювати швидкість/точність до поточного завдання; або навіть забезпечують змінну швидкість сканування на основі розширених алгоритмів керування двигуном

постійного струму позиціонера лазерного променя, детально представлених у [10] і [11].

2.3 Аналіз системи вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі

На рис. 2.3 зображена структурна схема системи вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі.

Система вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі містить (рис. 2.3) у блоку лазерного позиціонувача: послідовно з'єднані випромінювач когерентного світла – 1 і систему дзеркал, яка містить перше дзеркало зі зрізом 45° - 2 та друге дзеркало зі зрізом 45° - 3, систему обертання ЛП, яка містить двигун - 5 та систему передачі – 4, в скануючій апертурі містить послідовно з'єднані: систему обертання СА – 11, дзеркало – 10, систему лінз – 8, фільтр – 7, фотодетектор – 6, а також датчик нуля – 9, вхід якого з'єднано з дзеркалом 10 зі зрізом 45° , яке з'єднано з виходом системи обертання СА – 11, а також систему обробки та керування - 12, яка згідно отриманих сигналів з датчика нуля 9 та фотодетектора 6 узгоджує рух ЛП, СА, а також яка під'єднана до блоків ЛП і СА, крім того, один вхід якої з'єднаний з виходом датчика нуля 9, а другий – з виходом детектора 6, третій вихід системи обробки керування подає на вхід сигнал початку роботи та блоку який забезпечує можливість пересування пристрою в різних напрямках в горизонтальній площині, що складається з платформи для пересування пересування – 13, якою керує оператор – 15 за допомогою пристрою управління платформою – 14, платформа пересувається на колесах.

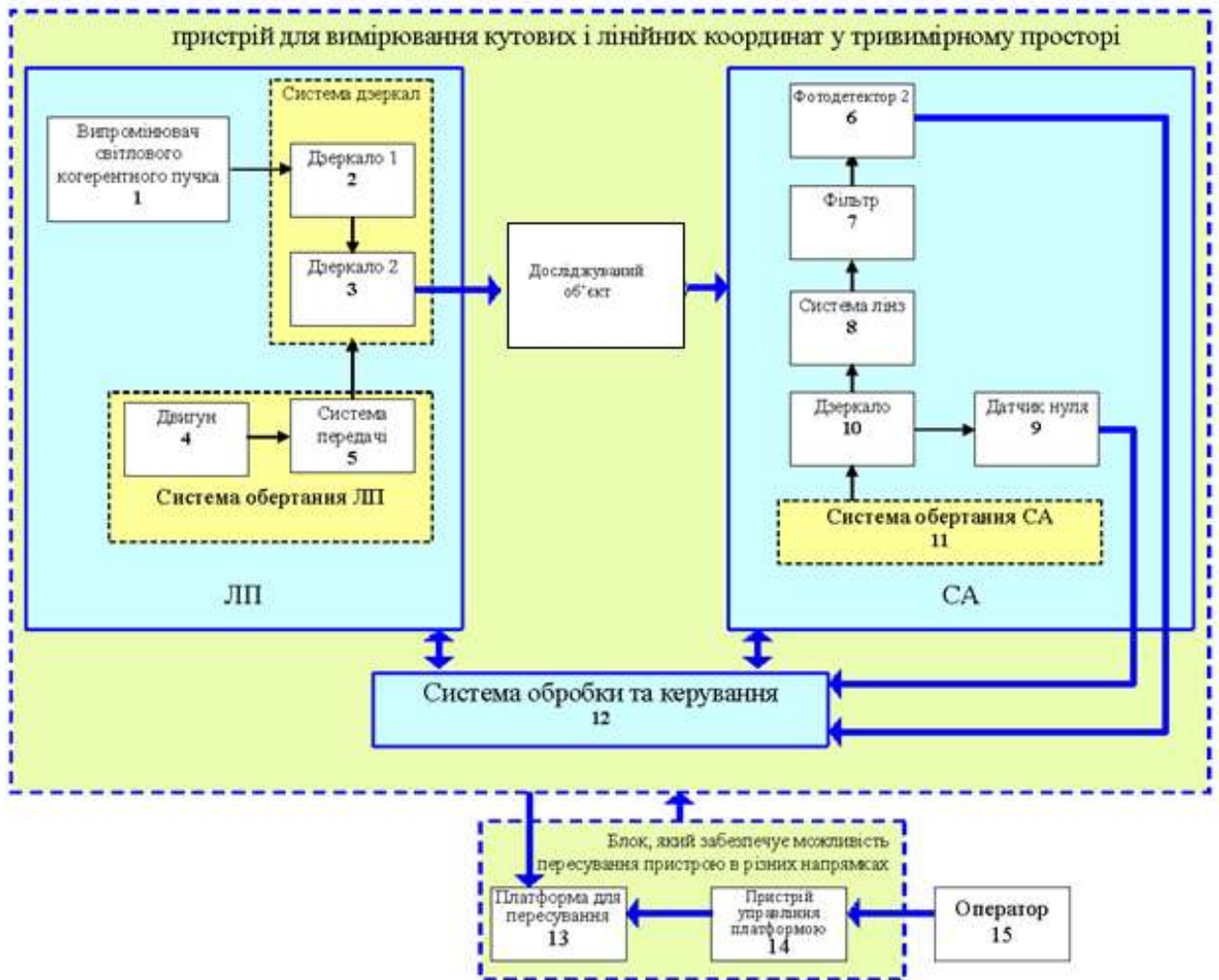


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі

Система вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі працює наступним чином. В блоці лазерного позиціонувача (ЛП) промінь з випромінювача когерентного світла попадає на систему дзеркал, що містить дзеркало 1 зі зрізом 45° та дзеркало 2 теж зі зрізом 45° , яке за допомогою системи обертання лазерного позиціонувача обертається навколо своєї вісі, система обертання містить двигун 4 та систему передач 5, які пересилають світло до поверхні яка цікавить, промінь відбитого від сканованої поверхні світла попадає на скануючу апертуру, що містить дзеркало скануючої апертури (СА), зі зрізом 45° , яке за допомогою системи обертання СА 11 обертається навколо своєї вісі, коли дзеркало скануючої апертури - СА

починає обертатися та датчик нуля 9 генерує електричний імпульс, що вказує на початок виміру кута, після цього знаходить відбиття когерентного променя світла, який проходить через систему лінз і спрямовується на фільтр 7, що пропускає лише вибраний спектр світла, який реєструє фотодетектор 6, що вказує на кінець виміру кута, сигнали з датчика нуля 9 та фотодетектора 6 надходять в систему обробки та керування 12, яка згідно отриманих сигналів керує та узгоджує роботу лазерного позиціонувача ЛП та скануючої апертури СА і виконує необхідні для цього математичні обчислення. Ця система слідкує за появою сигналу відбиття лазерного променя від сканування в горизонтальному напрямку поверхні досліджуваного об'єкту, при появі такого сигналу запускає два паралельних процеси – перевід позиціонувача у наступний крок сканування та запуск алгоритму обчислювання поточної координати, слідкує за рівнем перешкод в оптичному каналі, та, при необхідності, може змінювати узгоджену частоту позиціонування і сканування водночас, при виході динамічного трикутника за межі сектору обзору відключає живлення лазера та закриває оптичний канал апертури. Система розташована на блоці, який забезпечує можливість пересування пристрою в різних напрямках, що складається з платформи пересування – 13 на колесах, якою керує оператор – 15 за допомогою пристрою управління платформою 14. Включають обидва елементи динамічного трикутника при проходженні заданого сектору обзору та їх виключають у інші моменти повного циклу обертання.

Динамічна триангуляція ([12], [13]) складається з визначення миттєво виділених лазером координат точки на основі двох визначених кутів B_{ij} і C_{ij} і фіксованої відстані між проектором і приймачем. Тут ij означає кількість кроків горизонтального та вертикального сканування послідовно. У такому трикутнику (рис. 2.4), якщо відомі три параметри, це дає можливість обчислити всі інші. Кут B_{ij} розраховується як просте співвідношення двох кодів лічильників: кількості тактових імпульсів між двома вихідними

імпульсами та в інтервалі «домашній імпульс – точковий імпульс» (рис. 2.2с) (рівняння 2.1).

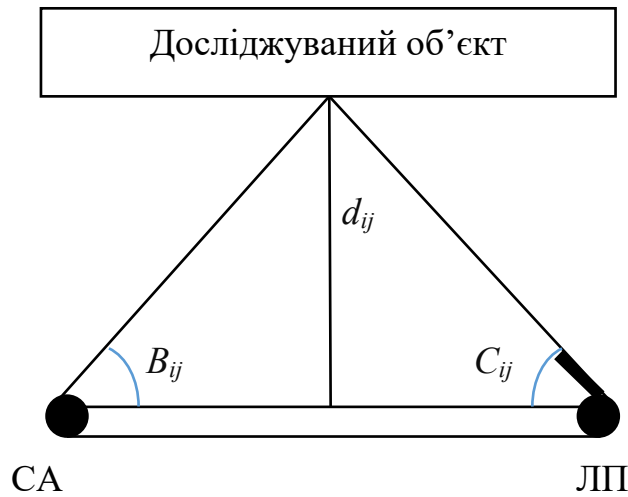


Рисунок 2.4 – Система технічного зору

$$B_{ij} = \frac{2\pi N_A}{N_{2\pi}}, \quad (2.1)$$

$N_{2\pi}$ – кількість еталонних імпульсів, коли дзеркало на 45° повертається на 360° , виявлене нульовим датчиком. Для обчислення координат x , y і z використовуються наступні рівняння (2.2-2.5):

$$x_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (2.2)$$

$$y_{ij} = a \left(\frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \text{ at } B_{ij} \leq 90^\circ, \quad (2.3)$$

$$y_{ij} = a \left(\frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \text{ at } B_{ij} \leq 90^\circ, \quad (2.4)$$

$$z_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}. \quad (2.5)$$

2.4 Вирішення задачі покращення розпізнавання поверхні

Алгоритм Левенберга-Марквардта призначений для оптимізації параметрів нелінійних регресійних моделей. Передбачається, що середньоквадратична помилка (RMS) моделі використовується як критерій оптимізації на навчальному наборі. Алгоритм складається з заданих початкових значень параметрів послідовного наближення до бажаного локального оптимуму.

Надається регресійна вибірка – багато пар $D = \{(x_n, y_n)\}_{n=1}^N$ вільної змінної $x \in R^M$ і залежної змінної $y \in R$. Набір моделі регресії – функція $f(w, x_n)$, безперервно диференційована в полі $W \times X$.

Потрібно знайти значення вектора параметрів w , яке б забезпечувало локальний мінімум функції помилки

$$E_D = \sum_{n=1}^N (y_n - f(w, x_n))^2. \quad (2.6)$$

Перед запуском алгоритму встановлюється вектор початкового параметра. На кожному кроці ітерації цей вектор замінюється на вектор $w + \Delta w$. Для оцінки приросту Δw використовується лінійна апроксимація функції

$$f(w + \Delta w, x) - f(w, x) \approx J \Delta w, \quad (2.7)$$

де J — функції Якобі $f(w, x_n)$ у точці w . Матриця J має розміри $N \times R$ і може бути візуалізована як

$$J = \begin{matrix} \frac{\partial f(w, x_1)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w, x_1)}{\partial w_R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(w, x_N)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w, x_N)}{\partial w_R} \end{matrix}, \quad (2.8)$$

тут $w = [w_1, \dots, w_R]^T$ — вектор параметрів.

Збільште Δw в точці w , доставляючи мінімум E_D дорівнює нулю. Отже, щоб знайти подальше значення приросту Δw , прирівнявши до нуля вектор часткових похідних E_D за w . для цього рівняння 2.6 представлено у формі

$$E_D = \|y - f(w + \Delta w)\|^2, \quad (2.9)$$

де $y = [y_1, \dots, y_N]^T$ і $f(w + \Delta w) = [f(w + \Delta w, x_1), \dots, f(w + \Delta w, x_N)]^T$.

Перетворення цього виразу

$$\|y - f(w + \Delta w)\|^2 = (y - f(w + \Delta w))^T (y - f(w + \Delta w)) = f^T(w + \Delta w) f(w + \Delta w) - 2y^T f(w + \Delta w) + y^T y,$$

і диференціювання, буде отримано

$$\frac{\partial E_D}{\partial w} = (J^T J) \Delta w - J^T y - f(w) = 0. \quad (2.10)$$

Отже, для знаходження значення Δw необхідно розв'язати систему лінійних рівнянь

$$\Delta w = (J^T J + I\lambda)^{-1} J^T (y - f(w)), \quad (2.11)$$

де I — одинична матриця. Цей параметр призначається на кожній ітерації алгоритму. Якщо значення помилки ED зменшується швидше, ніж невелике значення λ , цей алгоритм зводиться до алгоритму Гауса-Ньютона.

Алгоритм зупиняється, якщо приріст Δw у наступній ітерації менший за задане значення, або якщо параметри w видають помилку ED , меншу за вказане значення. Значення вектора w на останній ітерації вважається бажаним.

Недоліком алгоритму є значне збільшення параметра λ при поганій швидкості апроксимації. У цьому випадку інверсія матриці $J^T J + \lambda I$ втрачає сенс. Цей недолік можна усунути за допомогою матричної діагоналі $J^T J$ як регуляризуючого члена:

$$\Delta w = (J^T J + \lambda \text{diag}(J^T J))^{-1} J^T (y - f(w)). \quad (2.12)$$

Відповідно до специфіки запропонованого СТЗ повертає відскановану поверхню у вигляді хмари точок (рис. 2.3). на коротких відстанях він дає високу деталізацію об'єкта, тоді як на відстані він втрачає роздільну здатність залежно від кута відкриття кожного кроку сканування. Оскільки СТЗ використовує крокові двигуни, на коротких відстанях він дає об'єкти з високою деталізацією (рис. 2.3с містить 10663 точки), тоді як на більших відстанях він втрачає роздільну здатність залежно від кута відкриття кожного кроку сканування (рис. 2.3b (3206) точкова) розгортка «піраміди майя», з боків щільність хмари точок менша, ніж у частини хмари зі сходами).

У пам'яті робота кожна точка, отримана СТЗ, представлена трьома змінними – x , y , z декартової системи координат. Кожен з них зберігається з використанням подвійного типу даних, що дорівнює 64 бітам на число, тому для зберігання однієї точки середовища використовується 192 біти пам'яті. Використовуючи нескладні розрахунки, можна сказати, що для зберігання в пам'яті «Об'єкта А» (рис. 2.5а) використовується 493 632 біта (60,3 кБ), «Об'єкта В» (рис. 2.5б) – 75,14 кБ і «Об'єкта С» » (рис. 2.5с) – 249,9кВ.

Однак робот повинен рухатися і досліджувати розміри середовища, які можуть бути безмежними. Таким чином, дані, які потрібно обробити, можуть досягати гігабайт і більше для одного автономного автомобіля, але для RG їх

потрібно помножити на кількість осіб. Це головна причина, чому необхідно зменшити кількість збережених точок у пам'яті до мінімуму, необхідного для уникнення перешкод і розрахунку мертвої точки (сканування з низькою щільністю), а також детального сканування об'єктів (сканування з високою щільністю) для використання на - попит.

Під час руху та картографування середовища дані, які потрібно обробити, можуть досягати гігабайтів. Для навігаційних роботів потрібна мінімальна кількість балів, щоб описати об'єкт. Тому необхідно впроваджувати метод сканування низької щільності для мертвої розрахунку та використовувати сканування високої щільності на вимогу.

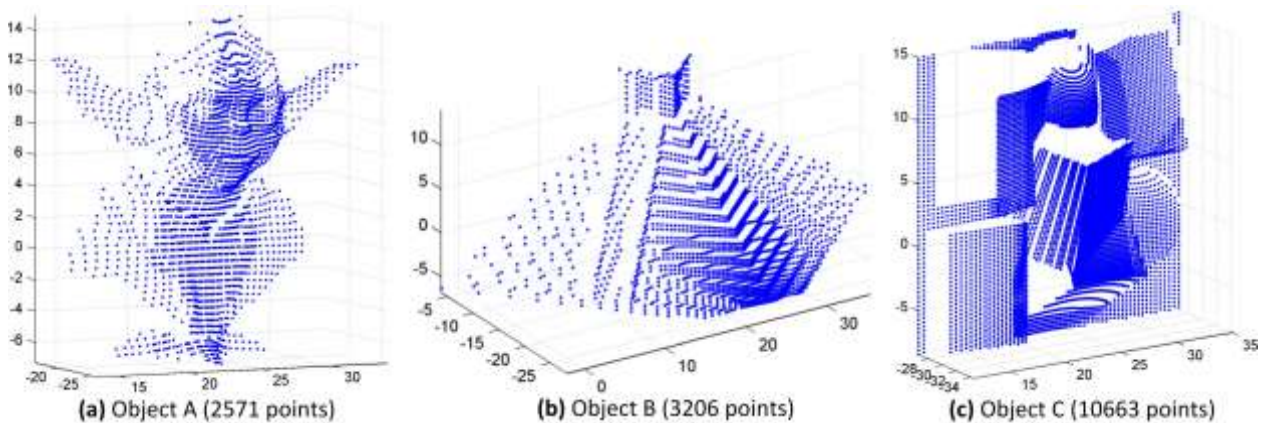


Рисунок 2.5 - Приклади поверхонь, сканованих СТЗ

У попередній роботі [12] було описано метод редукції даних у реальному часі під час руху роботів. Відповідно до виділених зон точності (рис. 2.6) було визначено кут розкриття [9], еквівалентний точкам збереження на виявлених перешкодах.

В якості початкової точки буде використано дугу в один метр відповідно до можливого 160° FOV СТЗ. Використовуючи дані дослідження та тип роботів, описаних у роботі [48], щільність точки помутніння (ρ) зображення становить 11 точок на метр.

$$\rho = \frac{\lambda}{\beta p}, \quad (2.13)$$

де λ – кут огляду, β – еквівалент кута розкриття ($14,5636^\circ$ для початкових розрахунків), ρ – довжина дуги (один метр для початкових розрахунків).
Загалом довжину дуги можна обчислити так:

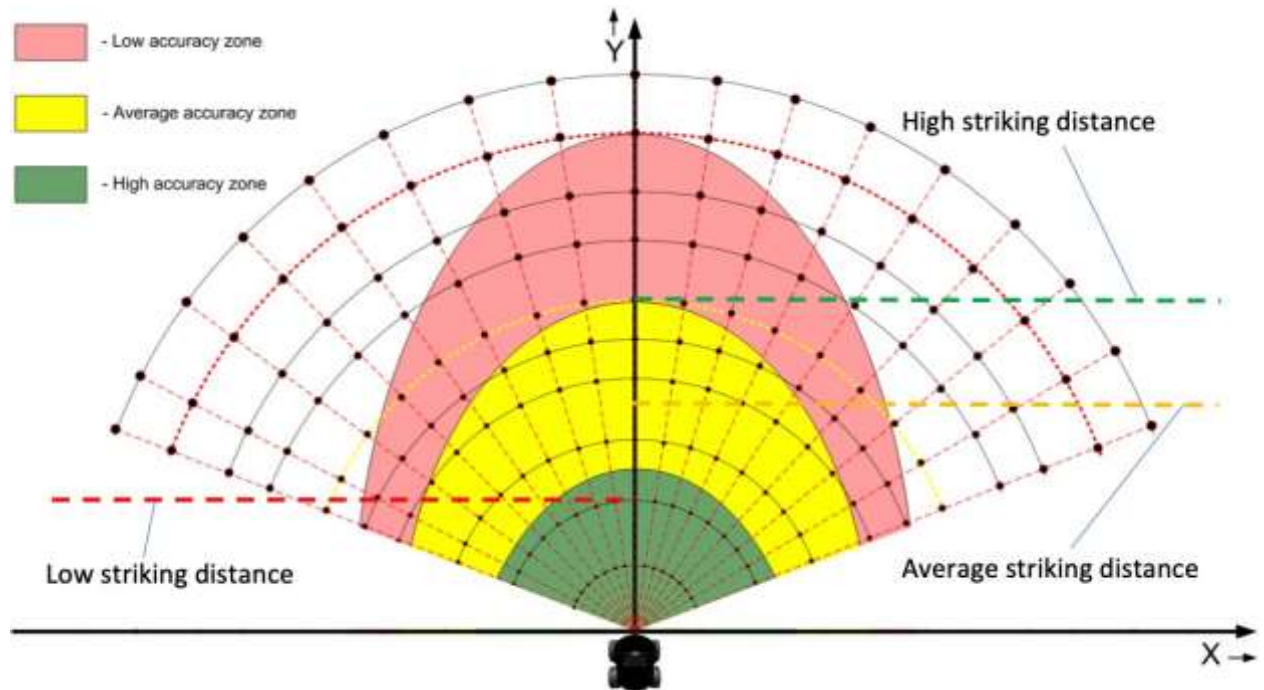


Рисунок 2.6 Фрагментація поля зору

$$\rho = \frac{\pi r \lambda}{180^\circ}, \quad (2.14)$$

де r - радіус дуги (вражаюча відстань). Щоб запобігти змінам у вибраній роздільній здатності, кут розкриття буде розраховано за допомогою рівняння. 2.15:

$$\beta = \frac{180^\circ}{\rho \pi r}, \quad (2.15)$$

Середній кут відкриття для кожної зони вражаючої відстані:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=0}^n \beta_{ij}}{n}, \quad (2.16)$$

де β_i – кут відкриття для кожної зони точності, β_{ij} – кут відкриття для кожної відстані удару в зоні i . Приклад розрахунку представлено на рис. 2.7. Тут ми маємо радіус дуги в один метр, що дорівнює 0,358 м з роздільною здатністю 11 точок на метр.

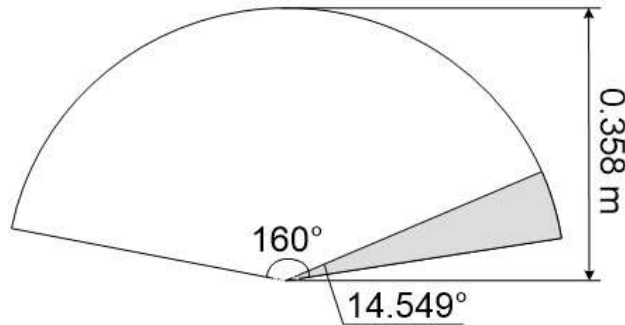


Рисунок 2.7 - Поле огляду з кутом розкриття для низької роздільної здатності на один метр довжини дуги

Зони точності розділені таким чином: від 0 до 1 метра, від 1 до 3 метрів і від 3 до 5 метрів для зон високої, середньої та низької точності відповідно. З урахуванням такого поділу зон результати розрахунку представлені в таблиці рис. 2.8.

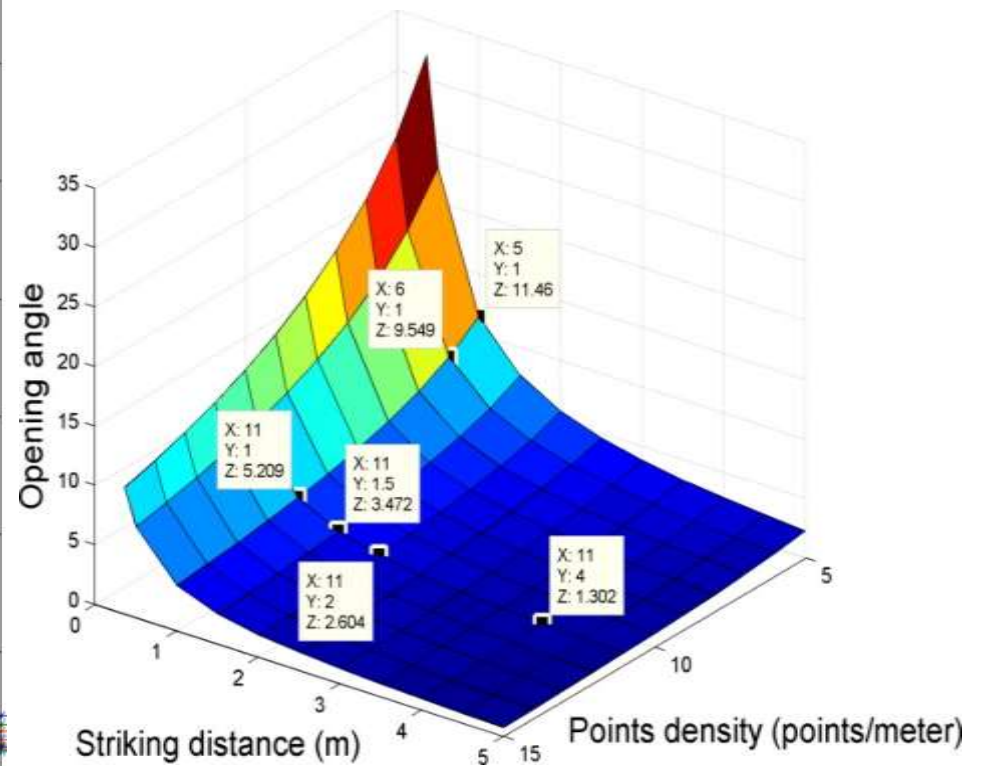
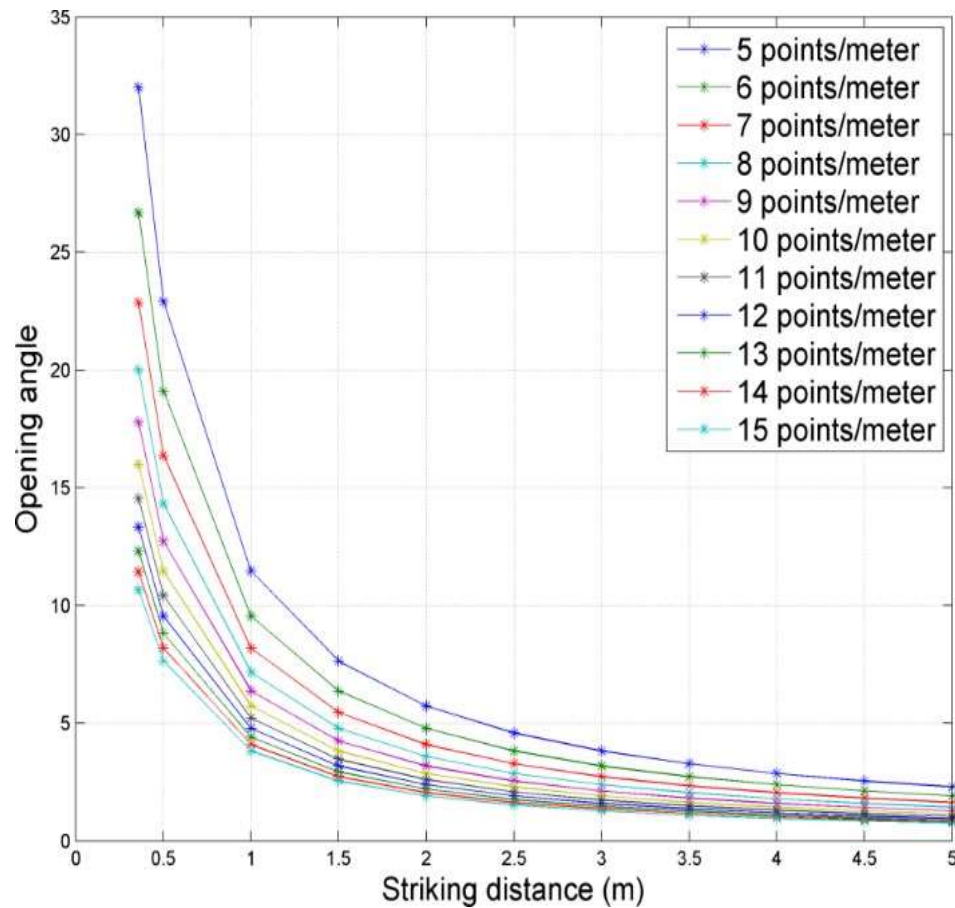
			Resolution (points/m)											
			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
		Striking distance	Length of arc	Opening angle (deg.)										
Striking distance range	High	0.358	1,000	32,009	26,674	22,863	20,006	17,783	16,004	14,549	13,337	12,311	11,432	10,670
		0.500	1,396	22,918	19,099	16,370	14,324	12,732	11,459	10,417	9,549	8,815	8,185	7,639
		1,000	2,793	11,459	9,549	8,185	7,162	6,366	5,730	5,209	4,775	4,407	4,093	3,820
	Average	1,500	4,189	7,639	6,366	5,457	4,775	4,244	3,820	3,472	3,183	2,938	2,728	2,546
		2,000	5,585	5,730	4,775	4,093	3,581	3,183	2,865	2,604	2,387	2,204	2,046	1,910
		2,500	6,981	4,584	3,820	3,274	2,865	2,546	2,292	2,083	1,910	1,763	1,637	1,528
		3,000	8,378	3,820	3,183	2,728	2,387	2,122	1,910	1,736	1,592	1,469	1,364	1,273
	Low	3,500	9,774	3,274	2,728	2,339	2,046	1,819	1,637	1,488	1,364	1,259	1,169	1,091
		4,000	11,170	2,865	2,387	2,046	1,790	1,592	1,432	1,302	1,194	1,102	1,023	0,955
		4,500	12,566	2,546	2,122	1,819	1,592	1,415	1,273	1,157	1,061	0,979	0,909	0,849
		5,000	13,963	2,292	1,910	1,637	1,432	1,273	1,146	1,042	0,955	0,881	0,819	0,764
Average opening angle for width	High		22,129	18,441	15,806	13,831	12,294	11,064	10,058	9,220	8,511	7,903	7,376	
	Average		5,443	4,536	3,888	3,402	3,024	2,722	2,474	2,268	2,094	1,944	1,814	
	Low		2,744	2,287	1,960	1,715	1,525	1,372	1,247	1,206	1,181	1,096	1,091	

Рисунок 2.8 - Порівняння кутів розкриття

На рис. 2.9(a) показано загальне співвідношення між кутами розкриття та відстанями враження для розглянутої щільності точок. Рис. 2.9(b) представляє те саме, але також з урахуванням щільності хмари точок. З використанням визначених зон точності рис. 2.10 демонструє середні значення такого співвідношення.

Відповідно до розрахунку середні кути на основі початкової щільності хмари точок (11 точок/метр) становлять $10,059^\circ$ для «зони високої точності», $3,011^\circ$ для «зони середньої точності» та $1,34^\circ$ для «зони низької точності». Середній кут для діапазону «Зона високої точності» дасть невелику роздільну здатність, рівну 5-6 точкам на метр. Тому було взято нижнє крайове значення кута розкриття для «Зони високої точності». Набір кутів змінено на $5,209^\circ$, $3,011^\circ$, $1,34^\circ$.

Ідентифікація отриманої точки на поверхні перешкоди, що належить певній зоні точності, спрощується до розв'язку точки, що належить еліпсу в декартовій системі координат.



(a) Залежності кута розкриття та дистанції вражання (b) Залежності кута розкриття, дистанції вражання та щільності хмари точок

Рисунок 2.9 - Еквіваленти кута розкриття

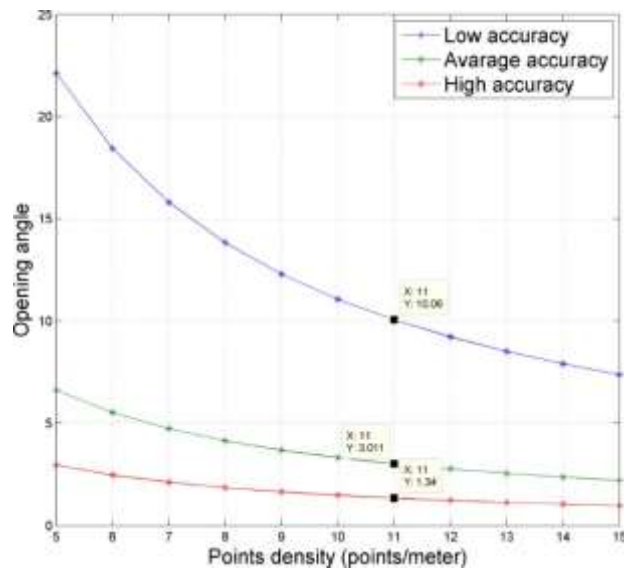


Рисунок 2.10 - Середні значення щільності хмари точок

Використовуючи розширену алгебру алгоритмів, це можна записати у вигляді наступного виразу:

RESOLUTION=<INPUT(striking_distance)*[zone_state]

(dcn v don v den)*RULES>

RULES={ [critical](RESOLUTION_LOW) *

*[optimal](RESOLUTION_MEDIUM) *

*[effective](RESOLUTION_HIGH)}

2.5 Висновки до розділу

Таким чином, в цьому розділі було розроблено структурну та функціональну схеми системи комплексного збору та обробки інформації, проведено аналітичний огляд існуючих систем СТЗ, вході аналізу було обрано метод динамічної триангуляції, на його базі розглянуто структуру та принципи роботи системи вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі.

Показано загальне співвідношення між кутами розкриття та відстанями враження для розглянутої щільності точок також з урахуванням щільності хмари точок. З використанням визначених зон точності отримані залежності, які демонструють середні значення такого співвідношення.

Відповідно до розрахунку середні кути на основі початкової щільності хмари точок (11 точок/метр) становлять $10,059^\circ$ для «зони високої точності», $3,011^\circ$ для «зони середньої точності» та $1,34^\circ$ для «зони низької точності». Середній кут для діапазону «Зона високої точності» дасть невелику роздільну здатність, рівну 5-6 точкам на метр. Тому було взято нижнє крайове значення кута розкриття для «Зони високої точності». Набір кутів змінено на $5,209^\circ$, $3,011^\circ$, $1,34^\circ$.

Ідентифікація отриманої точки на поверхні перешкоди, що належить певній зоні точності, спрощується до розв'язку точки, що належить еліпсу в декартовій системі координат.

3 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОМПЛЕКСНОГО ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ШЛЯХУ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Найпоширеніший спосіб визначення проблеми планування шляху (планування руху) полягає в тому, що агенту необхідно рухатися від початкової позиції до мети, уникаючи перешкод і досягаючи мінімізації витрат. Визначення вартості пошуку оптимального шляху змінюється залежно від критеріїв системи, в одних системах це час, в інших відстань, енергія тощо. Але оскільки найбільш загальний підхід полягає в мінімізації відстані (найкоротшого шляху) між початком і гольові очки. Однак у деяких ситуаціях визначення оптимальності змінюється. Як приклад? для робота має значення час, витрачений на обчислення (кількість ітерацій і складність). Отже, коли обчислення шляху займає надто багато часу, важче досягти безперервності завдання. Така причина змушує вибрати найбільш підходящий алгоритм на основі бажаного критерію оптимальності. У деяких випадках краще використовувати більш складні критерії – комбінувати критерії. Тому планування руху є одним із ключових завдань у робототехніці.

Під час завдання навігації можна виділити три основні гілки:

1. Завдання «Планування шляху», коли роботам надається цільова точка та/або точки інтересу, а карта навколишньої території перетворюється на режим чотиридерев за допомогою трансформації відстані відповідно до бажаної роздільної здатності. Після цього обчислюється шлях від початкової позиції через цікаві точки до мети.
2. Виконання шляху – це завдання, під час якого робот починає рухатися від початкової позиції до мети, використовуючи шлях, розрахований під час планування шляху.

3. Оновлення моделі запускається, коли робот виявляє будь-яку перешкоду в полі зору (FOV), а потім оновлює модель квадродерева оточення.

У математиці існують добре розроблені алгоритми знаходження шляху в невідомому або частково відомому середовищі (оптимальний і евристичний алгоритми). Для цього зазвичай використовують дискретну математику (теорію графів) і лінійне програмування. Задачі пошуку найкоротшого шляху в графі відомі та досліджені (наприклад, алгоритми Дейкстри, Флойда-Воршелла, Пріма, Крускала тощо [18] і [58]). Алгоритми можна розділити на дві категорії:

1. Класичний [19] [20] (Дейкстри, Флойда-Воршелла, Пріма, Крускала, алгоритми тощо).
2. Евристичний [21] [22] (алгоритм A*, мурашиний алгоритм, генетичний алгоритм тощо).

Існує багато видів досліджень в рамках планування шляху. Наприклад [16], де автори представили підхід, який використовує примітивні бібліотеки руху. У [23], що представляє спробу реалізувати рух тварин для поведінки робота, або [2] запропоновано алгоритм траєкторії без зіткнень для роботів.

У цьому розділі будуть розглянуті основні аспекти планування шляху, що використовуються в дослідженні відповідно до специфіки використовуваної системи технічного зору, середовища та завдань.

3.1 Аналіз алгоритмів знаходження шляху

Аналіз літератури показав, що на даний час є добре розроблені математичні алгоритми (рис. 3.1) для знаходження шляху в невідомому або частково відомому середовищі (оптимальний і евристичний алгоритми). Для цього зазвичай використовують дискретну математику (теорію графів) і лінійне програмування. Задачі пошуку найкоротшого шляху в графі відомі та

досліджені (наприклад, алгоритми Дейкстри, Флойда-Воршелла [24], Прима [25], Крускала [26] тощо).

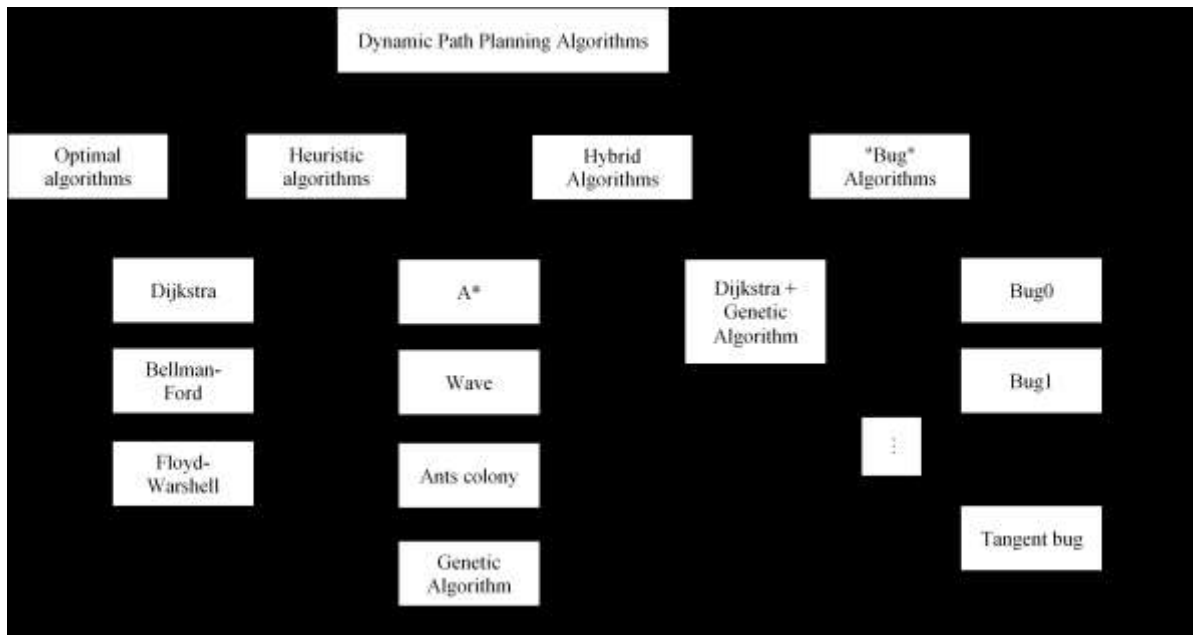


Рисунок 3.1 - Алгоритм динамічного планування шляху

Алгоритм Дейкстри [27] — це алгоритм пошуку найкоротших шляхів між вузлами в графі, який може представляти, наприклад, дорожні мережі. Він був задуманий комп'ютерним науковцем Едсгером В. Дейкстрою в 1956 році та опублікований через три роки. Алгоритм існує в багатьох варіантах. Оригінальний алгоритм Дейкстри знайшов найкоротший шлях між двома даними вузлами, але більш поширений варіант фіксує один вузол як «вихідний» вузол і знаходить найкоротші шляхи від джерела до всіх інших вузлів у графі, створюючи дерево найкоротших шляхів.

Флойд-Варшалл [24] в інформатиці — це алгоритм для знаходження найкоротших шляхів у зваженому графі з додатними або від'ємними вагами ребер (але без від'ємних циклів). Одне виконання алгоритму знайде довжини (сумовані ваги) найкоротших шляхів між усіма парами вершин. Хоча він не повертає деталей самих шляхів, можна реконструювати шляхи за допомогою простих змін до алгоритму. Версії алгоритму також можна використовувати для знаходження транзитивного замикання відношення R або (у зв'язку з

системою голосування Шульце) найширших шляхів між усіма парами вершин у зваженому графі.

A* або A-star або A* search [28] є одним із добре відомих і базових евристичних алгоритмів. Це комбінація алгоритму Дейкстри. Алгоритм намагається мінімізувати функцію, сформульовану як $f(n) = g(n) + h(n)$, евристично враховуючи зв'язок між вузлами та ребрами. $g(n)$ відноситься до вартості початкової точки або вузла, а $h(n)$ передбачає евристичну оцінку вартості, пов'язану з залишком шляху. $h(n)$ таким чином складають евристичну основу алгоритму [29].

Генетичний алгоритм (GA) [30] є іншим популярним евристичним підходом. Цей метод імітує еволюційний процес і намагається отримати найкращих особин (хромосому), які представляють оптимальний шлях для цього типу проблеми з огляду на визначену цільову функцію. Стратегія кросинговеру застосовується до батьків з метою створення нових особин. На додаток до цього, процес мутації, який перешкоджає сходженню алгоритму на локальних мінімумах, є однією з ключових частин, так що різноманітність простору рішень завжди зберігається. GA та подібні евристичні методи є альтернативним способом вирішення задачі оптимального шляху, і вони часто використовуються.

Швидке дослідження випадкового дерева (RRT) — ще один ймовірнісний алгоритм, вдосконалений Лаваллем і Куффнером [31], [32]. Він спрямований на вирішення задач планування траєкторії, які мають неголономні обмеження. Алгоритм, як правило, дає ефективні результати в неопуклих і багатовимірних просторах. Дерево, яке передбачає простір рішень, будується поступово, і в усій схемі використовуються дві різні функції, тобто створення та розширення дерева. Розширення дерева є одностороннім, тобто від початку до кінцевої точки. З іншого боку, ідея двостороннього розширення дерева покращує часову ефективність усього рішення. Ця техніка називається двонаправленим RRT (bRRT або B-RRT), і дерево встановлюється як у початковій, так і в цільовій точках, а потім

розширюється до частин, які не шукаються. Процес пошуку припиняється, коли знайдено точку з'єднання цих двох дерев і цей шлях, який є виходом алгоритму, є оптимальним маршрутом [33].

Ймовірнісна дорожня карта (PRM) — це один із ймовірнісних алгоритмів планування останнього шляху, який використовується в цьому дослідженні. Оптимальний шлях визначається обчисленням відстані між ребрами, які є зв'язками між випадково створеними вузлами на карті. Перш за все, вузли генеруються шляхом вибірки з точок без перешкод на карті, а потім ці вузли зв'язуються один з одним, і, нарешті, оцінюється вартість шляху. Стратегія швидкого випадкового кластера може забезпечити швидші результати, ніж інші алгоритми, але не гарантує найкоротший шлях [34].

Сімейство алгоритмів помилок вирішує проблему навігації, зберігаючи лише мінімальну кількість маршрутних точок, але не створюючи повної карти навколишнього середовища. Якщо шлях вирішення не існує, алгоритм здатний розпізнати цю ситуацію та припиняє повідомляти про те, що ціль недосяжна, замість того, щоб нескінченно блукати.

Модель Bug робить три спрощуючих припущення щодо роботи [35]. По-перше, робот є точковим об'єктом. По-друге, робот має ідеальну здатність до локалізації. По-третє, у робота ідеальні датчики. Ці три припущення нереалістичні для реальних роботів, і тому алгоритми помилок зазвичай не застосовуються безпосередньо для практичних навігаційних завдань, але можуть розглядатися як контрольний компонент вищого рівня системи, яка включає всі три припущення. Алгоритми помилок можна розглядати як перший логічний крок до вирішення роботизованої двовимірної навігаційної задачі

Було реалізовано та оцінено наступні алгоритми із сімейства помилок: Bug1[35], Bug2[35], Alg1[36], Alg2[37], DistBug[38], Class1[39], Rev1[40], Rev2[40] і TangentBug[41].

3.2 Аналіз навігаційних алгоритмів

Аналіз, заснований на результатах у [49], представлений у вигляді графіків (у випадку пошуку «від одного до всіх» на рис. 3.2 та «всіх до всіх» на рис. 3.3) було представлено кількість часу (у мілісекундах), необхідного для знайти найкоротший шлях у випадку від 100 до 2500 вузлів для кожного з алгоритмів.

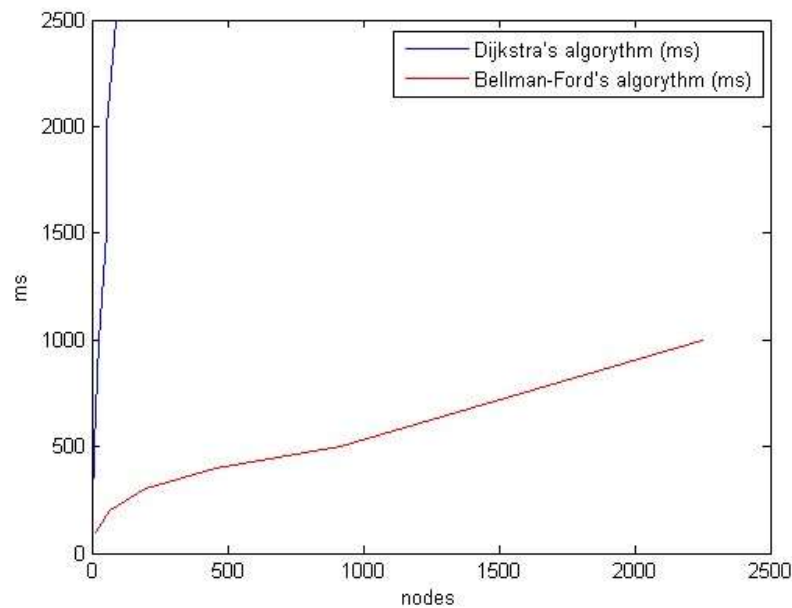


Рисунок 3.2 - Результати пошуку «один до всіх»

Різниця в продуктивності алгоритмів Дейкстри і Флойда-Воршелла при пошуку «від усіх до всіх» незначна, доки ми не маємо менше 500 вузлів, але результуюча матриця маршрутизації має інші параметри (довжина маршруту однакова, але ребра, які використовуються для його проходження, різні). Алгоритм Беллмана-Форда неприйнятний для використання в задачі з великою кількістю вузлів через великий час обчислення.

3.3 Навігація за допомогою системи технічного зору

Завдання планування шляху можна представити так:

- робот розгортається в невідомому середовищі;
- його поточне положення, позначене як початкова точка, а цільове розташування – як кінцева;
- робот розраховує евристичний маршрут і починає рух до цілі;
- у разі виявлення перешкод системою зору, робот оновлює свою навігаційну карту та перераховує маршрут;
- процеси виявлення перешкод і оновлення траєкторії тривають до досягнення мети.

Крім того, отриманий шлях необхідно апроксимувати для отримання безперервної та енергозберігаючої траєкторії (рис. 3.3).

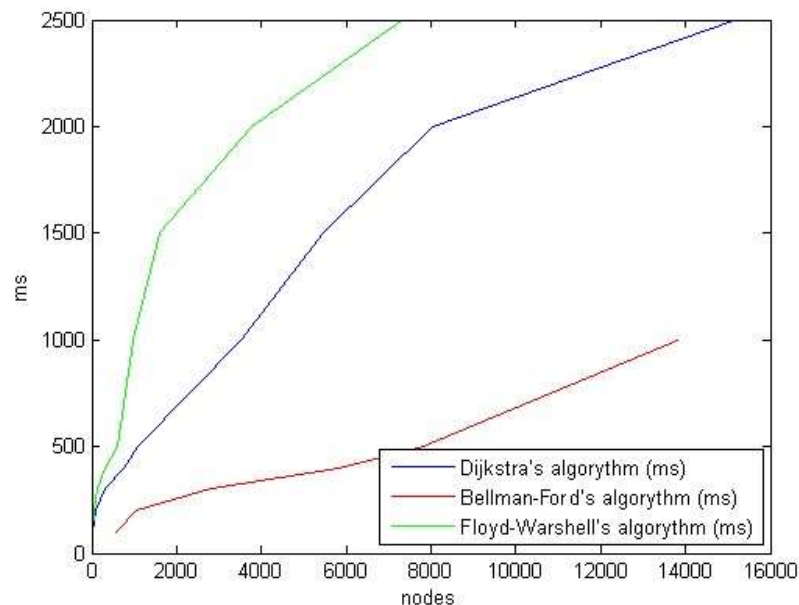


Рисунок 3.3 - Результати пошуку «пошук від усіх до всіх»

Як було зазначено, кожна ітерація евристичний шлях обчислюється відповідно до поточного положення робота та його оточення. Під час розрахунку шляху робот розміщуватиме додаткові точки форми (де змінюється напрямок руху). Щоб уникнути зіткнення робот повинен враховувати безпечну відстань до перешкоди (рис. 3.4-3.5).

3.4 Аналіз методів виявлення зіткнень і уникнення перешкод

У випадку нашого TVS всі перешкоди можна розділити на два класи: позитивні перешкоди (вище рівня локального нуля системи координат робота, рис. 3.6a) і негативні (нижче локального нуля системи координат робота, рис. 3.6b).

Традиційні методи виявлення зіткнень на основі візуалізації. виявлення зіткнень за допомогою систем на основі візуалізації використовується в різних типах роботизованих програм [42], [43]. Як приклад можна згадати [30], авторами запропоновано монокулярний метод виявлення та уникнення перешкод для БПЛА. Математична модель, використана в публікації, оцінює відносну відстань від камери БПЛА до перешкоди в полі зору шляхом знаходження характерних точок. У [31] автори запропонували метод роботизованої навігації в динамічних середовищах, запропоноване рішення називається алгоритмом виходу, він використовує метод силового поля, який належить до сімейства SLAM.

Біологічні методи виявлення зіткнень. Існує також кілька методів уникнення зіткнень і навігації, заснованих на біотехнології, більшість з яких засновані на елементарному детекторі руху (EMD), наприклад, Zhang et al. [32], Badia та ін. [33] і Franceschini et al. [34]. Однак у багатьох випадках методи, засновані на EMD, можуть бути складними для застосування через їх властивий характер — продуктивність суворо обмежена певними візуальними швидкостями. Методи на основі LGMD, з іншого боку, можуть впоратися з більшістю майбутніх зіткнень, незалежно від візуальної швидкості. Blanchard et al. [35] був першим, хто застосував нейронні мережі на основі LGMD у роботах для виявлення зіткнень у реальному часі та випробував це на роботах Khepera I. Badia та ін. [36] запропонували одну з форм моделі виявлення зіткнень на основі LGMD і випробували її на високошвидкісному роботі «Strider» з бездротовою камерою для захоплення та передачі зображень на ПК

для обробки. Сільва та ін. [37] запропонував іншу модифіковану модель LGMD, яка об'єднала дві попередні роботи з [38] і [39] для більш надійного виявлення зіткнень, яка більше зосереджена на моделюванні, а не на розробці вбудованої системи. Були спроби впровадити біоінспірований метод у дуже великомасштабних інтеграційних мікросхемах, таких як програмована вентиляна матриця (FPGA), наприклад, Meng et al. [39] додали додаткову комірку для глибокого виявлення руху, Харрісон [40] запропонував аналогову ІС для візуального виявлення зіткнень на основі EMD, а Окуно та Ягі [41] реалізували змішані аналого-цифрові інтегральні схеми з FPGA. Однак ці спроби не підходять для мікро- та міні-роботів через великий розмір або високе енергоспоживання схем FPGA і негативний (нижче локального нуля системи координат робота, рис. 4.6b)

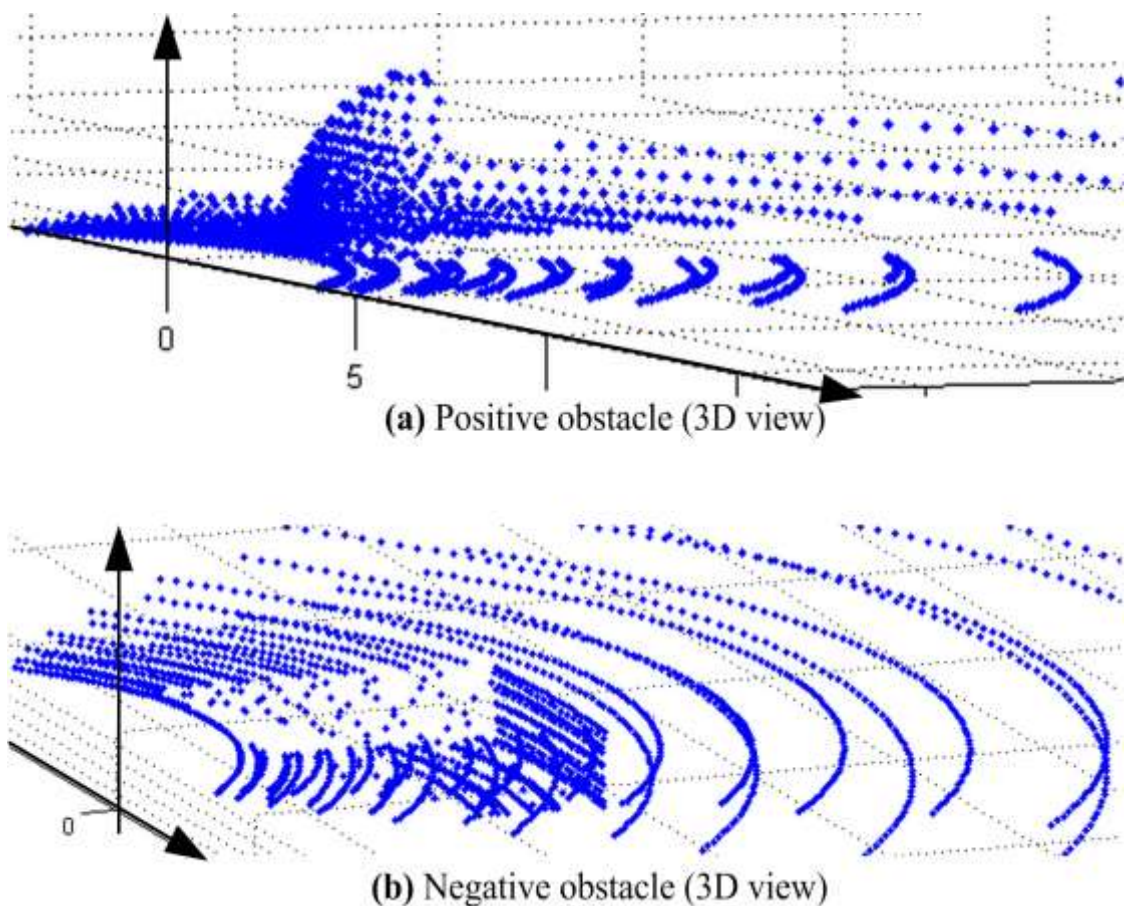


Рисунок 3.6 - Типи перешкод

Відповідно до принципів СТЗ та попередніх досліджень [12], в даному дослідженні доцільно використовувати алгоритм A^* [44] як інструмент уникнення перешкод. Місцевість можна представити у вигляді матриці, де кожна клітинка матиме лінійний розмір половини діагоналі робота. Клітини мають два можливих стани: доступні для проходження (прохідні) або насичені перешкодою без можливості пройти (непрохідні).

Спочатку кожна клітина доступна для прогулянок. Після виявлення перешкоди в клітині вона змінює свій стан. Усі комірki навколо нього також змінюють стан на «non-walkable», щоб створити безпечну зону та уникнути зіткнень під час поворотів робота (рис. 3.7а).

Після виконання такого набору операцій робот отримує матрицю навколишнього стану, де результати СТЗ-сканування (після пропуску z -координати) замінюються на матрицю сканованого сектора (бінарну карту) із визначеним статусом усіх внутрішніх комірок. (прохідний/непрохідний або зайнятий/порожній). Попередньо блок керування робота визначає здатність проходити сектор за умов ставлення: вона доступна, якщо висота перешкоди менше $0,1$ радіуса колеса або перевищує $1,2$ висоти робота (на основі пропущеної координати z). Така операція дозволяє спростити подальше планування шляху, використовуючи зменшену 2D модель.

A^* , відповідно до його класичної форми [20], виконує поширення хвилі до мети (точок інтересу), шукаючи перший найкращий збіг, який є набором найближчих «прохідних комірок». Цей набір комірок повинен відвідати робот під час свого руху (рис. 3.7b).

Траєкторія на рис. 3.7b представляє перше рішення збігу. Однак це рішення не найкраще з двох причин: воно містить надлишкову інформацію (5 малоінформативних точок, які строго не потрібні для планування траєкторії) і несплавність траєкторії в даному випадку, що збільшує енергетичне навантаження на приводний механізм. і колеса робота, що зрештою призводить до небажаних додаткових втрат терміну служби джерела живлення робота. Щоб уникнути цих проблем, ми пропонуємо виконати

додаткову постобробку. Для неперервних (більш плавних) траєкторій на першому кроці ми видалимо всі непотрібні вузли з траєкторії, залишимо лише вузли, де змінено напрямок руху (рис. 3.7в).

На другому кроці постобробки необхідно виконати апроксимацію траєкторії шляху (рис. 3.7d), щоб покращити плавність руху робота. У цьому випадку в якості наближення розглядаємо заміну ламаної лінії плавною кривою. Вибір відповідного методу апроксимації індивідуальної траєкторії буде наведено нижче. Це було зроблено для отримання узгодженості між рішеннями, взаємозв'язком дій навігаційної системи та здатністю передбачати та забезпечувати зворотний зв'язок з подіями з достатньою швидкістю.

Дане дослідження було розглянуто та порівняно з декількома методами апроксимації: точка-точка [48], апроксимація Безьє та шлях Дубіна.

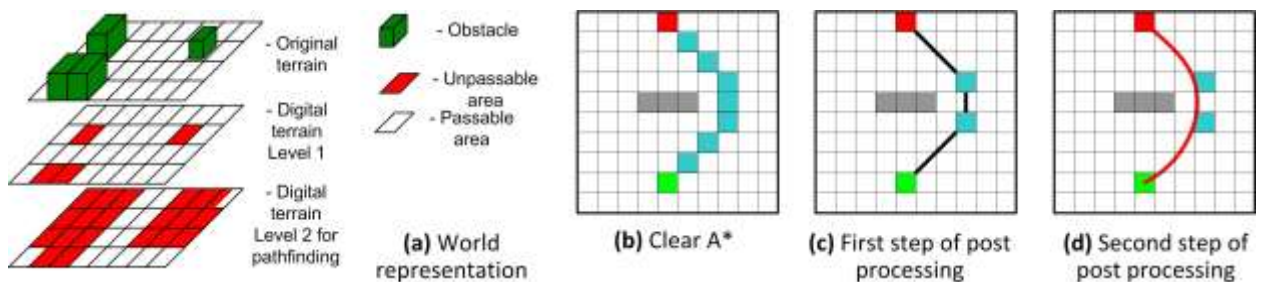


Рисунок 3.7 - Представлення світу та розрахунок із двоетапною постобробкою

У [48] показано, що для побудови гладкої траєкторії достатньо десяти точок. Така кількість даних вимагає багаторазового обчислення вектора руху в кожній точці, що займає багато часу. Одним із спрощених рішень є використання меншої кількості точок із кривою Без'є як функцією апроксимації ([45], [46]). Такий підхід є корисним і знайшов своє застосування в різних задачах планування шляху для автономних транспортних засобів [47] і [48]. Математичне параметричне зображення кривої Безьє має вигляд:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t), 0 \leq t \leq 1, \quad (3.1)$$

де t — параметр, n — ступінь базису полінома Бернштейна, i — індекс підсумовування, $J_{n,i}(t)$ базисні функції кривої Без'є, також відомі як базисні поліноми Бернштейна ступеня n , а B_i представляє i -го вершина многокутника Без'є.

i -та функція Без'є або Бернштейна (апроксимаційна функція) у рівнянні 3.2 подається як:

$$J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad (3.2)$$

з

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}. \quad (3.3)$$

Рівняння кривої Без'є можна записати у матричній формі, а також рівняння для кубічної сплайнової інтерполяції та параболічної:

$$P(t) = [T][N][G] = [F][G], \quad (3.4)$$

$$[F] = [J_{n,0}, J_{n,1}, \dots, J_{n,n}], \quad (3.5)$$

$$[G]^T = [B_0, B_1, \dots, B_n]. \quad (3.6)$$

де T – вектор часу, N – базисна матриця Без'є, G – матриця вершин. У загальному випадку для рівняння 3.4:

$$[T] = [t^n, t^{n-1}, \dots, t^1], \quad (3.7)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} \binom{n}{0} \binom{n}{n} (-1)^n & \dots & \dots & \binom{n}{n} \binom{n-n}{n-n} (-1)^0 \\ \binom{n}{0} \binom{n}{n-1} (-1)^{n-1} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \binom{n}{0} \binom{n}{n} (-1)^0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Порівняємо приклад, представлений на рис. 3.8. Крива Безьє на основі трьох точок. A і B — початкова і кінцева точки. Точка C є віртуальною тимчасовою точкою для створення кривої. Матриця $[N]$ для цього випадку, записана у рівнянні 3.9.

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Результати розрахунку наведено на рис. 3.8 (на рис. 3.8а показано 3D вигляд, на рис. 3.8b – 2D вид). Це доводить, що для згладжування траєкторії потрібні лише три точки.

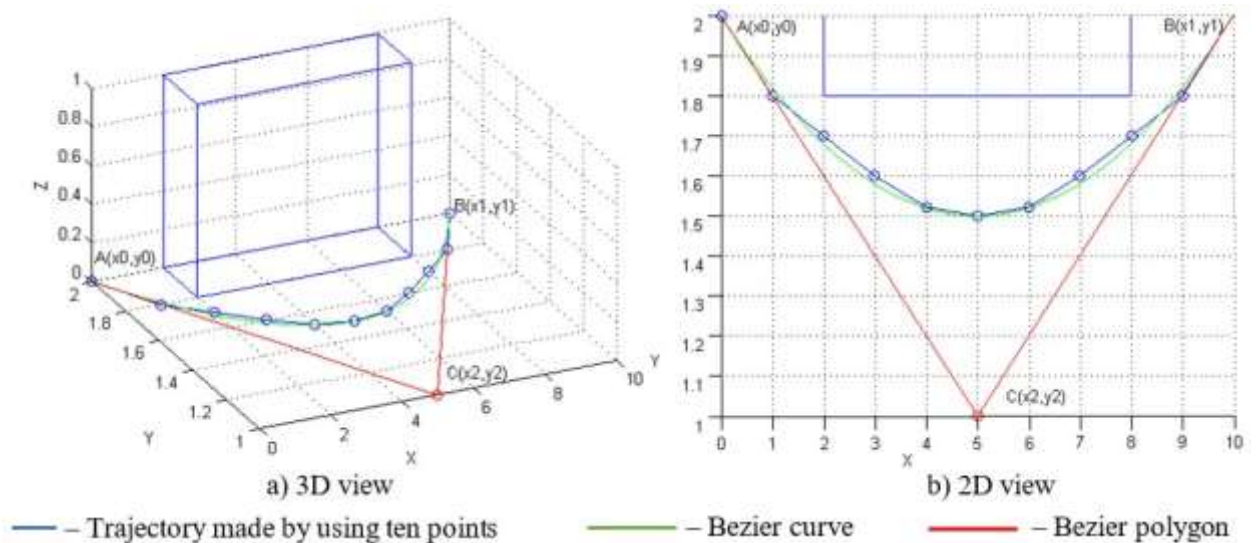


Рисунок 3.8 - Уникнення перешкод за допомогою кривої Безьє

Повернемося до прикладу, зображеного на рис. 3.9. Використання розрахунку на основі трьох точок (рис. 3.9а) допомагає уникнути руху на місці в точці B , але не в точці A . Ось чому буде використана матриця Безьє для чотирьох точок (рівняння 3.10). Результат обчислень показано на рис. 3.9b. Завдяки додаванню тимчасових точок C і D траєкторія стає гладкою, і це дозволяє уникнути необхідності руху на місці на всіх ділянках траєкторії.

$$[N] = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

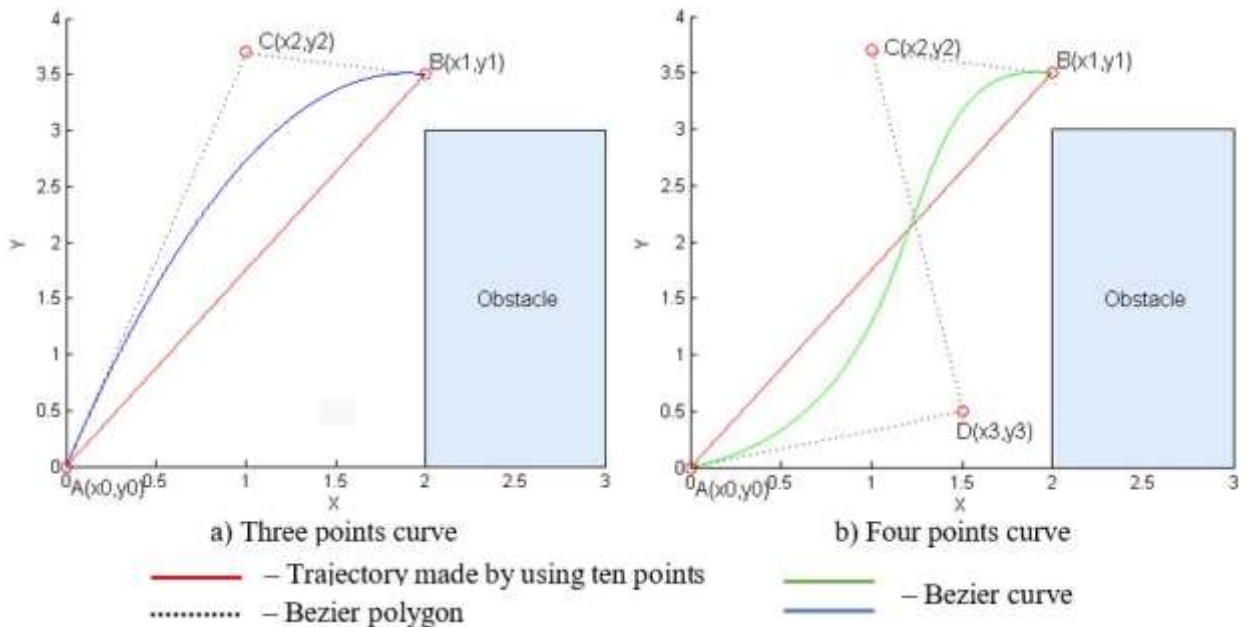


Рисунок 3.9 - Уникнення перешкод за допомогою кривої Безьє

У цьому випадку для отримання згладженої траєкторії потрібні лише три точки.

Для прикладу розв'яжемо цю ж задачу за допомогою шляху Дубіна [49]. Наступні рівняння описують це:

$$\begin{cases} x = V * \cos(\theta) \\ y = V * \sin(\theta), \\ \theta = u \end{cases} \quad (3.11)$$

де (x, y) – позиція робота, θ – напрямок, робот рухається з постійною швидкістю V . Оптимальний тип шляху завжди базується на здатності робота виконувати наступні основні дії: «поворот праворуч (R)», «поворот ліворуч

(L)» або «прямо (S)». Щоразу оптимальним буде шлях одного з наступних шести типів: *RSR*, *RSL*, *LSR*, *LSL*, *RLR* і *LRL* (рис. 3.10).

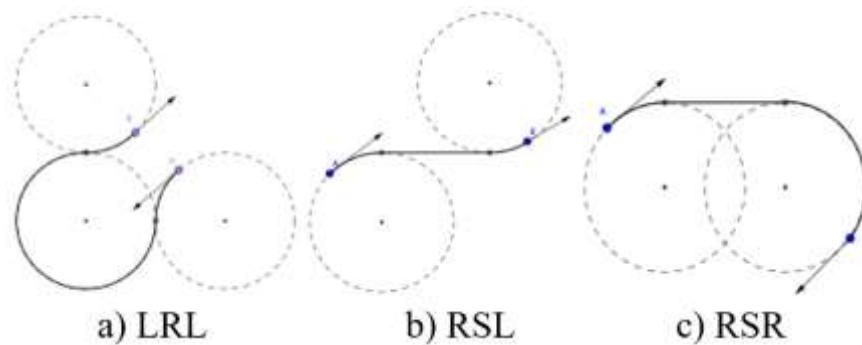


Рисунок 3.10 - Уникнення перешкод за допомогою шляху Дабінса

За допомогою траєкторії Дубіна (рис. 3.11) відстань збільшується, і в початковій точці робот за замовчуванням знаходиться в незручному положенні для початку руху по рекомендованій траєкторії (потрібне додаткове незручне переміщення). Здійснюючи детальне порівняння цих двох алгоритмів, результат шляху, зробленого за наближенням Безьє, на 10,3% – 12,7% ефективніший, ніж вирішення тих самих ситуацій за допомогою шляху Дубіна.

Далі ці методи порівнювали з використанням параметрів загальної довжини шляху та плавності траєкторії, представлені як кількість енергії вигину траєкторії [50].

Енергія вигину є функцією кривизни k , яка використовується для оцінки плавності навігаційної траєкторії робота. Енергія вигину обчислюється як сума квадратів кривизни в кожній точці лінії вздовж її довжини. Енергія вигину траєкторії робота визначається як:

$$BE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k^2(x_i, f(x_i)) , \quad (3.12)$$

де: $k(x_i, y_j)$ — кривизна в кожній точці траєкторії робота, а n — кількість точок на траєкторії. Тут кривизна траєкторії в n -й точці є оберненим значенням

радіуса кола, побудованого до точки дуги, по якій вона рухається в даний момент часу. Результати показані в табл. 3.1. За основу порівняння була взята 10-точкова крива (усі представлені як 100%). Узагальнені результати представлені у вигляді середнього значення між загальною довжиною та характеристикою енергії згину. Іншими словами, кожен з них має однакову вагу для розрахунку.

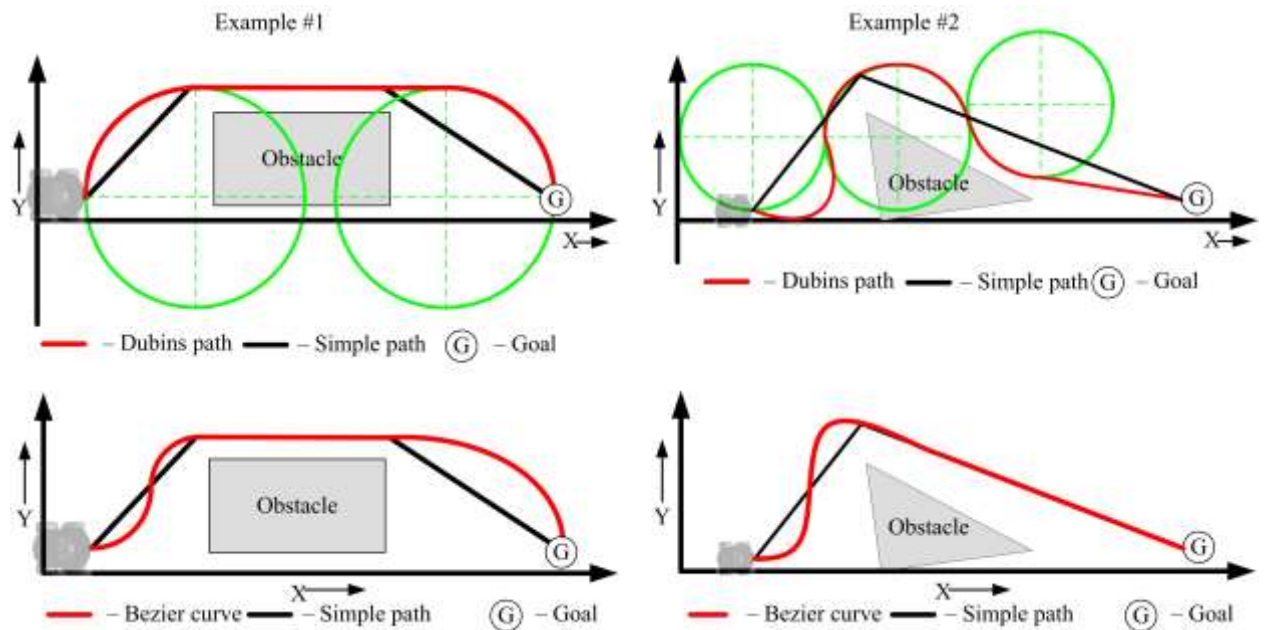


Рисунок 3.11 - Уникнення перешкод за допомогою траєкторії Дубіна та кривих Безьє

Таблиця 3.1 - Порівняння результатів планування руху

	Крива 10 точок	Стежка Дубіна	Безьє з 3 очками	Безьє з 4 очками
Загальна довжина	100%	141%	113%	105%
Енергія вигину	100%	17%	75%	29%
Всього	100%	79%	94%	67%

Порівнюючи три методи планування руху (шлях Дубіна, апроксимація Безьє з використанням 3 і 4 точок) можна отримати наступні висновки. Доріжка Dubins отримала найбільшу довжину, але найкраще

енергозбереження на вигин. Наближення Безьє з використанням багатокутника з 3 точками демонструє найгіршу здатність для оптимізованого планування шляху. Зрештою, апроксимація Безьє з використанням полігону з 4 точками дає найбільш задовільний середній результат. Іншими словами, його застосування дозволяє отримати мінімально подовжену траєкторію, забезпечуючи при цьому максимальну економію джерела і засобів механізмів робота.

3.5 Висновки до розділу

Загалом ці методи вирішують завдання планування руху самостійного робота в групі. Очевидно, що обмін даними між n роботами в групі є хорошим інструментом для отримання додаткової інформації. Це може служити для більш ефективної реалізації всіх перерахованих вище методів. Основна ідея полягає в тому, щоб якнайшвидше дати кожному окремому роботу в групі більше знань про сектор. Крім того, в деяких випадках певна частина інформації може бути недоступною для i -го індивіда з його власної позиції.

ВИСНОВКИ

В ході роботи над кваліфікаційною роботою, для вирішення поставлених задач, було проведено аналітичний огляд існуючих систем для визначення орієнтації мобільного наземного робота. Розглянуті традиційні методи виявлення зіткнень на основі візуалізації, які потребують обробки величезного обсягу зображень у режимі реального часу або потребують попередньо створеної моделі реального світу, яку або важко завершити на борту для мікроробота з обмеженими ресурсами, або не здатні справлятися з динамічним середовищем.

Також розглянуті методи виявлення зіткнень на основі біотехнологій та з використанням оцінки глибини залежать від помітного стандарту часу прольоту (принцип камери ToF) та системи засновані на основі камери ToF. І прийшли до висновків, що ці методи створюють неоднозначність і сингулярності, і часто вимагають використання численних зображень для вирішення проблеми, що передбачає додатковий час, простір і обчислювальні витрати. З іншого боку, дані про глибину, отримані за допомогою камер ToF, мають високу точність за допомогою одного кадру даних (зображення). Стратегії тріангуляції можна розділити на пасивні (стереобачення) та активні (техніки методів структурованого світла). Для пасивних методів тріангуляції потрібна пара камер, ізольованих за стандартом, який визначає обмежений діапазон робочої глибини (чим більша глибина, тим більша основа потрібна). Ці методи повинні вирішити наступну проблему: визначити відповідні точки із зображень камери, які є еталонами подібної 3D-точки. Такі обчислення дуже складні, оскільки системи стереовізійних систем не можуть порівнювати точки в однорідному оточенні [44]. Камери ToF і системи на основі лазера не мають цієї проблеми, оскільки вони отримують ці дані миттєво.

Методи активної тріангуляції на відміну від попередніх методів, методи активної тріангуляції вимагають лише однієї камери та організованого

випромінювача світла, який дає мінімум одну лінію шаблону. Порівняно з ToF-камерами та лазерними системами бачення поточний метод має деякі недоліки: неповні/відсутні оцінки глибини, потреба у винятковому джерелі живлення та концентрованому світлі, перевірка світла через сцену та винятково контрольовані умови освітлення, які підказують основні обмеження в локальному або відкритому застосуванні автономних транспортних засобів.

На основі проведеного аналізу в кваліфікаційній роботі було розроблено структурну та функціональну схеми системи комплексного збору та обробки інформації, проведено аналітичний огляд існуючих систем СТЗ, вході аналізу було обрано метод динамічної триангуляції, на його базі розглянуто структуру та принципи роботи системи вимірювання кутових і лінійних координат у тривимірному просторі.

Показано загальне співвідношення між кутами розкриття та відстанями враження для розглянутої щільності точок також з урахуванням щільності хмари точок. З використанням визначених зон точності отримані залежності, які демонструють середні значення такого співвідношення.

Відповідно до розрахунку середні кути на основі початкової щільності хмари точок (11 точок/метр) становлять $10,059^\circ$ для «зони високої точності», $3,011^\circ$ для «зони середньої точності» та $1,34^\circ$ для «зони низької точності». Середній кут для діапазону «Зона високої точності» дасть невелику роздільну здатність, рівну 5-6 точкам на метр. Тому було взято нижнє крайове значення кута розкриття для «Зони високої точності». Набір кутів змінено на $5,209^\circ$, $3,011^\circ$, $1,34^\circ$.

Ідентифікація отриманої точки на поверхні перешкоди, що належить певній зоні точності, спрощується до розв'язку точки, що належить еліпсу в декартовій системі координат. Загалом ці методи вирішують завдання планування руху самостійного робота в групі. Очевидно, що обмін даними між п роботами в групі є хорошим інструментом для отримання додаткової інформації. Це може служити для більш ефективної реалізації всіх перерахованих вище методів. Основна ідея полягає в тому, щоб якнайшвидше

дати кожному окремому роботу в групі більше знань про сектор. Крім того, в деяких випадках певна частина інформації може бути недоступною для і-го індивіда з його власної позиції.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Lindner, L., Rodriguez-Quinonez, J. C., FloresFuentes, W., Hipolito, J. N. (2019). Software Advances using n-agents Wireless Communication Integration for Optimization of Surrounding Recognition and Robotic Group Dead Reckoning. *Programming and Computer Software*, 45(8), 557-569.
2. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Lindner, L., Flores-Fuentes, W., Rodriguez-Quinonez, J. C., Mercorelli, P. (2020). Influence of data clouds fusion from 3D real-time vision system on robotic group dead reckoning in unknown terrain. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(2), 368-385.
3. O.Yu. Sergiyenko, M.V.Ivanov, V.V.Tyrsa, V.M.Kartashov, M.Rivas-Lopez, D.HernandezBalbuena, W. Flores-Fuentes, J.C. Rodriguez-Quinonez, J.I. Nieto-Hipolito, W. Hernandez, A. Tchernykh, Data transferring model determination in robotic group, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 83, 2016, Pages 251-260
4. Lars Lindner, Oleg Sergiyenko, Moises Rivas-Lopez, Daniel Hernandez-Balbuena, Wendy Flores-Fuentes, Julio C. Rodriguez-Quinonez, Fabian N. Murrieta-Rico, Mykhailo Ivanov, Vera Tyrsa, Luis C. Basaca-Preciado, (2017) "Exact laser beam positioning for measurement of vegetation vitality", *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, Vol. 44 Issue: 4, pp. 532-541.
5. Mykhailo Ivanov, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Vladimir Kartashov, Yelizaveta Tolstykh, MoisesRivas-Lopez, DanielHernandez-Balbuena, PaoloMercorelli, JulioRodriguez-Quinonez, Wendy Flores-Fuentes, Lars Lindner, "Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3d TVS" 2017 Radar. Satellite Navigation. Radiomonitoring, Kharkov, 2017, pp. 55-60.

6. Mykhailo Ivanov, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Vladimir Kartashov, Wilmar Hernandez, Sergiy Sheiko, Marina Kolendovska, Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS, IEEE, IECON, 2018.
7. Ivanov, M.V., Sergiyenko, O.Y., Tyrsa, V.V., Lindner, L., Rodriguez-Quinonez, J.C., FloresFuentes, W., Nieto Hipolito, J. I. (2019). Wireless integration to optimize environmental recognition and calculate the trajectory of a group of robots. Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS, 31(2), 67-82.
8. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Mercorelli, P., Hernandez, W., Tyrsa, V., Hernandez-Balbuena, D., Iryna, T. (2019, June). Effective informational entropy reduction in multi-robot systems based on real-time TVS. In 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1162-1167). IEEE.
9. O. Sergiyenko, V. Kartashov, M. Ivanov, D. Hernandez-Balbuena, V. Tyrsa and J. I. NietoHipolito, "Transferring model in robotic group," 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Santa Clara, CA, 2016, pp. 946-952.
10. L. Lindner, Oleg Sergiyenko, Moises Rivas-Lopez, Mykhailo Ivanov, Julio C. RodriguezQuinonez, Daniel Hernandez-Balbuena, Wendy Flores-Fuentes, Vera Tyrsa, Fabian N. Murrieta-Rico, Paolo Mercorelli, "Machine vision system errors for unmanned aerial vehicle navigation," 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 1615-1620.
11. Miguel Reyes-Garcia, Lars Lindner, Moises Rivas-Lopez, Julio C. Rodriguez-Quinonez, Wendy Flores-Fuentes, Mykhailo Ivanov, Fabian N. Murrieta-Rico, Alexander Gurko, Viktor Melnik, Reduction of Angular Position Error of a Machine Vision System using the Digital Controller LM629, IEEE, IECON 2018.

12. Reyes-Garcia, M., Sergiyenko, O., Ivanov, M., Lindner, L., Rodriguez-Quinonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., Murrieta-Rico, F. N. (2019, June). Defining the Final Angular Position of DC Motor shaft using a Trapezoidal Trajectory Profile. In 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1694-1699). IEEE.
13. Hernandez, W., Mendez, A., Ballesteros, F., Gonzalez-Posada, V., Jimenez, J. L., Tyrsa, V., Ivanov, M., Quezada-Sarmiento, P. A. (2019, October). A method of image classification by using multidimensional scaling. In IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Vol. 1, pp. 5559-5565). IEEE.
14. A Comparative Example Between The Use Of Pca And Mds For Image Classification / Hernandez, W., Mendez, A., Flor-Unda, O., Camejo, I.M., Kolendovska, M. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152565, Pages 1353-1358
15. Algorithm For Generating Refined Frequency Estimates In Atmospheric Radio Sounding Systems / Kartashov V., Hernandez W., Hernandez-Balbuena D., M. Kolendovska, Konovalenko O., Melnyk V. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152562, Pages 79-82
16. Application of Fast Frequency Shift Measurement Method for INS in Navigation of Drones / D. Avalos-Gonzalez, D.H. Balbuena, V. Tyrsa, V.M. Kartashov, M. Kolendovska, S. Sheiko, O. Sergiyenko, V. Melnyk, F.N. Murrieta-Rico // IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – P. 3159–3164.
17. Avalos-Gonzalez, D., Sergiyenko, O., Hernandez-Balbuena, D., Tyrsa, V., Kartashov V.M., V., Rivas-Lopes, M., Murrieta-Rico, F.N. Constraints

- definition and application optimization based on geometric analysis of the frequency measurement method by pulse coincidence// Measurement: Journal of the International Measurement Confederation (USA). 2018, V.126. P. 184-193.
18. Book "Control and Signal Processing Applications for Mobile and Aerial Robotic Systems", Hardback - Advances in Computational Intelligence and Robotics English. Edited by Oleg Sergiyenko, Moises Rivas-Lopez, Wendy Flores-Fuentes, Julio Cesar Rodríguez-Quiñonez, Lars Lindner. Editorial IGI Global, Hershey, United States, January 2020, 340 páginas. ISBN10 152259924X, ISBN13 9781522599241
19. Cesar Sepulveda-Valdez ; Oleg Sergiyenko ; Vera Tyrsa ; Wendy Flores-Fuentes ; Julio César Rodríguez-Quiñonez ; Fabian Natanael Murrienta-Rico; Jesús Elías Miranda-Vega ; Paolo Mercorelli; Marina Kolendovska. "Geometric analysis of a laser scanner functioning based on dynamic triangulation," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1398-1403, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152268.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152268>
20. Cuauhtémoc Mariscal-García; Wendy Flores-Fuentes; Daniel Hernández-Balbuena; Julio C. Rodríguez-Quiñonez ; Oleg Sergiyenko. "Classification of Vehicle Images through Deep Neural Networks for Camera View Position Selection," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1376-1380, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152440.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152440>
21. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision/ O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez, IGI Global, 2016; 341p.
22. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission, /Oleynikov, V., Zubkov, O., Kartashov, V., ...Sheiko, S., Babkin, S.//2019 IEEE International

- Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 - Proceedings, 2019, стр. 175-178, 9061337
23. Features of acoustic noise of small unmanned aerial vehicles / Semenets, V.V., Kartashov, V.M., Leonidov, V.I. // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz* and *Radiotekhnika*), 2020, 79(11), стр. 985-995
24. Geometric Analysis Of A Laser Scanner Functioning Based On Dynamic Triangulation / Sepulveda-Valdez, C., Sergiyenko, O., Tyrsa, V, Mercorelli, P., Kolendovska, M. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17 June 2020 до 19 June 2020; Volume 2020-June, June 2020, № 9152268, Pages 1398-1403
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152255>
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9161870>
25. I. Y. A. Corpus, L. Lindner, O. Sergiyenko. "Transimpedance Amplifier for Laser Scanning System Range Extension," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1421-1426, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152487.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152487>
26. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Mercorelli, P., Hernandez, W.c, Rodriguez Quinonez, J.C.d, Katashov V., Kolendovska, M., Iryna, T. Effective informational entropy reduction in multi-robot systems based on real-time TVS. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2019-June, 8781209, c. 1162-1167.
27. Jonathan J. Sanchez-Castro ; Julio C. Rodríguez-Quiñonez ; Luis R. Ramírez-Hernández ; Guillermo Galaviz ; Daniel Hernández-Balbuena ; Gabriel Trujillo-Hernández ; Wendy Flores-Fuentes ; Paolo Mercorelli ; Wilmar Hernández-Perdomo ; Oleg Sergiyenko ; Félix Fernando González-Navarro. "A Lean Convolutional Neural Network for Vehicle Classification," 2020

- IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1365-1369, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152274.
- <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152274>
28. Lindner, L., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., (...), Gurko, A., Kartashov, V.M. Machine vision system for UAV navigation; IEEE, 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC, 2016; pp.1–6. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841356.
29. M. Ivanov, O. Sergiyenko, V. Tyrsa, P. Mercorelli, V. Kartashov, W. Hernandez, S. Sheiko, M. Kolendovska. Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS // Proceedings of 44th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON).. -2018. – Washington DC, USA. -S. 3187-3192. . ISBN 978-1-5090-6683-4/18/.
30. Murrieta-Rico, F.N., Petranovskii, V., Galvan, D.H., Sergiyenko, O., Yocupicio-Gaxiola, R.I., De Dios Sanchez-Lopez, J. Phase effect in frequency measurements of a quartz crystal using the pulse coincidence principle. 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 185-190, 9152255, DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152255
31. Oleksandr Sotnikov, Vladimir Kartashov, Oleksandr Tymochko, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Wendy Flores-Fuentes. Methods for Ensuring the Accuracy of Radiometric and Optoelectronic Navigation Systems of Flying Robots in a Developed Infrastructure. Chapter 16// Machine Vision and Navigation; Springer, Cham. pp.537–578. Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2_16.
32. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time/Kartashov, V., Oleynikov, V., Zubkov, O., Sheiko, S.// 2019

- International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2019 - Proceedings, 2019, 9165362/
33. Principles Of Construction And Assessment Of Technical Characteristics Of Multi-Frequency Atmospheric Sodar In The Humidity Measurement Mode / Kartashov, V.M., Sidorov, G.I., Sheiko, S.A., Kolendovskaya, M.M., Sergienko, O.Yu. // Telecommunications And Radio Engineering (English Translation Of Elektrosvyaz And Radiotekhnika), 2020, ISSN Print: 0040-2508, ISSN Online: 1943-6009, DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i4.50, p. 323-333/
34. Research Of The Uncertainty Of Measurement Frequencies And Definitions Of The Frequency Signal In The Waveguide With Respect To Power / Semenets, V.Zakharov, I. Serhienko, M., Kartashov, V.M., Kolendovska, M., Hernandez, W., Hipolito, J.I.N., Tyrsa, V. // 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2019; Lisbon Congress Center Lisbon; Portugal; 14 October 2019 до 17 October 2019; CFP19IEC-ART; Код 155980, Volume 2019-October, October 2019, № 8927203, Pages 4674-4679
35. Spatial-Temporal Processing Of Acoustic Signals Of Unmanned Aerial Vehicles / Kartashov V.M., Oleinikov V.N., Zubkov O.V., Sheiko S.A., Kolendovska M.M. // Telecommunications And Radio Engineering (English Translation Of Elektrosvyaz And Radiotekhnika), 2020, ISSN Print: 0040-2508, ISSN Online: 1943-6009, DOI: 10.1615/Telecomradeng.v79.i9.40, p. 769-780
36. Stereoscopic Vision Systems In Machine Vision, Models, And Applications (Book Chapter) / Ramírez-Hernández, L.R., Rodríguez-Quiñonez, J.C., Castro-Toscano, M.J., Kolendovska, M., Murrieta-Rico, F.N. // Machine Vision And Navigation, 2019 Machine Vision and Navigation 30 September 2019, Pages 241-265

37. Strelkova T., Kartashov V., Lytyuga A., Strelkov A. Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. Chapter 16. // Biometrics: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications; Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez. (341p.), IGI Global, 2017; pp. 361-381. DOI: 10.4018/978-1-5225-0983-7.ch016.
38. Strelkova T., Kartashov V., Lytyuga A., Strelkov A. Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. Chapter 6 // Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision; Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez. (341p.) – USA, Herhey, IGI Global, 2016; pp.180-205.
39. Sytnik O., Kartashov V. Methods and Algorithms for Technical Vision in Radar Introscopy. Chapter 13 // Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications. IGI Global, 2019; pp. 373-391.
40. The Use of Factorization and Multimode Parametric Spectra in Estimating Frequency and Spectral Parameters of Signal/Semenets, V., Kartashov, V., Sergiyenko, O., ...Rodriguez-Quinonez, J.C., Flores-Fuentes, W. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2020, 2020-June, p. 215-219
41. Unda, O.F., Hernandez, W., Vargas, O., Mendez, A., Sergiyenko, O., Tyrsa, V. Construction of a robotic platform of differential type for first-year students of electronic engineering, 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2020, 24-26 de junio de 2020, Sorrento, Italia, pp. 538-543, 9161870, DOI: 10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161870
42. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles/Kartashov, V., Oleynikov, V., Koryttsev, I., ...Babkin, S., Selieznov, I. // Proceedings - 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, 2020, p. 377-380/
43. V. Semenets; Vladimir Kartashov ; Oleg Sergiyenko; Vyacheslav Tikhonov ; Paolo Mercorelli ; Sergiy Sheiko ; Nataliya Chmelarova. "The Use of

Factorization and Multimode Parametric Spectra in Estimating Frequency and Spectral Parameters of Signal," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 215-219, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152238.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152238>

44. Wilmar Hernandez ; Alfredo Mendez ; Omar Flor-Unda ; Vicente Gonzalez-Posada ; Jose Luis Jimenez ; Oleg Sergiyenko ; Julio C. Rodriguez-Quiñonez ; Mykhailo Ivanov ; Ivan Menes Camejo ; Marina Kolendovska. "A comparative example between the use of PCA and MDS for image classification," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1353-1358, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152565.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152565>

45. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи. Навч. посібник. Х.: Сміт, 2009. 448 с.

46. Офіційний сайт бази даних візуальних новел. [Електронний ресурс]

URL: <https://vndb.org/v?f=&o=a&p=12&s=rel> (дата звернення: 17.05.2022).