

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів побудови системи наносенсорів для систем навігації
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МНПМ-22-1

Кравець І.Г.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Стрілкова Т.О.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2023 р

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Кравцю Івану Геннадійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Дослідження методів побудови системи наносенсорів для систем навігації затверджена наказом університету від 20.11.2023 р. № 1368Ст
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 09 січня 2024 р.
- Вихідні дані до роботи OS3D-10 багатоцільовий мініатюрний інерційний датчик: Робоча температура -40 ... + 70 0C; Напруга живлення 5 ... 25 В пост. струму; Споживана потужність 115 мВт; Клас захисту IP67; Габарити 26,5 x 19,5 x 12 мм; Вага 13,5 грам; Вихідні сигнали: прискорення, кутові швидкості, магнітне поле, температура, тиск, кватерніони і / або сирі дані елементів орієнтації: курс, тангаж і крен; Частота виходу даних до 2000 Гц; Точність курсу (статика / динаміка) 0,8 / 1 градус; Точність крену і тангажа 0,08 / 0,1 градуса (статика / динаміка)
PNBC008 Laser Distance Sensor Measuring Range 800 mm; Resolution 12.2 μm; Linearity Deviation 375 μm; Light Source: Laser (red); Wavelength 658 nm; Service Life (T = +25 °C) 100,000 h; Laser Class (EN 60825-1) 2; Max. Ambient Light 10,000 Lux; Light Spot Diameter < 1.6 mm
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
 - Аналіз існуючих методів побудови системи навігації за допомогою наносенсорів.
 - Вибір та аналіз датчиків для системи навігації телекерованої платформи
 - Візуалізація телекерованої платформи із використанням обраних датчиків, та її програмне забезпечення
- Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)
 - Комп'ютерна ілюстрація (презентація)
 - Електрична схема

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	18.09.2023 – 2.10.2023	Виконано
2	Аналітичний огляд джерел	2.10.2023 – 5.11.2023	Виконано
3	Постановка задач дослідження	5.11.2023 – 16.11.2023	Виконано
4	Проведення обчислювального експерименту з розрахунку характеристик наносенсорів	16.11.2023 – 28.12.2023	Виконано
5	Впровадження результатів наукових досліджень	28.12.2023 – 02.01.2024	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи	02.01.2024 – 05.01.2024	Виконано
7	Підготовка презентації	05.01.2024 – 07.01.2024	Виконано
8	Рецензування, нормконтроль	07.01.2024 – 09.01.2024	
9	Захист роботи	10.01.2024	

Дата видачі завдання 8 липня 2023 р.

Студент _____ Іван КРАВЕЦЬ _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф.каф. МЕЕПІ Тетяна СТІЛКОВА _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 52 сторінок, 4 таблиць, 20 рисунків, 3 додатка, 15 джерел.

НАНОСЕНСОРИ, ДАТЧИКИ, НАВІГАЦІЯ, СИСТЕМА

Об'єктом дослідження є вибір та аналіз наносенсорів, за допомогою яких система навігації орієнтується в просторі з покращеними характеристиками.

Метою дослідження є підвищення ефективності роботи системи навігації та методів побудови карт з використанням пакету Robot Operating System (ROS) за рахунок оптимального вибору наносенсорів.

Для візуалізації робота та робочого оточення були використані пакети Amcl 2, Gazebo та Rviz, які є частиною фреймворку Robotic Operating System.

У результаті роботи проаналізовано системи навігації, способи побудови, її складові, та можливості яких вона потребує. Розглянуті датчики та обрано інерційний датчик у тандемі з лазерним далекоміром для покращення роботи. Математично змодельовані графіки компенсації Калмана для візуалізації покращення роботи системи з двох датчиків.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 52 pages, 4 tables, 20 pictures, 3 addition, 15 sources.

NANOSENSORS, SENSORS, NAVIGATION, SYSTEM

The object of research is the selection and analysis of nanosensors, with the help of which the navigation system navigates in space with improved characteristics.

The aim of the research is to increase the efficiency of the navigation system and map construction methods using the Robot Operating System (ROS) package due to the optimal selection of nanosensors.

Amcl 2, Gazebo and Rviz packages, which are part of the Robotis Operating System framework, were used to visualize the robot and its working environment.

As a result of the work, navigation systems, construction methods, ITS components, and the capabilities it needs were analyzed. Sensors were considered and an inertial sensor was selected in tandem with a laser range finder to improve performance. Mathematical modeled Kalman compensation plots to visualize the performance improvement of a two-sensor system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1	10
1.1	10
1.2	10
1.3	13
2 ВИБІР ТА АНАЛІЗ НАНОСЕНСОРІВ ДЛЯ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ	15
2.1	15
2.2	16
2.3	18
2.4	21
2.5	26
2.6	29
3	33
3.1	33
3.2	33
3.3	35
3.4	36
3.5	38
3.6	39
3.7 Моделювання компенсації помилок визначення координат	40
4	43

4.1	43	
4.2	45	
4.3	46	
4.4	46	
4.5	47	
ВИСНОВКИ		50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ		51
ДОДАТОК А		53
ДОДАТОК Б		54
ДОДАТОК В		62

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛІС – Програмована логічна інтегральна схема

AMR – autonomous mobile robot

SLAM – Simultaneous localization and mapping)

LIDAR – лазерний далекомір

ROS – Robot Operating System

IMU – Inertial Measurement Unit

GNSS – Global Navigation Satellite System

ВСТУП

В епоху стрімкого технологічного розвитку навігаційних систем основна увага приділяється пошуку інноваційних підходів до покращення їхніх характеристик, особливо точності та надійності. У цьому контексті нанотехнології відкривають особливі можливості для створення високоефективних наносенсорних систем, які можуть революціонізувати сучасні навігаційні інструменти.

Метою дослідження є підвищення ефективності роботи системи навігації та методів побудови карт з використанням пакету Robot Operating System (ROS) за рахунок оптимального вибору наносенсорів.

У цій роботі представлено всебічний огляд сучасних досліджень у галузі наносенсорів для навігаційних систем, з акцентом на аналізі переваг та обмежень існуючих методів. Крім того, обговорюються інноваційні підходи до побудови наносенсорних систем та їх можливі застосування в сучасній навігаційній техніці.

Очікується, що це дослідження не тільки розширить теоретичне уявлення про можливості наносенсорів для навігаційних систем, але й створить основу для подальших досліджень і розробок передових технологій у цій галузі.

Отримані знання можуть зробити значний внесок у розвиток сучасної навігаційної техніки, виходячи з потреб сучасного світу в точних та ефективних навігаційних системах.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ НАНОСЕНСОРІВ ДЛЯ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ

1.1 Сутність поняття системи навігації з використанням наносенсорів

Поняття системи навігації з використанням наносенсорів відноситься до технологічного підходу до визначення місцезнаходження об'єкта або особи за допомогою високоточних наносенсорів. Наносенсори - це дуже маленькі пристрої, здатні вимірювати різні параметри навколишнього середовища, такі як розташування, температура, тиск, акустичні характеристики тощо.

Основна сутність системи навігації з використанням наносенсорів полягає в тому, щоб збирати дані з наносенсорів та використовувати їх для точного визначення положення об'єкта або особи в просторі. Це може бути корисним в різноманітних контекстах, таких як автономні автомобілі, дрони, роботи, віртуальна реальність, спорядження для занять спортом та інше.

Одним з важливих аспектів таких систем є використання наносенсорів для отримання даних, які необхідні для точної навігації в реальному часі. Це може включати в себе використання гіроскопів, акселерометрів, магнітних сенсорів, GPS та інших датчиків. Інтеграція цих даних дозволяє системі точно визначати рух та положення в просторі.

Такі системи можуть мати широкий спектр застосувань, і їх впровадження дозволяє поліпшувати точність та ефективність навігації в різних галузях технологій.

1.2 Дослідження методів побудови системи наносенсорів для визначення координат у просторі

Структурна схема системи визначення координат може включати в себе кілька ключових компонентів та етапів для ефективного забезпечення точності та надійності процесу орієнтації в просторі.

Спочатку, на вході системи розташовані сенсори, які вимірюють величини, необхідні для визначення координат. Серед таких сенсорів можуть бути глобальні навігаційні супутники (GNSS), які збирають сигнали від супутників для визначення географічних координат, а також інерційні сенсори, які вимірюють прискорення та кутові швидкості для визначення змін координат.

Після збору даних вони передаються до приладів обробки сигналів, таких як приймачі GNSS та інерційні прилади обробки сигналів. Приймач GNSS отримує та обробляє сигнали від супутників, тоді як інерційні прилади обробки сигналів аналізують вимірювані дані від інерційних сенсорів.

Отримані дані проходять через фільтри та алгоритми обробки даних, такі як Калманівські фільтри та алгоритми об'єднання інформації. Ці елементи використовуються для об'єднання та фільтрації даних з різних джерел з метою отримання точних координат.

Центральною частиною системи є мікроконтролер або процесор, який відповідає за виконання алгоритмів обчислень та обробки даних, що надходять від сенсорів та фільтрів.

На завершальному етапі результати обробки виводяться у вигляді координат. Це може включати передачу отриманих координат до системи навігації, відображення їх на карті або передачу іншим засобам відображення для використання у відповідних застосуваннях. Такий комплексний підхід до визначення координат в системі забезпечує високу точність та ефективність у різних областях застосування.

Задача автономної навігації складається з двох основних підзадач: картографування та визначення власних координат на карті. Основним методом вирішення цих завдань є алгоритм SLAM: одночасна локалізація і картографування (SLAM) - це метод, який використовується роботами і автономними транспортними засобами для виконання картографування в невідомих районах і оновлення карт у відомих районах з одночасним

відстеженням поточного положення і пройденої відстані. Цей метод є найпоширенішим способом вирішення таких завдань.

Однак у цього методу є кілька суттєвих проблем:

По-перше, для того, щоб створити карту, потрібно знати місцезнаходження людини, а для визначення координат потрібна карта. Це вимагає декількох початкових умов для алгоритму управління.

По-друге, неможливо створити абсолютно точну карту, а потім визначити абсолютно точне місцезнаходження. І тут основна мета алгоритму - мінімізувати цю похибку. Помилки вимірювань координат можуть виникати з різноманітних причин, які потребують ретельного аналізу та розуміння для подальшого удосконалення точності системи. Декілька ключових факторів, що можуть впливати на точність вимірювань, включають:

а) технічні обмеження:

- роздільна здатність сенсорів: точність вимірювань часто обумовлюється роздільною здатністю використовуваних сенсорів. Зменшення роздільної здатності може призвести до втрати деталей та збільшення погрешностей;
- точність приймачів GNSS: невірно визначені сигнали від супутників, атмосферні умови та інші чинники можуть впливати на точність приймачів GNSS, викликаючи неточності в географічних координатах.

б) характеристики сенсорів:

- ефекти взаємодії сенсорів: різні сенсори можуть взаємодіяти між собою, викликаючи ефекти взаємодії та співпраці, які впливають на точність вимірювань координат. Врахування цих ефектів є важливим для уникнення системних помилок.
- обмеження області вимірювань: деякі сенсори можуть бути обмежені в області вимірювань, наприклад, у густому лісі або в здебільшого забудованому місці, що може призвести до втрати сигналу та зменшення точності визначення координат.

Детальний аналіз та розуміння цих факторів є критичним для подальшого розвитку системи визначення координат та покращення її точності. Оптимізація технічних параметрів сенсорів, вдосконалення алгоритмів обробки даних та врахування усіх можливих впливів дозволить зменшити помилки вимірювань та забезпечити більш точне визначення координат.

Розглянемо приклад використання фільтра Калмана для покращення точності визначення координат на основі порівняльного аналізу різних сенсорів.

Нехай ми маємо систему, що включає в себе інерційні сенсори (акселерометр та гіроскоп), оптичні сенсори та глобальні навігаційні супутники (GNSS). Кожен з цих датчиків має свої переваги та недоліки, і для зменшення похибок у визначенні координат дані необхідно об'єднати за допомогою фільтра Калмана.

Точність координат на картах точно не визначена. Карти можуть бути 2D, 2.5D або 3D. Вони можуть складатися з серії точок, що відображають траєкторію руху або форму місцевості, або з серії клітинок, що показують порожні або зайняті ділянки. Також можна використовувати топологічні карти, де кожен об'єкт належить до певної групи інших об'єктів. Це створює різні підходи до вирішення проблеми, кожен з яких спрощує або ускладнює завдання.

1.3 Постанова завдань цієї роботи.

Метою дослідження є підвищення ефективності роботи системи навігації та методів побудови карт з використанням пакету Robot Operating System (ROS) за рахунок оптимального вибору наносенсорів.

Спочатку, потрібно врахувати різні типи сенсорів, такі як глобальні навігаційні супутники (GNSS), інерційні сенсори, оптичні сенсори та інші,

які використовуються для визначення координат. Важливо ретельно проаналізувати технічні характеристики та обмеження кожного типу сенсора. Далі, необхідно визначити фактори, які впливають на точність визначення координат, такі як атмосферні умови, обмеження області вимірювань, та ефекти взаємодії сенсорів. Це включає вивчення взаємодії різних сенсорів у системі та розробку механізмів їхнього об'єднання.

Зокрема, важливим етапом є створення віртуального алгоритму визначення координат, який враховує дані від сенсорів та фактори, що впливають на точність. Цей алгоритм повинен бути гнучким та налаштовуваним для різних умов дослідження.

Завершальним етапом є аналіз отриманих результатів та вивчення, як кожен фактор впливає на точність визначення координат. На основі аналізу розробити висновки та рекомендації, спрямовані на удосконалення системи визначення координат враховуючи потужність сигналу, чутливість датчика та середовище в якому поширюється випромінювання.

2 ВИБІР ТА АНАЛІЗ НАНОСЕНСОРІВ ДЛЯ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ

Представлено основні типи сенсорів, що використовуються для вирішення проблеми створення наносенсорної системи. Проаналізовано їх переваги та недоліки. Зроблено вибір сенсора для реалізації навігаційної системи.

2.1 Роль наносенсорів у системах супутникової навігації

Супутникові системи працюють, приймаючи радіосигнали від супутників на навколоземній орбіті. Порівнюючи час затримки сигналів від різних супутників, можна обчислити координати. Наразі найпоширенішими супутниковими навігаційними системами є GPS та GNSS.

Наносенсори в супутникових навігаційних системах займають центральне місце, граючи важливу роль у покращенні їхньої точності, чутливості та функціональності. Їхня роль протягом останніх років стала особливо значущою, оскільки вони дозволяють досягти високої ефективності та надійності в супутникових системах навігації.

Однією з ключових переваг наносенсорів є їхня висока точність та чутливість. Вони здатні забезпечити більш детальні та точні вимірювання руху та положення, що є критичним для сучасних вимог до навігаційних систем. Це особливо важливо в умовах, де потрібна велика точність, така як авіація, морська навігація або робототехніка.

Мініатюризація також є важливим фактором, де наносенсори виявляють свою силу. Завдяки їхнім компактним розмірам можливе створення більш ергономічних та менших супутникових приймачів і приладів, що сприяє зниженню ваги та об'єму цих систем.

Наносенсори дозволяють покращити енергоефективність супутникових систем, оскільки багато з них володіють низьким споживанням енергії. Це

забезпечує можливість тривалої автономної роботи, що є важливим для застосувань, де доступ до джерел енергії обмежений.

Також варто відзначити, що наносенсори дозволяють супутниковим системам працювати в екстремальних умовах, таких як високі чи низькі температури, де інші технології можуть бути менш ефективними.

Завдяки наносенсорам в супутникових системах навігації досягається не лише покращення основних технічних параметрів, але і створюється фундамент для інновацій в області захисту від сигналових спотворень та підвищення стійкості систем у сигнально-обмежених середовищах.

Усі ці аспекти взаємодії наносенсорів із супутниковими системами навігації допомагають створювати сучасні, ефективні та надійні технології для різних галузей, де точність та доступність навігаційної інформації мають вирішальне значення.

2.2 Використання технології стереоскопії для визначення координат

Стереоскопічні відеосистеми широко використовуються для таких завдань, як розпізнавання образів і спостереження. Розглянемо простий принцип роботи таких систем. На рисунку 2.1 зображено ідеальну стереоскопічну систему.

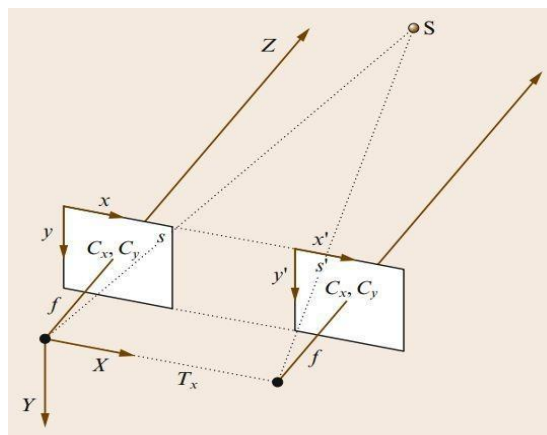


Рисунок 2.1 – Схема найпростішої стереоскопічної системи

Розглянемо систему отримання координат точки S у сферичних координатах XYZ за допомогою стереоскопічної системи. Відомі координати C_x, C_y центрів фокальної площини камери; фокусна відстані f і відстань T_x між центрами. Точки s і s' є координатами проекції точки S на рамки xu і $x'u'$. Зазвичай координати y і y' точок s і s' рівні. Відмінність в координатах x називається неспівпаданням.

Проекції 3D точки на фокальну площину може бути виражена як перетворення, тобто з допомогою проєцируємої матриці однієї з камер, позначеної P .

$$P = \begin{pmatrix} F_x & 0 & C_x & -F_x T_x \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

де F_x та F_y фокальні довжини зображень, а C_x та C_y – оптичні центри.

Тоді

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

де $(x/z, y/z)$ – координати точок зображення.

Координати точки S можна отримати за допомогою матриці проєкцій Q .

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -C_x \\ 0 & 1 & 0 & -C_y \\ 0 & 0 & 0 & F_x \\ 0 & 0 & -1/T_x & (C_x - C_x')/T_x \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Так як невідповідність дорівнює $d = x - x'$, отримаємо наступні значення

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

де $(X/W, Y/W, Z/W)$ – координати точки S які ми шукали.

2.3 Аналіз далекомірних приладів як частини системи навігації

Як частини системи навігації виділяють наступні прилади:

а) лазерні далекоміри (LIDAR) - це датчики для вимірювання відстаней, які використовують для цього лазерний промінь. Існує три основні типи LIDAR:

- модуляційний далекомір (modulation range sensor) – лазерні далекоміри, які генерують амплітудно-модульовані або частотно-модульовані безперервні лазерні сигнали. Відстань до цілі оцінюється шляхом обчислення різниці фаз між переданим і прийнятим сигналами.;



Рисунок 2.2 – Модуляційний далекомір

- триангуляційний далекомір (triangulation range sensors) - побудований за принципом створення стереоскопічних систем (рис 2.3);

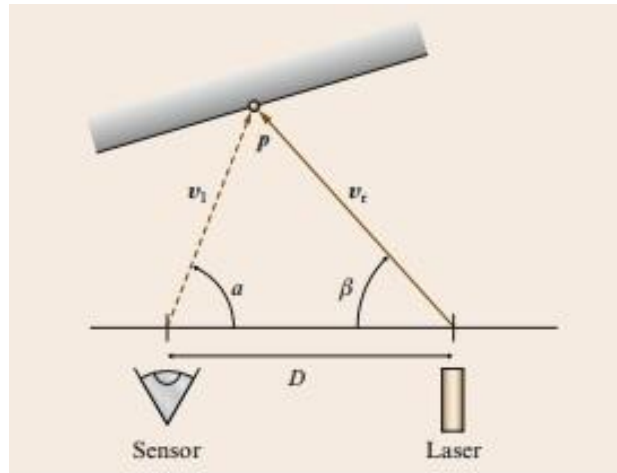


Рисунок 2.3 – Схема роботи триангуляційного лазерного далекоміра

Лазерний промінь створює точку світла, а датчик визначає положення цієї точки світла; координати точки можна обчислити, знаючи взаємне розташування двох датчиків.



Рисунок 2.4 – Триангуляційний лазерний далекомір

- далекоміри TOF – це тип лазерних далекомірів, які широко використовуються в робототехніці. Основний принцип роботи цього датчика дуже простий: лазерний промінь випромінюється від випромінювача в цільову

область, потрапляє на перешкоду, відбивається і потрапляє на приймач. Знаючи час(t) між передачею і прийомом сигналу, можна визначити відстань до перешкоди: $R = c \times t / 2$.

Вимірювання, отримані далекоміром, називаються скануванням. Сканування може бути як 2D, так і 3D. Розглянемо найпростіший 2D TOF-далекомір. Лазерний промінь, випромінюваний випромінювачем, потрапляє на дзеркало, що обертається, яке відбиває промінь у потрібному напрямку. Таким чином можливо отримати двовимірний зріз простору і відобразити сканування у вигляді таблиці з двома стовпчиками: перша колонка – напрямок, наприклад, від 0° до 160° ; друга колонка – вимір відстані у відповідному напрямку. Стандартна роздільна здатність LIDAR – коливається від $0,175^\circ$ до $0,5^\circ$. Наприклад, SICK LMS 200 робить переріз на 180° всього за 0,05 секунди і виконує 720 вимірювань.

б) ультразвуковий ехолот. Розглянемо Polaroid 6500, типовий приклад імпульсного ехолота. Передавач передає звукові імпульси з частотою 49,4 кГц і 16 циклами. Потім, після короткої затримки, передавач перемикається в режим прийому.

Припустимо, що приймач отримує відлуння, тривалість якого за часом перевищує поріг τ , тоді $r = tm \times c / 2$, де $c = 343$ м/с.

Варто зазначити, що було проведено ряд досліджень, які детально описують фізичні властивості ультразвукового випромінювання, поведінку звукових хвиль при зіткненні з різними перешкодами, відлуння, що виникає в результаті, а також взаємодію і поведінку декількох звукових систем. Ультразвукові датчики наразі є одним з найпоширеніших і недорогих рішень для 2D-навігації мобільних роботів..

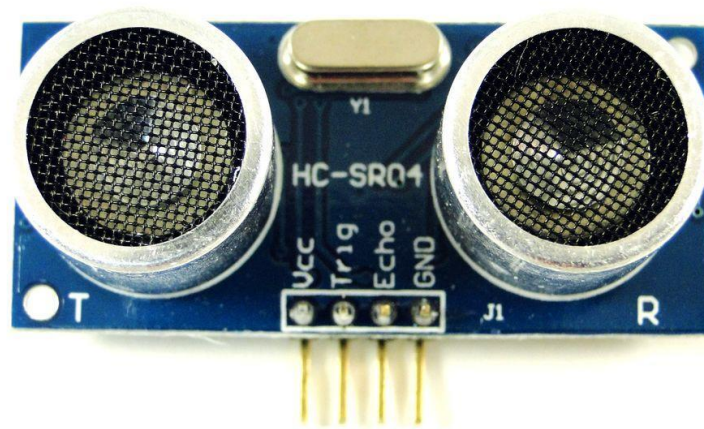


Рисунок 2.5 – Ультразвуковий ехолот

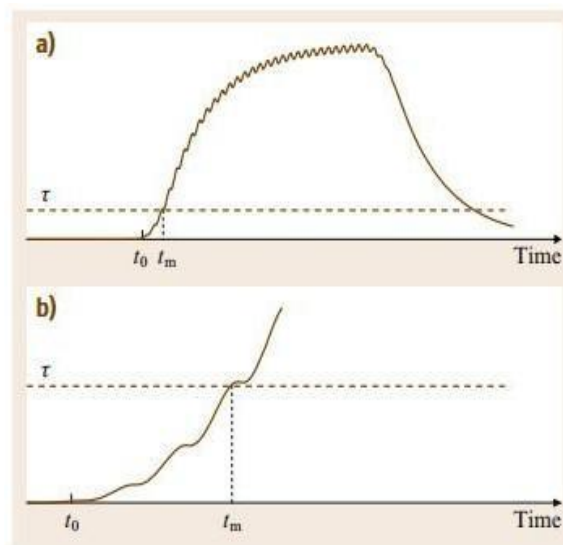


Рисунок 2.6 – Процес прийому сигналу ультразвукового ехолоту

2.4 Дослідження методів визначення координат за допомогою системи навігації

Наведемо основні датчики для системи:

- супутникова навігація (GPS, GNSS);
- стереоскопічні відеосистеми;
- далекометричні прилади.

Окремо розглянемо основні принципи роботи датчиків, які входять до побудови платформи.

Датчики положення, прискорення та швидкості:

а) датчик кута повороту (енкодер). Енкодер - це електромеханічний пристрій, який можна використовувати для визначення положення обертового вала (шпинделя). У цьому пристрої механічні рухи перетворюються в електричні сигнали, які визначають положення об'єкта і надають інформацію про кут повороту, положення і напрямок обертання вала. Енкодери також можна використовувати для вимірювання довжини, відстані та переміщення.

Існує два типи енкодерів: інкрементні та абсолютні.

Інкрементні енкодери - це пристрої, які визначають кут повороту обертового об'єкта шляхом передачі імпульсного цифрового коду. Вони використовуються для визначення швидкості обертання вала (осі), коли немає необхідності зберігати абсолютне кутове положення при вимкненому живленні. Іншими словами, якщо вал нерухомий, передача імпульсів припиняється. Іншими словами, при увімкненні цього типу енкодерів відлік кутового повороту починається з нуля, а не з кута, встановленого до вимкнення живлення. Основні переваги інкрементних енкодерів полягають у тому, що вони прості, надійні та відносно недорогі..



Рисунок 2.7 – Інкрементний оптичний енкодер

Абсолютні енкодери генерують різний цифровий код для кожного положення об'єкта, що є безумовною перевагою цього типу енкодерів, оскільки в разі відключення живлення або рятувальних робіт можна визначити кут повороту валу і не повертати об'єкт у вихідне положення. Оскільки кут повороту завжди відомий, лічильник імпульсів не потрібен. Точне вирівнювання валу не потрібне, оскільки на сигнали абсолютних енкодерів не впливають перешкоди або вібрація.

Залежно від принципу роботи розрізняють оптичні, магнітні, механічні та оптичні енкодери з послідовним виходом:

- конструкція оптичного енкодера (рис. 2.8) складається зі спеціального оптичного диска, світлодіода і світлового детектора. Диск з нанесеною оптичною шкалою (поверхня диска складається з прозорих і непрозорих частин) жорстко закріплений на валу. Коли об'єкт обертається, спеціальний фотодетектор зчитує інформацію і перетворює її в електричні імпульси.;

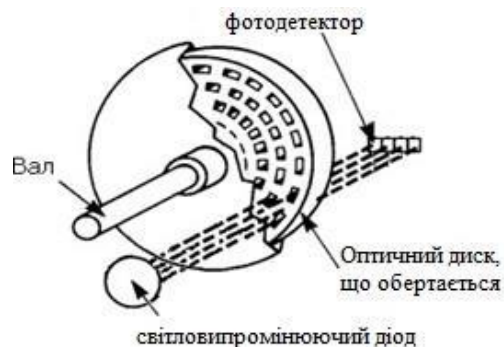


Рисунок 2.8 – Структурна схема оптичного енкодера

- магнітні енкодери з високою точністю реєструють проходження магнітних полюсів обертового магнітного елемента на невеликій відстані від чутливого елемента і перетворюють цю інформацію у відповідний цифровий код.;

- діелектричний або скляний диск з опуклими, провідними або непрозорими частинами, залежно від конструкції пристрою. Абсолютний кут повороту диска визначається лінією перемикачів або контактів у випадку

механічних схем або лінією оптичних пар у випадку оптичних схем. Вихідний сигнал кодується сірим кольором для усунення неоднозначності в інтерпретації сигналу.

Енкодер з'єднується з корпусом, що обертається, за допомогою суцільного або порожнистого валу. Порожністі вали можуть бути наскрізними або тупиковими. Вал датчика з'єднується з валом об'єкта за допомогою еластичної або жорсткої муфти. Крім того, якщо датчик має порожнистий вал, вал датчика з'єднується безпосередньо з валом об'єкта. У першому випадку можливі неспівпадіння компенсуються деформацією гнучкої втулки. У другому випадку датчик може бути закріплений штифтом.

б) датчики прискорення. Датчики прискорення - це датчики, які вимірюють проекцію прискорення (різницю між фактичним прискоренням об'єкта і прискоренням сили тяжіння). Як правило, акселерометри являють собою прецизійні маси, закріплені на пружному підвісі.

Залежно від конструкції акселерометри поділяються на однокомпонентні, двокомпонентні та трикомпонентні. Таким чином, вони можуть вимірювати проекцію видимого прискорення по одній, двох або трьох осях.

Деякі акселерометри мають інтегровану систему збору та обробки даних. Це дозволяє створити повноцінну систему з усіма елементами, необхідними для вимірювання прискорення і вібрації.

Важливою характеристикою акселерометрів є те, що вони чутливі до всіх зовнішніх сил, включаючи силу тяжіння. Акселерометри можна розділити на механічні та п'єзоелектричні. Механічні акселерометри являють собою прецизійні маси, встановлені на пружному підвісі. При наявності видимого прискорення інформація про величину цього прискорення отримується при зміщенні маси з початкового положення. П'єзоелектричні акселерометри засновані на властивостях певних кристалів, які виробляють напругу під дією

зовнішньої сили. Вимірюючи цю напругу, можна визначити прискорення системи;

в) гіроскоп. Гіроскоп - це пристрій, здатний реагувати на зміну азимутального кута об'єкта, встановленого відносно інерціальної системи відліку. Для навігаційних задач використовують механічні та коливальні (мікроелектромеханічні системи - МЕМС) гіроскопи.

Серед механічних гіроскопів виділяють поворотні гіроскопи - це тверді тіла, що швидко обертаються, вісь обертання яких може вільно змінювати напрямок у просторі. При цьому швидкість обертання гіроскопа значно перевищує швидкість обертання осі обертання. Головною особливістю такого гіроскопа є те, що за відсутності зовнішніх силових моментів він може зберігати фіксований напрямок осі обертання в просторі і ефективно протистояти впливу зовнішніх силових моментів. Ця властивість значною мірою залежить від величини власної кутової швидкості обертання гіроскопа.

Принцип дії вібраційного гіроскопа заснований на дії сили Коріоліса на об'єкт, що вібрує. Якщо об'єкт коливається з відомою швидкістю $v(t)$, лежить на площині обертання, і вісь обертання перпендикулярна до осі коливань, то прискорення Коріоліса визначається як $a = 2[\Omega \times v]$. Знаючи закони коливань і вимірявши a , можна визначити кутову швидкість Ω .

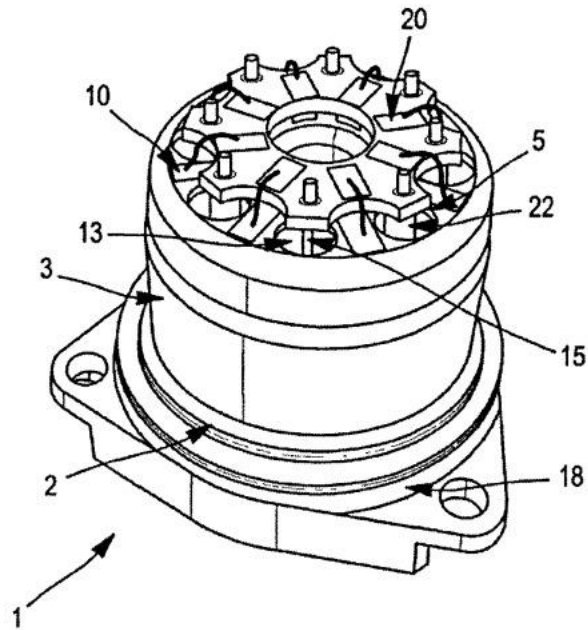


Рисунок 2.9 – Вібраційний гіроскоп

Для цього гіроскоп (1) містить основу (2), резонатор (3), що має корпус (4), по суті, циліндричної форми, що закінчується з боку, протилежної основи (2), дистальним торцем (5), в якому виконано щонайменше принаймні один наскрізний отвір (13), безліч п'єзоелектричних елементів (10), що контактують з резонатором (3), модулі (18) управління/обробки встановлені, щонайменше частково, в підставі (2), і щонайменше один з'єднувальний провідник (15), що проходить через зазначений отвір (13) у корпусі (4) резонатора (3) і електрично з'єднує зазначені модулі (18) та п'єзоелектричні елементи (10) для управління вібрацією резонатора (3) та вимірювання вібраційних сигналів.

2.5 Переваги та недоліки різних типів наносенсорів

Нижче наведено у таблиці 2.1 основні переваги та недоліки розглянутих типів датчиків.

Таблиця 2.1- Зведена таблиця переваг та недоліків датчиків

Датчики	Переваги	Недоліки
---------	----------	----------

1	2	3
Гіроскоп	Може вимірювати як кут повороту та швидкість, так і момент. Не взаємодіє з довкіллям.	Потребують калібрування.
Енкодер	Простий та дешевий датчик. Багато готових варіантів використання. Не взаємодіє з довкіллям.	Використовується лише для вимірювання кута повороту та швидкості. Не враховують ефекту прослизання.

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Акселерометр	Не взаємодіє із навколишнім середовищем	Використовується лише для отримання прискорення. Потребують калібрування.
Супутникова навігація	Глобальна система, яка дозволяє визначати координати будь-якої точки планети.	Мінімальна точність вимірювань. Ускладнення роботи у закритих приміщеннях
	Не взаємодіє з довкіллям	Точність вимірювання залежить від відстані. Складність алгоритмізації

Лазерні далекоміри	Побудова 2D та 3D карт Відмінна точність вимірювань. Хороша кутова роздільна здатність сканів. Швидкий збір даних. Велика дальність вимірювання	Помилкові обчислення при попаданні променя на дзеркальну поверхню, що добре відбиває. Найдорожчий із усіх видів сенсорів.
-----------------------	--	---

Далі наведено чисельні параметри датчиків у таблиці 2.2 для побудови карт місцевості.

Таблиця 2.2 -Зведена порівняльна таблиця чисельних властивостей датчиків

Властивості	Тип датчика				
	Системи супутникової навігації	Стереосистем і відеокамер	Ультразвуков ий сонар	Лазерний далекомір	
				2D	3D
Тип	активний	пасивний	активний	активний	активний
1	2	3	4	5	6
Точність вимірюванн я відстані	від 3 – 5м до 50м	10см	20см	10мм	5см

діапазон вимірів	—	1 – 50м	1 – 5м	0 – 80м	0 – 120м
Частота отримання відстані	—	10 – 30Гц	100Гц	75Гц	15Гц
Можливість побудови 3D мапи	Так	Так	Ні	Ні	Так

2.6 Вибір та обґрунтування використання конкретних наносенсорів

2.7

Оскільки передбачається розробка універсальних автономних систем керування, то в якості датчиків параметрів руху можуть бути використані стандартні пристрої. Якщо вони недоступні, необхідно встановити комбінацію датчиків для визначення всіх параметрів (переміщення, швидкості і прискорення), для чого можна використовувати комбінацію енкодера і акселерометра або універсальний гіроскопічний датчик.

Супутникові навігаційні системи можна використовувати лише як додаткове джерело інформації про місцезнаходження робота на відкритому повітрі, оскільки вони не забезпечують необхідної точності.

Використання стереокамер для навігації також недоцільно, оскільки вони не забезпечують необхідної точності вимірювань і надійності через можливі зміни в освітленості робочого середовища.

Тому у якості основного датчика був обраний багатоцільовий мініатюрний інерційний датчик OS3D-10. OS3D-10 від компанії Inertial Labs – це датчик, призначений для визначення елементів орієнтації (курсу, кутів крену і тангажа) в масштабі реального часу. Пристрій містить три типи чутливих елементів: тривісні MEMS гіроскопи, тривісні високоточні MEMS-акселерометри і магнітометри Fluxgate. OS3D-10 також оснащений вбудованим процесором і вбудованими алгоритмами обчислення елементів орієнтації, що дозволяє інтегрувати датчик безпосередньо в систему без взаємодії з ПК. На додаток до цього, датчик має вбудовані алгоритми калібрування магнітометрів.



Рисунок 2.10 – OS3D-10 багатоцільовий мініатюрний інерційний датчик

Обрано багатоцільовий мініатюрний інерційний датчик для вимірювання руху та орієнтації системи, оскільки він є компактним та може надавати деталізовані дані при невеликому розмірі. Однак під час експериментів виявлено, що в деяких випадках його точність може бути обмеженою, особливо при великих лінійних швидкостях руху або поворотах.

З метою покращення його роботи та забезпечення більш точних вимірів величини переміщення, було запропоновано інтегрувати лазерний далекомір. Як показано в таблицях 2.1 і 2.2, лазерний далекомір був обраний як додатковий інструмент для навігації, оскільки він має найбільший діапазон вимірювання, найшвидшу швидкість збору даних і найвищу точність серед

інших датчиків. Лазерний далекомір здатний точно вимірювати відстані, що дозволяє покращити визначення переміщення та положення системи, особливо на великих відстанях.

Такий підхід дозволяє скоригувати можливі похибки, які можуть виникнути в результаті недостатньої точності інерційного датчика в певних ситуаціях. Інтеграція лазерного далекоміра може значно покращити здатність системи визначати своє місцезнаходження та орієнтацію, забезпечуючи більш точні та надійні дані для подальших операцій і управління.

Wenglor PNBC008 може поставлятися як лазерний далекомір. Лазерний датчик відстані Wenglor PNBC008 - це надійне рішення, яке можна використовувати в різних галузях промисловості.

Датчик підключається через роз'єм m12 і має аналогові вихідні сигнали зі струмами від 4 мА до 20 мА і напругою від 0 В до 10 В. Додатковий цифровий вихід 4хrpr/prp. Напруга від 15 DC до 30 DC. Оснащений інтерфейсом Ethernet tcp/ip для дистанційної передачі сигналу і використання в автоматизованих вимірювальних системах. Джерело випромінювання - лазер.

Далекомір розміщений в міцному прямокутному корпусі з алюмінію..



Рисунок 2.11 – Лазерний далекомір Wenglor PNBC008

На схемі нижче показана схема цього датчика, де 1 – випромінювальний діод, 2 – приймальний діод і 3 – М4 з обох боків:

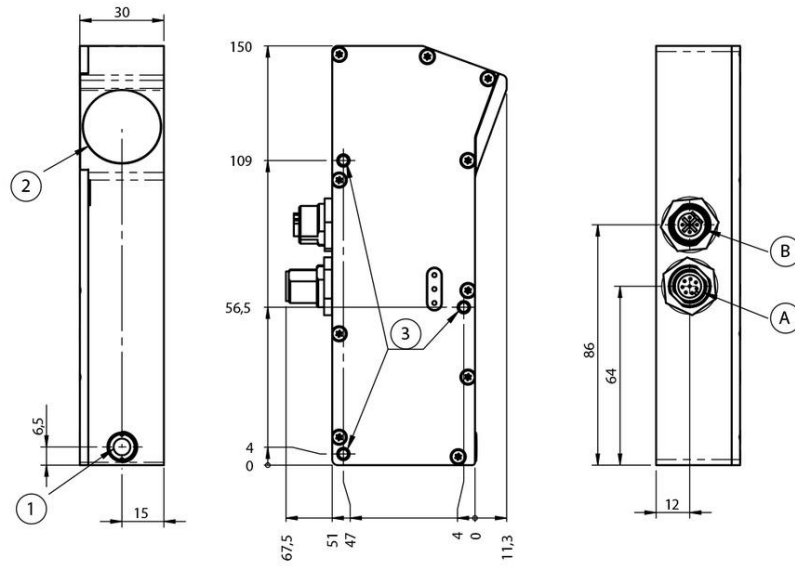


Рисунок 2.12 – Креслення лазерного далекоміру Wenglor PNBC008

Розділ присвячено вибору елементної бази, за допомогою яких будується система навігації. Проаналізовано переваги та недоліки різних типів датчиків, що дозволяє при виборі наносенсорів врахувати особливості, які можуть впливати на покращення якості вимірювання платформи.

3 СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ З НАНОСЕНСОРАМИ

Через існуючу проблему трудомісткого тонкого налаштування навігаційних систем, розробники та інженери спочатку візуалізують свої проекти в програмному середовищі, щоб підвищити продуктивність.

3.1 Засоби візуалізації та обробки даних системи навігації з використанням наносенсорів

Пакети Amcl 2, Gazebo і Rviz, які є частиною фреймворку Robot Operating System, що використовується в цьому дослідженні, були використані як інструменти візуалізації роботів і робочого середовища.

Gazebo дозволяє моделювати фізичні властивості мобільних роботів і робочого середовища, а також показання різних датчиків.

Rviz дозволяє створювати віртуальні моделі роботів і візуалізувати дані з датчиків, карти і маршрути.

Amcl реалізує сервер для отримання статичних карт і позиціонування робота на них.

3.2 Віртуальна модель системи навігації з інтеграцією інформації від наносенсорів

Було створено віртуальну модель чотириколісного робота з параметрами, наведеними в таблиці 3.

Таблиця 3.1- Фізичні властивості 4-колісного робота

1	2
Габарити основи	(0,125 м; 0,3 м; 0,4 м)

Продовження таблиці 3.1

1	2
Маса основи	7 кг
Радіус колеса	0,1 м
Ширина колеса	0,05 м
Маса колеса	0,5 кг
Координати правого переднього колеса	(0,15; -0,175; -0,03125)
Координати правого заднього колеса	(-0,15; -0,175; -0,03125)
Координати лівого переднього колеса	(0,15; 0,175; -0,03125)
Координати лівого заднього колеса	(-0,15; 0,175; -0,03125)
Координати лазерного далекоміра	(0,1; 0; 0,1125)

Таблиця 3.2 Параметри лазерного далекоміра і багатоцільового інерційного датчика.

Маса датчиків	384 г
Мінімальна дистанція вимірювання	0,1 м
Максимальна дистанція вимірювання	20 м
Розширення	12,2 мкм
Термін служби	100 000 г
Діаметр світлової плями	< 1,6 мм

Робот також оснащений датчиком ІМУ для більш точних вимірювань одометрії. Віртуальна модель телеопераційної платформи показана на рисунку 3.1 нижче.

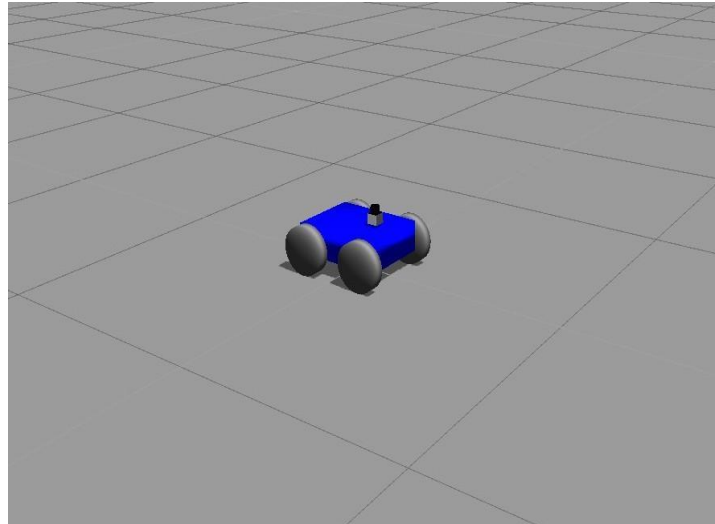


Рисунок 3.1 – Віртуальна модель телекерованої платформи

Нижче показано робоче середовище і початкове положення робота

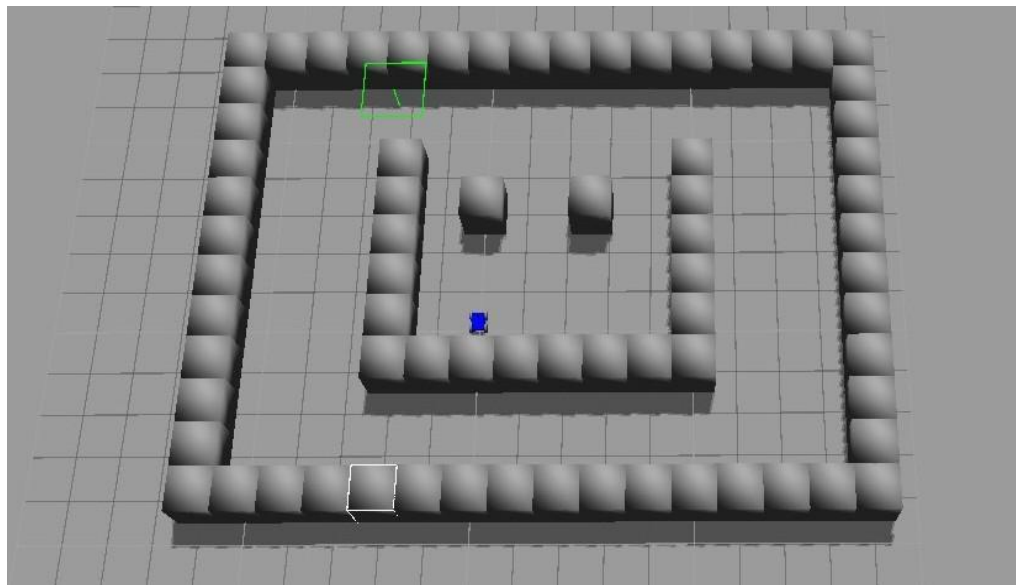


Рисунок 3.2 – Побудова карти для платформи

3.3 Програмне забезпечення для розробки систем навігації з використанням наносенсорів

До програмного забезпечення для розробки телевізійних навігаційних систем висуваються наступні вимоги

- розробник повинен мати можливість створювати допоміжні модулі для вирішення поставленої задачі та тісно пов'язувати їх з іншими модулями, зовнішніми бібліотеками тощо. При цьому процес створення програми повинен бути максимально простим для вирішення поставленого завдання, а не створювати власний менеджер пакетів;

- у телекомунікаційній системі на одній машині може працювати десяток і більше тісно взаємодіючих процесів, тому програмне забезпечення повинно брати цю взаємодію під контроль і максимально полегшувати життя розробника;

- складні системи можуть виконувати багато функцій, наприклад, визначення координат, картографування приміщень на основі даних датчиків, автономна навігація, планування і т.д. Якщо реалізація алгоритмів не є основною метою, краще використовувати готові, сумісні рішення.

З вищезазначених причин ми вирішили використати програмне забезпечення Robot Operating System (ROS), яке вже неодноразово було представлено раніше. Нижче ми розглянемо основні принципи роботи цього програмного забезпечення.

3.4 Robotic Operating System з інтеграцією наносенсорів

ROS - це середовище програмування робототехніки, яке забезпечує функціональність для розподілених завдань. Вперше ROS було розроблено в 2007 році в Лабораторії штучного інтелекту Стенфордського університету під назвою *switchyard*. У 2008 році розробка продовжилася в Науково-дослідному інституті робототехніки/інкубаційному центрі. Розробка продовжилася в Willow Garage, науково-дослідному інституті/інкубаторі робототехніки у співпраці з більш ніж 20 установами.

ROS надає стандартні послуги операційної системи, такі як апаратна абстракція, низькорівневе управління пристроями, реалізація часто використовуваних функцій, передача повідомлень між процесами, управління

пакетами тощо. ROS базується на графовій архітектурі, де обробка даних відбувається на вузлах, які можуть надсилати та отримувати повідомлення один від одного. Вузли, які можуть надсилати та отримувати повідомлення один від одного. Бібліотека орієнтована на Unix-подібні системи (Ubuntu), але підтримка платформ Windows і MacOS також активно розробляється.

Основними перевагами ROS є

- архітектура операційної системи.
- набір пакунків, що підтримується спільнотою (ros-pkg);
- вільне використання в комерційних та дослідницьких проектах.

Базовою одиницею файлової системи є пакет. Кожен пакунок містить бібліотеки, виконувани файли, скрипти тощо. Кожен пакунок має маніфест, що містить короткий опис пакунка, залежності між пакунками та різну мета-інформацію, таку як версія пакунка та ліцензія.

Деякі з введених понять такі:

- вузол - певний процес, який використовує ROS для спілкування з іншими вузлами;
- повідомлення - спеціальний тип даних ROS, який використовується вузлом для публікації або підписки на тему; і
- тема - вузол може підписатися на тему, щоб отримувати повідомлення, або опублікувати тему, щоб надсилати повідомлення;
- master - ім'я служби ROS;
- rosout еквівалентна stdout/stderr.

ROS має ряд інструментів, які допомагають програмістам у процесі розробки та обробці помилок, і легко побачити, як різні процеси в ROS взаємодіють один з одним; пакет Rviz є частиною ROS, а Gazebo є сумісним з ROS.

Зверніть увагу на пакет "tf", який допомагає розробникам спростити завдання перетворення координат. Конфігурація телеопераційної платформи визначається за допомогою системи координат, пов'язаної з різними

частинами робота. tf відстежує положення системи координат і може визначити положення і орієнтацію однієї системи координат відносно іншої в будь-який момент часу (від деякого $t = 0$ до поточного моменту часу). Для цього вузол підписується (публікується) на тему tf і отримує необхідну інформацію.

3.5 Розробка Gazebo-плагіна для створення контролера

Під час виконання Gazebo був створений плагін, який може зчитувати з заголовка `gazebo/cmd_vel` швидкість, що надсилається користувачем, наприклад, через джойстик. Залежно від цієї швидкості контролер передає крутний момент на колеса, щоб робот досягнув певної сумарної швидкості v

Де r - радіус колеса, а c - відстань між центрами коліс (між центрами правого і лівого передніх коліс).;

Тоді:

$$V_{lin} = w_{lin}/r \quad (3.1) \quad V_{rot} = w_{ang} \cdot c/2r \quad (3.2)$$

та швидкості обертання лівого та правих коліс можна записати як

$$V_{lin} - V_{rot} \quad (3.3) \quad V_{lin} + V_{rot} \quad (3.4)$$

відповідно. Ці швидкості правих та лівих коліс повинні наближати швидкість v до w . Однак цього не вдалося досягти.

Довелося змінити модель так:

$$V_{lin} = w_{lin}/r \quad (3.5) \quad V_{rot} = w_{ang} \cdot k \cdot c/2r \quad (3.6)$$

Формула швидкості колеса залишається незмінною.

Коефіцієнти $k = 1,26402$ були розраховані за допомогою методів лінійної регресії зі стандартними помилками $0,01564$ та p -значеннями $< 2,2e-16$ відповідно; дані та R-скрипти, за допомогою яких перевірялася гіпотеза, додаються до статті.

Далі було створено модуль для обробки натискань кнопок джойстика, перетворення їх у лінійну та кутову швидкості та публікації за адресою `/gazebo/cmd_vel`.

Розроблений плагін Gazebo не тільки виконує функцію контролера колеса, але й публікує додаткову інформацію про положення осі колеса та візуалізує його положення (ground truth pose) на платформі телеуправління та в робочому середовищі в середовищі Rviz.

3.6 Розрахунок параметрів навігаційної системи

Одометрія - це використання даних про рух приводу для оцінки переміщення. Одометрія допомагає оцінити положення платформи. Ця оцінка часто використовується в алгоритмах SLAM як початкова оцінка положення і переміщення робота. Стандартна схема одометрії робота полягає у використанні датчиків, які зчитують кут повороту коліс.

Нехай v_x v_y v_θ — швидкість платформи у x , y та θ відповідно, та

$$w_{left} \quad (3.7) \quad w_{right} \quad (3.8)$$

кутові швидкості правого та левого коліс відповідно. Тоді позначим

$$v_{ang} = (w_{right} - w_{left}) \cdot r / c \quad (3.9)$$

$$v_{lin} = (w_{right} + w_{left}) \cdot r / 2 \quad (3.10)$$

та отримаємо, що швидкості платформи дорівнює

$$v_x = v_{lin} \cdot \cos(\theta) \quad (3.11)$$

$$v_y = v_{lin} \cdot \sin(\theta) \quad (3.12)$$

$$v_\theta = v_{ang} \quad (3.13)$$

Таким чином, одометрія є недорогим інструментом з високою короткостроковою точністю і підвищеною частотою дискретизації.

Однак слід зазначити, що при розгляді більш тривалих часових інтервалів похибка орієнтації зростає через накопичення помилок, які збільшуються пропорційно до відстані, пройденої роботом.

Джерела похибок.

- похибки вимірювання радіусів коліс;
- різні розміри коліс (для роботів з декількома колесами);
- помилки підрахунку імпульсів від енкодера;
- нечаста обробка одометрії.

Під час експериментів було виявлено, що дані одометрії недостатньо точні, коли лінійна швидкість висока або коли робот обертається навколо осі. Тому було вирішено обмежити швидкість платформи до 2 м/с і використовувати додатковий датчик IMU. Дані одометрії та датчика IMU були оброблені за допомогою програми `robot_pose_ekf` (пакет ROS), яка використовує розширений фільтр Калмана для отримання остаточних даних одометрії.

3.7 Моделювання компенсації помилок визначення координат

Розширений фільтр Калмана (ЕКФ) є алгоритмом, призначеним для оптимальної оцінки стану системи в умовах нестійкості та шумів вимірювань.

Спочатку, нам необхідно визначити математичну модель системи, що включає в себе динаміку руху робота та вимірювання IMU. Ця модель дозволяє передбачити, як система повинна реагувати на зовнішні впливи.

На другому етапі використовується прогноз стану системи. Ми використовуємо динамічну модель для прогнозування, яким буде стан системи наступного часового кроку. При цьому враховуються інформація від одометрії та IMU, що дозволяє покращити точність прогнозу.

Після цього відбувається оновлення стану системи. Реальні виміри отримуються з одометрії та IMU, і з них обчислюється калманівський зигзаг

(Kalman gain), який використовується для корекції прогнозованого стану системи. Оновлення стану відбувається, враховуючи інформацію від отриманих вимірів.

Крім того, проводиться корекція внутрішніх похибок моделі та вимірювань для подальшого підвищення точності. Розширений фільтр Калмана ефективно працює в умовах, коли система має нелінійну динаміку, що може відбутися при великих лінійних швидкостях та поворотах робота, і він може ефективно керувати цією нестійкістю.

Відхилення від істинної координати підпорядковується Гауссовому нормальному закону розподілу. Середньоквадратичне відхилення (3.14) має такий вигляд. У формулу входять усі характеристики датчиків та роботи всієї системи. За наш основний датчик ми взяли багатоцільовий мініатюрний інерційний датчик. Середньоквадратичне відхилення порядку 10.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (3.14)$$

На основі математичного моделювання, графік компенсації помилок інерційного датчика має наступний вигляд:

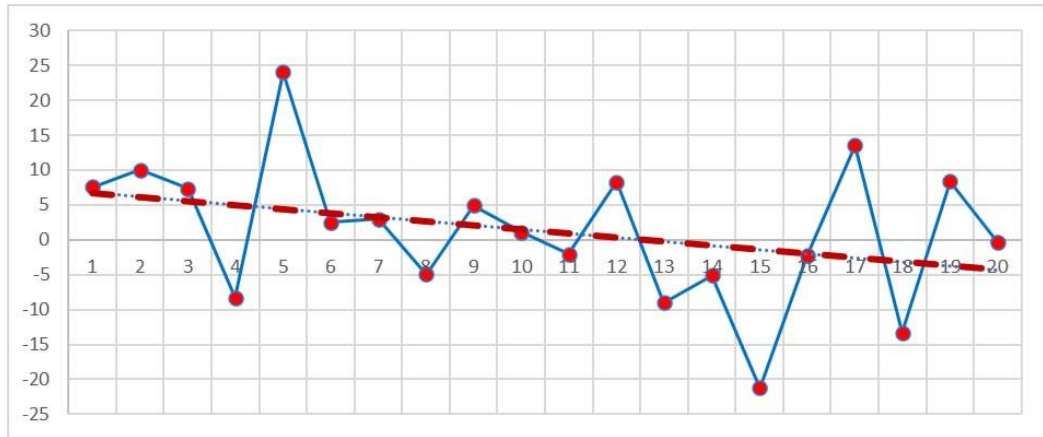


Рисунок 3.3 – Графік компенсації помилки Калмана багаточільового інерційного датчика

Для зменшення СКВ у 10 разів додатково використовується лазерний далекомір. Тоді фільтрація Калмана має наступний вигляд:

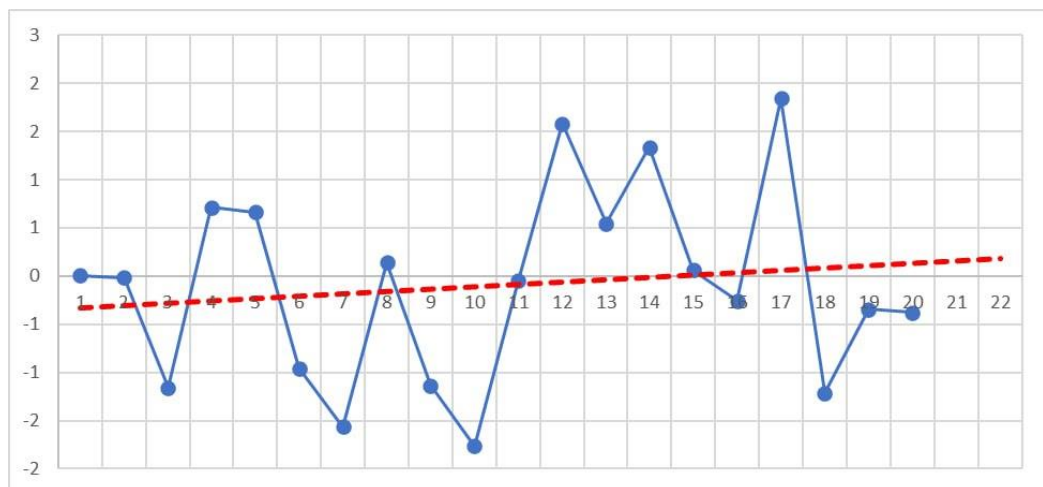


Рисунок 3.4 – Графік компенсації помилки Калмана багаточільового інерційного датчика з лазерним далекоміром

Висновок до розділу. Характеристики ефективності роботи навігаційної платформи залежать в точності визначення координат. Процес визначення координат залежить від параметрів обраних датчиків.

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ З НАНОСЕНСОРАМИ

Після створення контролера навігаційної системи та модуля оцінки одометрії було створено модуль для автономної навігації мобільного робота. У цій роботі використовується функціонал ROS, який забезпечує вирішення цієї задачі за допомогою пакету `move_base`. Крім того, у статті описано якість та конфігурацію цього пакету керування.

4.1 Пакет `move_base` з інтеграцією наносенсорів

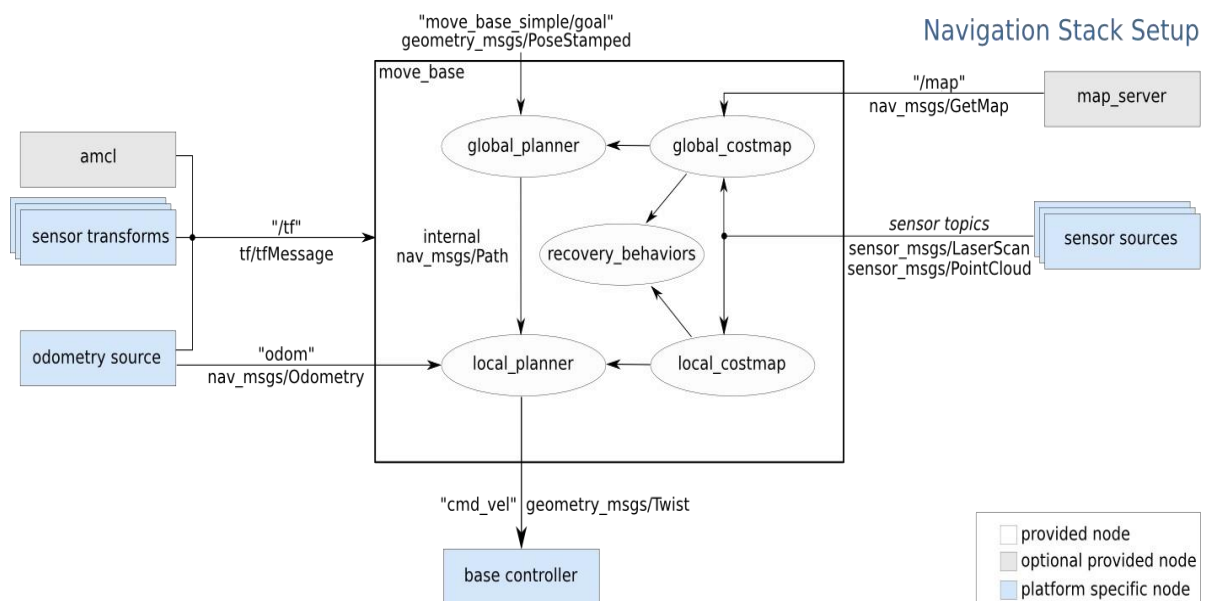


Рисунок 4.1 – Схема конфігурації пакета `move_base`

Тепер розглянемо компоненти цієї схеми:

- карта (`map_server`). вузол `map_server` надає на вхід карту РО, яка використовується для генерації `global_costmap` (глобальної карти перешкод);
- `odometry_source`. `base_link` - система координат, пов'язана з роботом, а `odom` - система координат, в якій рухається ПА;

Також враховуються розрахунки фільтра Калмана.

- координати мобільного робота (`amcl`, сенсорне перетворення). Необхідно використовувати алгоритм типу Адаптивне Монте-Карло (`amcl`): `map` → `odom` → `base_link`. Він забезпечує таке ж перетворення в `tf`, як і `amcl`, але на відміну від останнього, використовує дані з симуляції про картографічне положення робота, так що обчислення можуть бути збережені в джерелах.

- `sensor_source`. використовується для створення `local_costmap`, що використовується програмним забезпеченням для забезпечення руху ПА на маршруті;

- `global_planner`, з інтерфейсом `nav_core::BaseGlobalPlanner`, що використовується планувальником маршруту. Одним з таких планувальників є `navfn`. Він використовує алгоритм Дейкстри для обчислення мінімального шляху від початкової точки до кінцевої;

- `local_planner`. `nav_core::BaseLocalPlanner` надає інтерфейс, який використовується локальним планувальником. `base_local_planner` є одним з плагінів, який використовує цей інтерфейс. Цей пакет забезпечує реалізацію методів TRA (Trajectory Rollout approach) та DWA (Dynamic Window approach) для локальної навігації робота на літаку. Він приймає на вхід карту маршруту і витрат, а на виході видає швидкість.

4.2 Поведінка системи навігації з урахуванням інформації від наносенсорів

move_base Default Recovery Behaviors

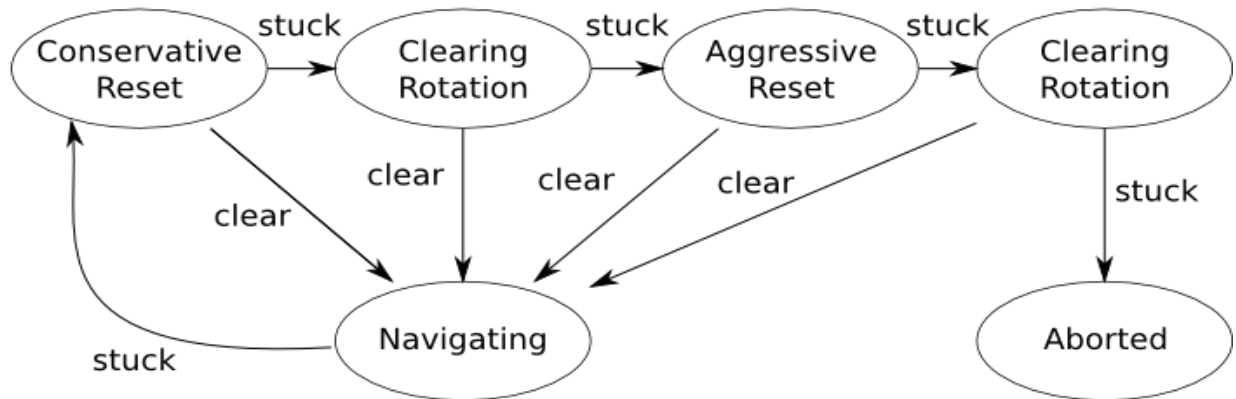


Рисунок 4.2 – Схема поведінки робота при відновленні

При виклику `move_base` намагається гарантувати, що місце призначення користувача буде досягнуто з визначеною користувачем похибкою. Нарешті, `move_base` інформує користувача про те, що пункт призначення досягнуто або про те, що пункт призначення не може бути досягнуто. Якщо робот застрягає, модуль переходить у режим відновлення. За замовчуванням, `move_base` виконує наступні дії для відновлення руху робота:

- а) перешкоди за межами області, визначеної користувачем, видаляються з карти робота;
- б) якщо можливо, робот розвертається на місці, щоб очистити область перед ним;
- в) якщо це також не вдається, область карти, в якій робот може розвернутися, повністю стирається;
- г) потім робот може продовжити поворот.

Якщо будь-який з перерахованих вище варіантів не спрацює, мета вважається недосяжною і місія скасовується. Режим відновлення може бути вільно встановлений користувачем.

4.3 Демонстраційний модуль автономної навігації з використанням інформації від наносенсорів

Для мапування робочого середовища було використано пакет gmapping. Цей пакет використовує Rao-Blackwellised Particle Filters. Ця карта завантажується на map_server і використовується для навігації.

Також було створено демонстраційний модуль (move_base_demo) для пересування автономного мобільного робота. Ця програма працює наступним чином:

- через інтерфейс Rviz визначається поточна ціль платформи;
- створюється маршрут для руху робота;
- модуль надсилає команди контролеру, і робот рухається за маршрутом до цілі;
- рух закінчується, коли робот досягає цілі або вирішує, що ціль не може бути досягнута з будь-якої причини.

4.4 Модуль аварійного керування у разі втрати зв'язку з урахуванням даних наносенсорів

Основний принцип модуля:

- коли оператор керує роботом, його положення зберігається в спеціальній черзі через кожні 1 метрів;
- якщо оператор втрачає контроль над роботом (втрачається зв'язок між роботом і джойстиком/клавіатурою), управління перебирає на себе спеціальний контролер;
- якщо один з пунктів призначення виявляється недосяжним, робот намагається наблизитися до нього якомога ближче і переходить до наступного пункту призначення, якщо в черзі немає вільного місця;
- teleop_tracker - відстежує переміщення робота та заповнює чергу цілей. Він слухає стан зв'язку з оператором і якщо не чекає відповіді протягом

деякого часу (4 секунди для цього робота), то відправляє мішень з цільового в цільовий_контролер, якщо черга не порожня. Якщо оператор повертає контроль над телеопераційною платформою, teleop_tracker надсилає запит до goal_controller на скасування поточної цілі;

- goal_controller отримує ціль від teleop_tracker і надсилає її до move_base, який перевіряє, чи досягнуто ціль, і повідомляє про результат. Якщо контролер отримує запит на скасування поточної мети, goal_controller надсилає аналогічний запит до move_base, автономний рух робота припиняється і управління повертається до оператора.

4.5 Інтеграція програмовано-логічних засобів у систему навігації з урахуванням даних наносенсорів

Вибір процесора є одним з найважливіших факторів при програмуванні логіки та пакету управління для телевізійної платформи. Мікропроцесор PicoBlaze від Xilinx був обраний як найкращий мікропроцесор для ПЛІС.

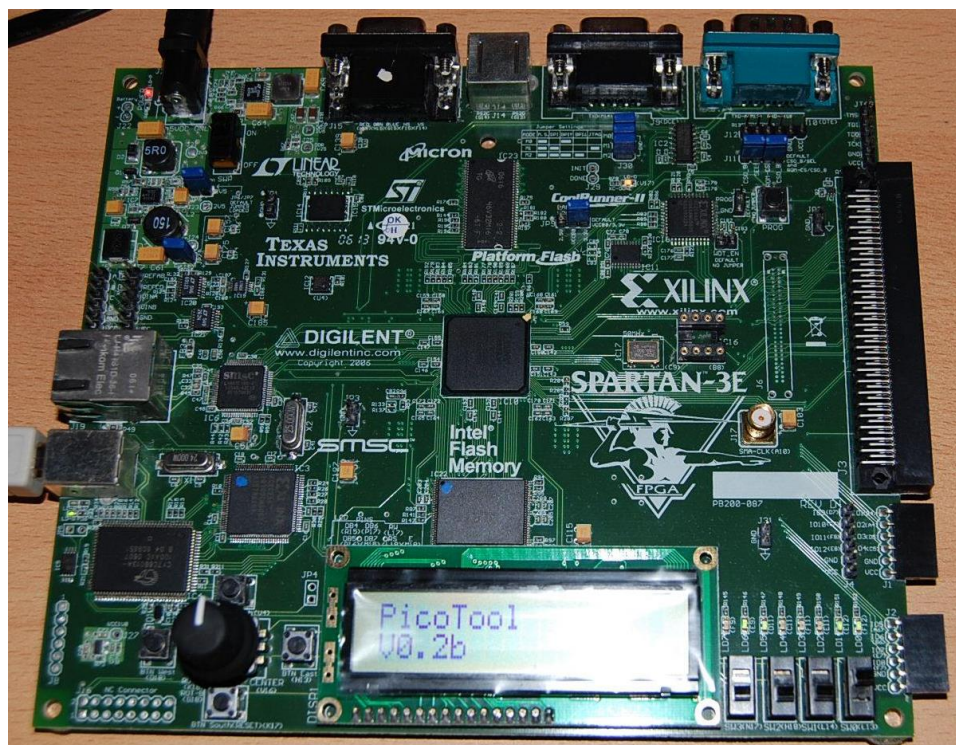


Рисунок 4.3 – PicoBlaze на основі ПЛІС

В якості цільової системи була використана оціночна плата Digilent Spartan-3E™. Внутрішня флеш-пам'ять містить ядро мікроконтролера PicoBlaze і визначення портів для перемикачів, кнопок і послідовних портів.

Також є порт Ethernet для успішної інтеграції лазерного далекоміра і високошвидкісного зв'язку між датчиком і платою. Мікроконтролер має потужний симетричний набір інструкцій, що дозволяє ефективно реалізовувати відображення і одночасно вирішувати робочі алгоритми телеопераційної платформи. Згідно з нашими вимірюваннями, швидкість роботи PicoBlaze приблизно в п'ять разів вища, ніж у стандартних мікроконтролерів (при тактовій частоті ПЛІС 50 МГц).

Як і інші мікроконтролери, PicoBlaze потребує програмування та визначення логіки. На відміну від інших схем ПЛІС, PicoBlaze має відкритий вихідний код і може бути легко адаптований виробниками відповідно до призначення. В даному випадку логіка повинна бути написана для одночасного використання пакету ROS, зчитування даних лазерного далекоміра та картографування; написання на Verilog або VHDL дозволяє одночасно використовувати всі ці додатки. На відміну від багатьох мов програмування, Verilog/VHDL - це мова опису мікроелектронних пристроїв. Тільки за допомогою цих мов можна описати всю логіку роботи мікропроцесора будь-якого покоління.

У нашому випадку ми використовували VHDL для опису PicoBlaze; на відміну від Verilog, VHDL дуже легко взаємодіє з інтегрованими модулями.

```
component kcp3m3 is
  port (
    address      : out std_logic_vector(9 downto 0);
    instruction   : in  std_logic_vector(17 downto 0);
    port_id      : out std_logic_vector(7  downto 0);
    write_strobe  : out std_logic;
    out_port     : out std_logic_vector(7  downto 0);
    read_strobe  : out std_logic;
    in_port      : in  std_logic_vector(7  downto 0);
    interrupt     : in  std_logic;
    interrupt_ack : out std_logic;
    reset        : in  std_logic;
    clk          : in  std_logic
  );
end component;
```

Рисунок 4.4 – Інтегрування лазерного далекоміра на VHDL

Висновок до розділу: Для повної автоматизації платформи був створений пакет `move_base`, який дозволяє автономне керування платформи, у разі втрати зв'язку з оператором.

ВИСНОВКИ

В результаті сертифікаційного дослідження було проаналізовано методи створення навігаційних систем з використанням наносенсорів. Проаналізовано класифікації систем та принципи роботи. Для застосування обрано принцип автономної навігації.

Проаналізовано датчики, необхідні для дистанційно керованої платформи для зондування місцевості. В результаті порівняння таблиць 2.1 та 2.2 для покращення визначення координат було обрано багатоцільовий мініатюрний інерційний датчик OS3D-10 та лазерний далекомір Wenglor PNBC008. Графік корекції помилок Калмана був змодельований математично.

Для візуалізації платформи та робочого середовища були використані пакети Amcl 2, Gazebo та Rviz, які є частиною фреймворку Robot Operating System. В результаті була створена віртуальна модель телеуправляємої платформи та робочого середовища з використанням фреймворку ROS в якості програмного забезпечення робота.

Для повної автоматизації платформи був створений пакет `move_base`, який дозволяє автономно керувати платформою навіть при втраті зв'язку з оператором. Для обробки логіки всієї платформи був обраний мікроконтролер Digilent PicoBlaze FPGA. Мікроконтролер був написаний на мові VHDL.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. M. Tampubolon, L. Pamungkas, H.-J. Chiu, Y.-C. Liu and Y.-C. Hsieh, "Dynamic Wireless Power Transfer for Logistic Robots", *Energies*, vol. 11, no. 527, 2018. Doi: 10.3390/en11030527.
2. Y. Zhang, *Key Technologies of Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer*. Singapore: Springer Theses, 2018.
3. F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, W. Su and C. C. Mi, "A Dual-Coupled LCCCompensated IPT System With a Compact Magnetic Coupler", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 7, pp. 6391-6402, July 2018. Doi: 10.1109/TPEL.2017.2748391
4. G. Vigneaux, M. Cheikh, R. Benbouhout and A. Takacs, "Design and modeling of PCB coils for inductive power charging", Cambridge University Press, vol. 2, no. 2, pp. 143-152, Sep. 2015. Doi: [10.1017/wpt.2015.17](https://doi.org/10.1017/wpt.2015.17).
5. A. Almer Casino and M. Ángel Sempere Vicente, "AUTONOMOUS MEDICAL ROBOT", Bachelor's Degree Project, University of Skövde, Skövde, Sweden 2020.
6. Супутникова навігація: основні принципи роботи. Проблеми та методи їх вирішення Available: https://xn--j1ahb.xn--j1amh/articles/GPS_GLONASS_AGPS_RTK/ Accessed on: May 5, 2022.
7. Створення роботів за допомогою ROS (Robot Operating System) Available: <https://dou.ua/lenta/articles/robots-in-containers/> Accessed on: May 5, 2022.
8. Інтелектуальні роботизовані системи в забезпеченні безпеки життєдіяльності в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/intelektualni-robotizovani-sistemi-v-zabezpechenni-bezpeki-zhittediyalnosti-v-nadzvichaynih-situatsiyah-mirnogo-i-voennogo-chasu> Accessed on: May 5, 2022.

9. Інтелектуальні інформаційні системи : Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів : тези доп., 19–21 лютого 2019 р. / ЧНУ ім. Петра Могили. – Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. – 108 с.
10. V. Chekubasheva, O. Glukhov, O. Kravchuk, V. Rohovets, "Creation of a remote presence robot based on the TI-RSLK development board", II International Advanced Study Conference Condensed Matter and Low Physics, Kharkiv, p. 229.
11. Чижевська М.А. «Побудова транспортної мережі на базі сучасних технологій». Тези доповіді на X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації».- Київ, 12-13 квітня 2018 р.
12. Чижевська М.А. «Основні тенденції сумісного впровадження IoT, VR та AR». Тези доповіді на LIX Міжнародній науково-практичній конференції «Вплив глобалізації на соціально-економічний розвиток» Чернівці, 29-30 квітня 2018 р.
13. О. Глухов, В. Чекубашева, "Реалізація алгоритму EKF SLAM на базі програмного пакету MATLAB", Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті, Харків, 2021, С. 75–76.
14. Кравець І. Г., Глухов О. В., Кравчук О. О., "ВИБІР ТА АНАЛІЗ РОБОТИ ДАТЧИКІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ НАДІЙНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ ТА КОНТРОЛЮ ТЕЛЕКЕРОВАНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ" XXI Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 17-18 травня 2022 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна.
15. Doug Black. Xilinx Says Its New FPGA is World’s Largest. Enterprise AI (21 серпня 2019).
16. Стрелкова Т.А., Лытюга А.П., Калмыков А.С., Кожушко Я.Н. Оптимизация параметров обнаружения параметров обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля воздушного пространства. 12-я

международная научно-техническая конференция «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2019», Минск, 13–15 ноября 2019 г.

17. Стрількова Т.О, Литюга О.П. Формування вихідного сигналу оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном // IX International Conference on Optoelectronic Information Technologies “PHOTONICS-ODS 2020” Ukraine, Vinnytsia, VNTU October 5-7, 2020, pp. 13.

18. Т. А. Strelkova , А. Р. Lytyuga, А S. Kalmykov. Statistical Characteristics of Optical Signals and Images in Machine Vision Systems // Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0. 2021, Pages: 134-162. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch005. Монографія. Chapter 5 in book . IGI Global. USA.

19. Т. Стрількова, [«Розвиток стохастико-детермінованої теорії прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах»](#), дис. доктор., наук, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2017.

20. Т. [Strelkova](#), V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. Strelkov, Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems, in *Developing and Applying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, 2016, pp. 181-206.

21. Стрількова Т. О., Калмиков О. С., Литюга О. П. Визначення ефективності оптико-електронних систем на основі статистичних моделей сигналів. XX Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», 18-19 травня 2021 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна, с. 19.