

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіотехнічних пристроїв та систем

«На правах рукопису»
УДК 004.421.4

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«___» _____ 2020 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Радіотехнічні інформаційні технології»

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Алгоритм підвищення точності локалізації та навігації рухомих
об'єктів»

Виконав (-ла):
студент II курсу, групи РТ-91мп
Путієнко Олександр Миколайович

Керівник:
Доцент, к.т.н.
Чмельов Вячеслав Орійович

Рецензент:
Доцент, к.т.н.
Лащевська Наталія Олександрівна

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні інформаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

« 2 » вересня 2020р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Путієнку Олександрю Миколайовичу

1. Тема дисертації «Алгоритм підвищення точності локалізації та навігації рухомих об'єктів», науковий керівник дисертації Чмельов Вячеслав Орійович, к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від « 05 » листопада 2020 р. № 3223-с

2. Термін подання студентом дисертації: 14 грудня 2020 р.

3. Об'єкт дослідження: локалізація та навігація рухомий об'єктів в середині приміщення та на відкритому просторі.

4. Вихідні дані: рухомий об'єкт є автоматизована автономна рухома платформа, системи навігації, які потрібно застосувати: GPS, інерційна система визначення параметрів руху, оптично-одометрична система. Похибка визначення координат об'єкту в двовимірному просторі складає +/- 0,4 метри. Інтенсивність оновлення навігаційної інформації 0,5с.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Розглянути сучасні підходи до навігації та локалізації рухомих об'єктів

2. Вивчити підходи до забезпечення точності локалізації рухомих об'єктів
3. Дослідити особливості застосування фільтра Калмана та фільтра частинок для отримання комплексної навігаційної інформації
4. Розробити алгоритм підвищення точності локалізації та навігації рухомих об'єктів
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація результатів дисертаційного дослідження.
7. Орієнтовний перелік публікацій _____
8. Дата видачі завдання 2 вересня 2020р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формування проблематики	02.09.2020 - 09.09.2020	
2	Аналіз проблематики	10.09.2020 - 17.09.2020	
3	Аналіз існуючих підходів	18.09.2020 - 24.09.2020	
4	Створення структурної схеми	25.09.2020 - 01.10.2020	
5	Розробка архітектури системи	02.10.2020 - 15.10.2020	
6	Розробка програмного забезпечення	16.10.2020 - 02.12.2020	
7	Маркетинговий аналіз стартап проекту	03.12.2020 - 13.12.2020	
8	Подача МД секретарю комісії	14.12.2020	

Студент

Олександр ПУТІЄНКО

Науковий керівник

Вячеслав ЧМЕЛЬОВ

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки магістерської дисертації становить 90 сторінок, які включають в себе 5 розділів, 37 ілюстрацій, 22 таблиці, 25 бібліографічних найменувань за переліком джерел посилань.

Ключові слова: визначення місця положення, локалізація, навігація, рухомі об'єкти, фільтр Калмана, SLAM, фільтр частинок.

Актуальність теми дослідження.

На сьогоднішній день існує багато автономних роботів, які виконують різноманітні завдання без втручання оператора. Це і автоматичні роботи вантажники, які використовуються на великих фабриках та складських приміщеннях. Це і рухомі платформи які здійснюють перевезення вантажу в сільськогосподарській промисловості. Також сюди можна віднести роботів, що переміщуються по траєкторіях, які були встановлені заздалегідь.

Для виконання автономними рухомими об'єктами таких завдань, перш за все потрібно мати систему навігації та локалізації високої точності для того, щоб уникнути зіткнень, аварій та ситуацій коли рухома платформа взагалі перемістилась в протилежну сторону від бажаної.

В магістерській дисертації пропонується алгоритм локалізації та навігації мобільних платформ, що буде побудований на ідеї комплексування інформації від декількох датчиків за допомогою фільтру Калмана та фільтру частинок з метою підвищення точності.

Мета дисертаційної роботи: розробити алгоритм підвищення точності визначення координат рухомого об'єкту на основі застосування навігаційної інформації від різних джерел первинних даних.

Об'єкт дослідження: локалізація та навігація рухомих об'єктів в середині приміщення та на відкритому просторі

Наукова новизна одержаних результатів: поєднано декілька алгоритмів в один комплексний алгоритм, за рахунок чого підвищена точність та набута

універсальність застосування алгоритму, як всередині приміщень так і на відкритій місцевості.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблений алгоритм дозволяє підвищити точність локалізації та навігації рухомих об'єктів, як в середині приміщень так і на відкритому просторі.
2. Розроблений алгоритм може застосовуватись на рухомих роботизованих платформах, що переміщуються як на відкритому просторі так і в приміщеннях.
3. Розроблений алгоритм дозволяє використання необмеженої кількості таких датчиків первинної інформації як: GPS приймачі, системи LIDAR, енкодери коліс, акселерометрів, гіроскопів, компасів.
4. Розроблений алгоритм не потребує значних обчислювальних потужностей і може бути реалізованим на сучасних мікрокомп'ютерах таких як Raspberry Pi 3 або Nvidia Jetson Nano.

ABSTRACT

Master's thesis «Algorithm for improving the accuracy of localization and navigation of moving objects» consists of 5 sections, 37 illustrations, 22 tables, 25 bibliographic titles according to the list of reference sources.

Keywords: positioning, location, navigation, moving objects, Kalman filter, SLAM, particle filter.

Relevance of the research topic.

Today, there are many autonomous robots that perform a variety of tasks without operator intervention. These are automatic work loaders used in large factories and warehouses. These are mobile platforms that carry cargo in the agricultural industry. Also, there are robots that move along trajectories that have been set in advance.

To perform such tasks on autonomous moving objects, you must first have a high-precision navigation and localization system to avoid obstacles, accidents, and situations where the moving platform has moved in the opposite direction from the desired one.

The master's dissertation proposes an algorithm for localization and navigation of mobile platforms, which will be based on the idea of integrating information from several sensors using a Kalman filter and a particle filter to improve accuracy.

The purpose of the dissertation: to develop an algorithm to improve the accuracy of determining the coordinates of a moving object based on the use of navigational information from various primary data sources.

Object of the research: localization and navigation of moving objects in the middle of the room and in the open space.

Scientific novelty of the obtained results: several algorithms are combined into one complex algorithm, due to which the accuracy and universality of the algorithm application are increased, both indoors and outdoors.

Practical significance of the obtained results:

1. The developed algorithm allows to increase the accuracy of localization and navigation of moving objects, both indoors and outdoors.

2. The developed algorithm can be applied on mobile robotic platforms that move both outdoors and indoors.

3. The developed algorithm allows the use of an unlimited number of such sensors of primary information as: GPS receivers, LIDAR systems, wheel encoders, accelerometers, gyroscopes, compasses.

4. The developed algorithm does not require significant computing power and can be implemented on modern microcomputers such as Raspberry Pi 3 or Nvidia Jetson Nano.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО НАВІГАЦІЇ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ РУХОМИХ ОБ’ЄКТІВ	14
1.1 Сучасні системи навігації	14
1.2 Класифікація алгоритмів SLAM	15
1.2.1 Фільтр Калмана	15
Етап екстраполяції	17
Етап коригування	18
1.2.2 Розширений фільтр Калмана	19
1.2.3 Фільтр частинок	19
1.2.4 Методи локалізації засновані на теорії графів	25
Висновки до розділу	27
РОЗДІЛ 2. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ РУХОМИХ ОБ’ЄКТІВ	28
2.1 Трекінг за допомогою одометрії	28
2.2 Інерційний метод локалізації	32
2.2.1 Акселерометр	34
2.2.2 Гіроскоп	34
2.2.3 Компас	35
2.3 Оптична одометрія за допомогою орієнтирів.	35
2.4 Супутникова навігація	36
2.5 Локалізація за допомогою карти	38
Висновки до розділу	40
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ РУХОМИХ ОБ’ЄКТІВ	41
3.1 Середовище розробки алгоритму.	41
3.2 Комплексування різних джерел навігаційної інформації.	44
3.3 Вибір датчиків первинної інформації	45

3.4 Алгоритм визначення координат об'єкта	47
Висновки до розділу	53
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИТМУ	54
4.1 Комплексування GPS та IMU в одновимірному просторі	54
4.2 Комплексування GPS, IMU, одометрії в одновимірному просторі	57
4.3 Комплексування GPS, IMU, енкoderів та LIDAR в одновимірному просторі	59
4.4 Комплексування GPS, IMU, одометрії в двовимірному просторі	61
Висновки до розділу	64
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	65
5.1 Опис ідеї проекту	65
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	68
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	69
5.4 Технологічний аудит ідеї проекту	78
5.5 Розроблення маркетингової програми	81
Висновки до розділу	86
ВИСНОВКИ	87
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	88

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

EKF – від англ. extended kalman filter

GPS – від англ. global positioning system

IMU – від англ. Inertial measurement unit

LIDAR – від англ. Light Identification, Detection and Ranging

NAVSTAR – від англ. System Navigation Satellite Time and Ranging

NMEA – від англ. National Marine Electronics Association

RMSE – від англ. root mean square deviation

ROS – від англ. Robot Operating System

RTK – від англ. Real Time Kinematic

RVIZ – від англ. robot operating system visualizer

SLAM – від англ. simultaneous localization and mapping

WGS 84 – від англ. World Geodetic System 1984

СКВ – середньоквадратичне відхилення

ФК – фільтр Калмана

ФЧ – фільтр частинок

ВСТУП

В сучасному світі необхідність автономних мобільних роботів зростає з кожним днем і у різних сферах. Вони можуть бути застосовані для вирішення різних типів задач, починаючи від допомоги у побуті, роботи на підприємствах та закінчуючи використанням у завданнях, які несуть небезпеку для здоров'я та життя людини. Наприклад, у побуті необхідним для теперішнього темпу життя для комфортного прибирання створено робот-пилосос, який значно економить час прибирання приміщення, є зручним у використанні та компактним. На підприємствах автономні роботи необхідні для переміщення великогабаритних та важких об'єктів без втручання оператора. У військовій сфері це можуть бути пошукові роботи, саперні роботи і подібна діяльність. Їх потреба у військовій сфері на сьогоднішній день є вкрай актуальною, оскільки нинішній тип війн потребує новітніх технологій.

Більше того український ринок не може конкурувати із проектами американських та європейських досліджень через відсутність спеціалістів, складність, а як наслідок, неможливість професійно та детально вивчати аспекти керування автономними роботами.

Застосування мобільних автономних роботів для виконання вищенаведених завдань стало можливим завдяки сучасним алгоритмам локалізації та навігації рухомих об'єктів. Саме цей аспект зацікавив найбільше і спонукав до написання цієї дослідницької роботи.

Актуальність теми дослідження.

На сьогоднішній день існує багато автономних роботів, які виконують різноманітні завдання без втручання оператора. Це і автоматичні роботи вантажники, які використовуються на великих фабриках та складських приміщеннях. Це і рухомі платформи які здійснюють перевезення вантажу в сільськогосподарській промисловості. Також сюди можна віднести роботів, що переміщуються по траєкторіях, які були встановлені заздалегідь.

Для виконання автономними рухомими об'єктами таких завдань, перш за все потрібно мати систему навігації та локалізації високої точності для того, щоб

уникнути зіткнень, аварій та ситуацій коли рухома платформа взагалі перемістилась в протилежну сторону від бажаної.

В магістерській дисертації пропонується алгоритм локалізації та навігації мобільних платформ, що буде побудований на ідеї комплексування інформації від декількох датчиків за допомогою фільтру Калмана та фільтру частинок з метою підвищення точності.

Мета дисертаційної роботи: розробити алгоритм підвищення точності визначення координат рухомого об'єкту на основі застосування навігаційної інформації від різних джерел первинних даних.

Об'єкт дослідження: локалізація та навігація рухомих об'єктів в середині приміщення та на відкритому просторі.

Предмет дослідження: комплексна система визначення параметрів навігаційної інформації про місце локалізації рухомого об'єкту.

Завдання:

1. Розглянути сучасні підходи до навігації та локалізації рухомих об'єктів
2. Вивчити підходи до забезпечення точності локалізації рухомих об'єктів
3. Дослідити особливості застосування фільтра Калмана та фільтра частинок для отримання комплексної навігаційної інформації
4. Розробити алгоритм підвищення точності локалізації та навігації рухомих об'єктів

Методи дослідження: в даній магістерській роботі було застосовано методи лінійної та нелінійної фільтрації, фільтри Калмана та фільтри частинок на основі чисельних методів Монте Карло, методи теорії ймовірностей, математичні моделі експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів: поєднано декілька алгоритмів в один комплексний алгоритм, за рахунок чого підвищена точність та набута універсальність застосування алгоритму, як всередині приміщень так і на відкритій місцевості.

Практичне значення одержаних результатів:

Розроблений алгоритм дозволяє підвищити точність локалізації та навігації рухомих об'єктів, як в середині приміщень так і на відкритому просторі.

1. Розроблений алгоритм може застосовуватись на рухомих роботизованих платформах, що переміщуються як на відкритому просторі так і в приміщеннях.
2. Розроблений алгоритм дозволяє використання необмеженої кількості таких датчиків первинної інформації як: GPS приймачі, системи LIDAR, енкодери коліс, акселерометрів, гіроскопів, компасів.
3. Розроблений алгоритм не потребує значних обчислювальних потужностей і може бути реалізованим на сучасних мікрокомп'ютерах таких, як Raspberry Pi 3 або Nvidia Jetson Nano.

Тому цілями цієї магістерської дисертації є:

1. Огляд сучасних підходів до навігації та локалізації рухомих об'єктів.
2. Вивчення підходів до забезпечення точності локалізації рухомих об'єктів.
3. Дослідження особливостей застосування фільтра Калмана та фільтра частинок для отримання комплексної навігаційної інформації.
4. Розробка алгоритму підвищення точності локалізації та навігації рухомих об'єктів.

В даній роботі буде створено комплексний алгоритм локалізації та навігації мобільних роботів з можливістю використання як на відкритих місцевостях так і у приміщеннях.

Необхідність саме комплексного алгоритму пояснюється тим, що частина датчиків та алгоритмів можлива для використання лише на відкритому просторі, а інша частина для використання лише всередині приміщень, або місцях з великою кількістю чітко виражених орієнтирів, що можуть бути розрізнені датчиками, якими укомплектовано мобільного робота.

Застосування роботом комплексного алгоритму локалізації та навігації робить його універсальним, дозволяє виконувати ним більший спектр завдань та збільшує достовірність отриманої навігаційної інформації.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО НАВІГАЦІЇ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Сучасні системи навігації

В сучасному світі мобільні автономні робототехнічні системи являються основною складовою робототехніки. Основний напрям роботи у процесі розробки подібних систем є розробка алгоритмів визначення положення робота і його орієнтація в просторі. Фактично, поставлене завдання можна поділити на дві складові, а саме картографію (побудову карт) та локалізацію (визначення місця положення робота на місцевості). Для того, щоб знайти рішення для першої задачі потрібно володіти точним (наскільки це можливо) розташуванням мобільного робота, для того, щоб спираючись на отримані дані від датчиків побудувати карту. Тим не менш, головним залишається якраз друге завдання - локалізація. Відповідно, постає питання як визначити положення робота?

У використанні підходу єдиних одометрів, який вважають одним із простих способів визначення позиції робота, є значний недолік - він має дуже не високу точність.

Варто зазначити, що користування GPS не завжди є можливим. І тому, наступним логічним рішенням є застосування карти для того, аби визначити положення робота. Проте, постає наступне питання - звідки і що ми знатимемо про навколишній простір? Найкращий випадок - це можливість загрузити уже побудовану карту такого простору. Однак, на практиці така можливість випадає не часто. Тому постає наступне завдання - навчити робота будувати карту місцевості, в якій він знаходиться, а також визначати своє положення і будувати траєкторію руху. Для того, аби вирішити це завдання і якими методами це можна зробити, є спеціальна галузь знань, яка має назву SLAM[15] - одночасна локалізація та картографування. На сьогодні існує велика кількість реалізацій і підходів, що спираються на різні програмні та апаратні можливості платформ.

1.2 Класифікація алгоритмів SLAM

Алгоритми SLAM можна розділити за методом, що використовується для розрахунків на три групи:

- а) На основі фільтра Калмана та його модифікацій,
- б) На основі фільтра частинок,
- в) Методи, засновані на графах.

Кожен з цих підходів можна застосовувати для вирішення завдання SLAM, проте у кожного з них є свої переваги і недоліки, тому розглянемо кожен з підходів окремо.

1.2.1 Фільтр Калмана

Фільтр Калмана - це, можна сказати, один з найпопулярніших алгоритмів фільтрації, який використовується не тільки в робототехніці, але і в багатьох інших областях науки і техніки. Через те, що він є досить простим, але в той самий час і ефективним його використовують в обробках показань датчиків, GPS-приймачах, при реалізації систем управління і т.д.

Вперше використання фільтра Калмана для вирішення завдання SLAM було запропоновано у 2002 році[22].

Фільтри Калмана базуються на дискретних за часом лінійних динамічних моделей руху до другого порядку де враховуються положення, швидкість та прискорення та вектор руху об'єкта. Оскільки рух автономних роботів погано апроксимується лінійним рухом, то фільтри Калмана не отримали широкого поширення в реалізації подібного завдання SLAM. В той же час, фільтри Калмана застосовують для обчислення положення нерухомих просторових орієнтирів, бо саме вони задовольняють властивості лінійності.

При використанні фільтра Калмана для отримання оцінок вектора стану процесу по серії зашумлених вимірювань необхідно уявити модель даного процесу відповідно до структури фільтра - у вигляді матричного рівняння певного типу. Для кожного такту k роботи фільтра необхідно відповідно до наведеного нижче описом

визначити матриці: еволюції процесу F_k ; матрицю спостережень H_k ; матрицю коваріації процесу Q_k ; матрицю коваріації шуму вимірювань R_k ; при наявності керуючих впливів матрицю їх коефіцієнтів B_k . Розглянемо кожен з етапів докладніше:

Модель системи має на увазі, що стан в момент k виходить з стану в момент $(k - 1)$ відповідно до рівняння:

$$\hat{x}_k^- = F\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} + w_k \quad (1.1)$$

де:

F_k - матриця еволюції процесу / системи, яка впливає на вектор стану в момент $(k - 1)$;

B_k - матриця управління, яка прикладається до вектору керуючих впливів u_{k-1} ;

w_k - нормальний випадковий процес з нульовим математичним очікуванням і матрицею коваріацій Q_k , який описує випадковий характер еволюції системи.

$$w_k \sim N(0, Q_k) \quad (1.2)$$

У момент k проводиться спостереження (вимір) z_k істинного вектора стану x_k , які пов'язані між собою рівнянням:

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (1.3)$$

де:

H_k - матриця вимірювань, що зв'язує вектор стану і вектор проведених вимірювань, v_k - білий гауссовський шум вимірювань з нульовим математичним очікуванням і коваріаційною матрицею R_k .

Далі розглянемо роботу класичного алгоритму SLAM, на рисунку 1.1 представлена загальна схема роботи фільтра Калмана для завдання SLAM.

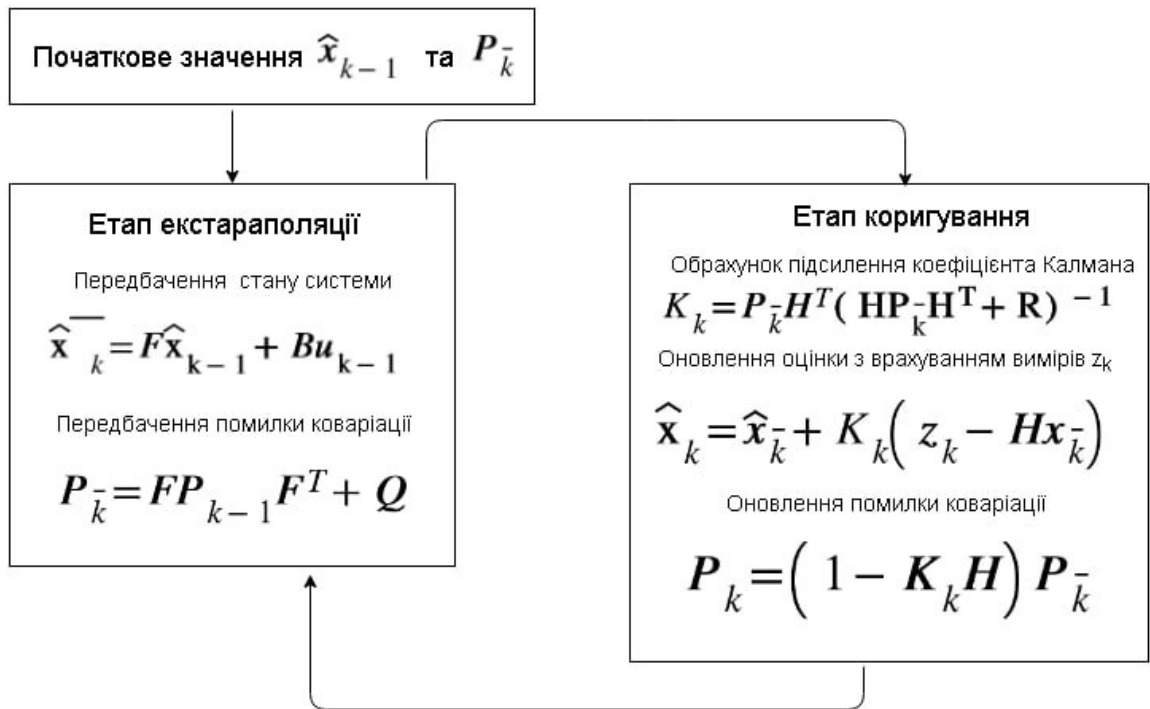


Рисунок 1.1 Алгоритм роботи фільтра Калмана

Як бачимо з рис. 1.1, роботу фільтра Калмана можна поділити на два основні і масштабні етапи:

а) Етап екстраполяції - на даному етапі ФК "пророкує" становище робота на основі початкових значень, якщо це перша ітерація циклу або даних, які були одержані з етапу коригування, а також значення керуючих впливів, тобто для мобільного робота це дані, що надходять з одометрів.

б) Етап коригування - на даному етапі ФК використовуючи дані, отримані з датчиків для коригування положення - коригує оцінку місця положення робота-об'єкта.

Відповідно, розглянемо кожен з етапів окремо.

Етап екстраполяції

Екстраполяція або іншими словами передбачення вектора стану системи \hat{x} на кроці k вираховується за формулою 1.4 на основі оцінки системи на кроці $k - 1$ та матриці управління B , яка прикладається до вектору керуючих впливів u_{k-1} .

$$\hat{x}_k = F\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (1.4)$$

Матриця коваріації для вектора передбачення стану системи обраховується за формулою (1.5)

$$P_k = FP_{k-1}F^T + Q \quad (1.5)$$

Етап коригування

Відхилення виміру отриманого на кроці k від передбаченого стану системи обраховується за формулою 1.6.

$$y_k = z_k - H\hat{x}_k \quad (1.6)$$

Матриця коваріації для вектора помилок вираховується за формулою 1.7.

$$S_k = HP_kH^T + R \quad (1.7)$$

Матриця коефіцієнтів підсилення Калмана формується на основі матриць коваріації для вектору передбачення стану системи та для вектору помилок та обраховується за формулою 1.8.

$$K_k = P_kH^T(HP_kH^T + R)^{-1} \quad (1.8)$$

Обрахунок вектора оптимальної оцінки системи здійснюється за формулою 1.9.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k y_k \quad (1.9)$$

Матриця коваріації оцінки вектора стану системи можна розрахувати за формулою 1.10.

$$P_k = (I - K_kH)P_k \quad (1.10)$$

Звичайний фільтр Калмана ґрунтується на дискретних у часі лінійних системах. Але мобільний об'єкт, про який йдеться, досить складно та не точно апроксимується лінійними функціями, саме тому в задачах, де поставлено завдання одночасного картографування та визначення точного місця положення рухомого об'єкту його застосовують дуже рідко. Тим не менш, його застосовують для визначення місця положення лінійних орієнтирів тому що вони задовольняють умову лінійності системи.

В свою чергу для фільтрації та комплексування даних в нелінійних системах застосовують розширений фільтр Калмана (ЕКФ).

1.2.2 Розширений фільтр Калмана

Розширений фільтр Калмана - це нелінійна версія фільтру Калмана, яка не вимагає виконання умови лінійності системи. В розширеному фільтрі Калмана моделі системи та вимірів не повинні бути лінійними функціями, вони можуть бути диференційованими.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \quad (1.11)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (1.12)$$

Недоліком розширеного фільтру Калмана є те, що він не дає оптимальної оцінки на відміну від лінійного фільтру Калмана.

1.2.3 Фільтр частинок

Як зазначалось раніше, розширений фільтр Калмана не є універсальним способом вирішення завдання SLAM. У тому випадку, коли шуми не мають гауссівського розподілу фільтр Калмана застосовувати не можна. В таких випадках, частіше застосовуватимуть фільтр частинок[16], де зазвичай використовують методи взяття інтегралів, що мають в основі методи Монте Карло[2].

Багатовимірний фільтр Калмана, в свою чергу, представляє розподіли ймовірностей із використанням параметризованої моделі - багатовимірного Гауса. Фільтри частинок, навпаки, представляють розподіли, використовуючи кінцевий набір станів (частинок), де під частинкою мається на увазі одне із ймовірних положення об'єкта на площині. Регіони, в який ймовірність перебування рухомого об'єкту є високою, - містять велику щільність частинок, тоді як регіони низької ймовірності містять меншу кількість частинок або взагалі не мають їх. Якщо використовувати достатню кількість частинок, то можливо апроксимувати складні мультимодальні розподіли.

Якщо продовжувати та збільшувати кількість частинок до нескінченності, то справжній розподіл може бути реконструйований дуже точно.

При такому підході, кожна частка характеризується як можливий стан робота в даний конкретний момент часу. Оскільки ці фільтри є математичними моделями,

вони описують розподіл ймовірності у вигляді дискретного набору частинок в просторі станів, для завдання SLAM. Узагальнений алгоритм фільтру частинок зображено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 Узагальнений алгоритм фільтру частинок

Першим кроком ітерації локалізації фільтру частинок є генерація нового часткового розподілу для даної моделі руху і застосованого управління. Вона зображена на рис. 1.3.

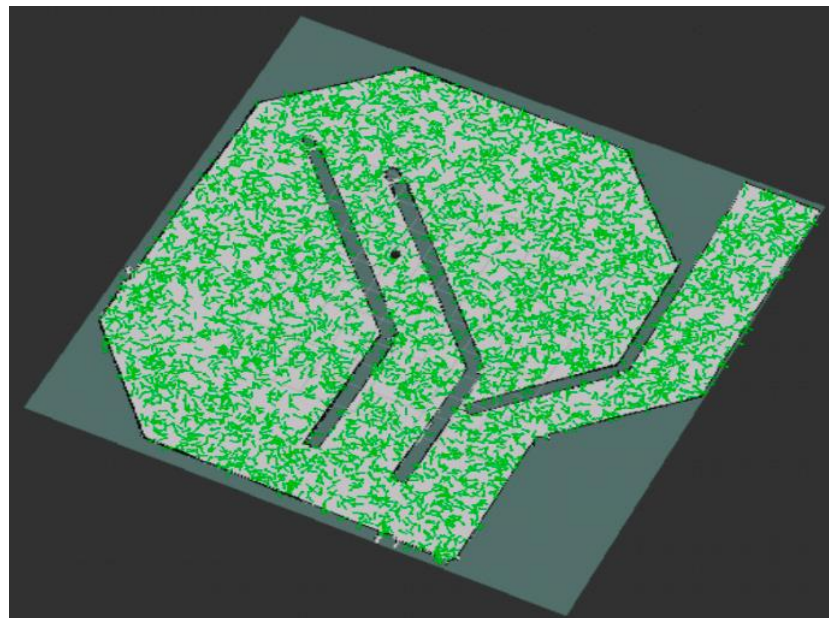


Рисунок 1.3 Генерація частинок на області карти

Наступним кроком є розрахування ваги кожного значення. Частинкам, для яких прогнозовані значення відповідають виміряним, даються великі ваги. Крок екстраполяції побудований за тією ж логікою, на якій він побудований і у фільтрі Калмана, він оцінює позицію робота після переміщення. Оскільки кожна частинка відповідає за можливу позицію робота на площині, то коли рухається реальний

робот, ми застосовуємо переміщення і для частинок теж. Наприклад, скажімо, що робот рухається вперед; тоді всі частинки також рухатимуться вперед у своїх напрямках, незалежно від того, в який бік вони вказують. Для того, щоб врахувати шум, етап прогнозування додає згаданий багатовимірний Гаусівський шум до кожного переміщення частинок. Цей шум спричиняє дисперсію частинок по карті в часі. Вона є необхідною для того, щоб реальне місцеположення робота було вкрито частинками. На кожному наступному кроці передбачення втрачається достовірність у місці положенні робота за рахунок внесеного шуму, що зображено на рис. 1.4.

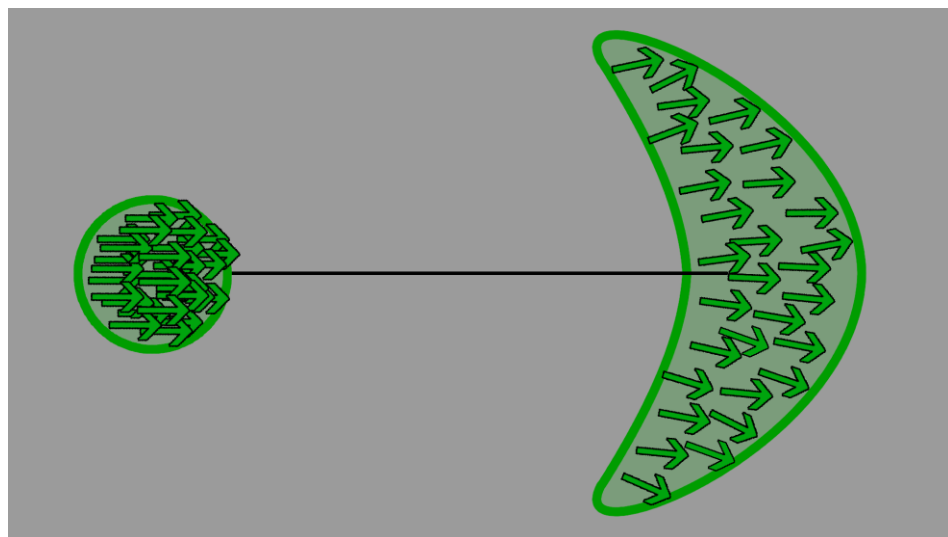


Рисунок 1.4 Етап передбачення фільтру частинок

На етапі коригування відбувається обробка вхідних даних від сенсорів (наприклад від системи LIDAR) та відбувається їх порівняння з вимірами частинок на карті місцевості, що зображено на рис. 1.5 - 1.7.

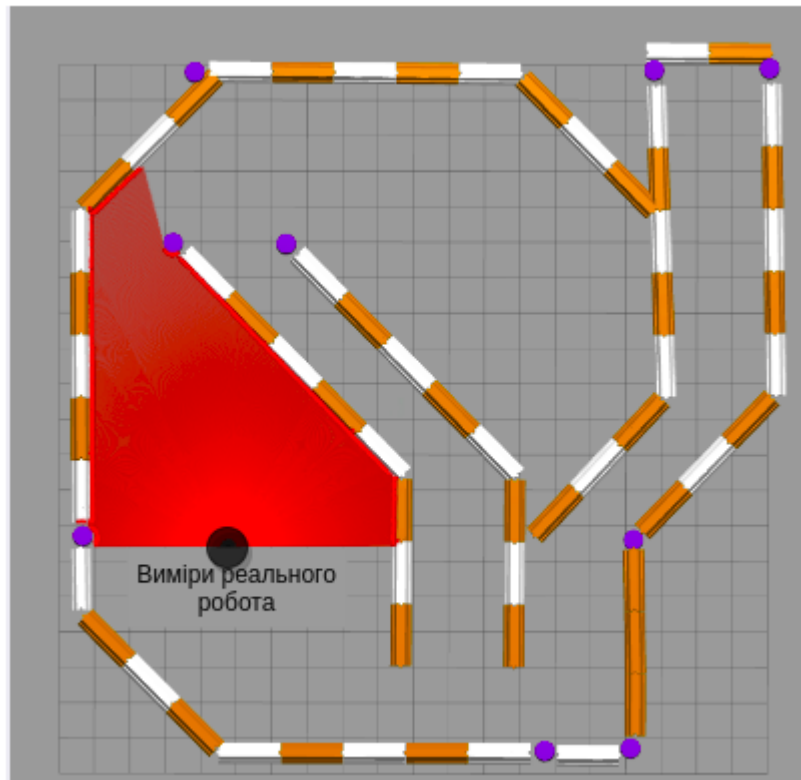


Рисунок 1.5 Червона область зображує виміри системи LIDAR

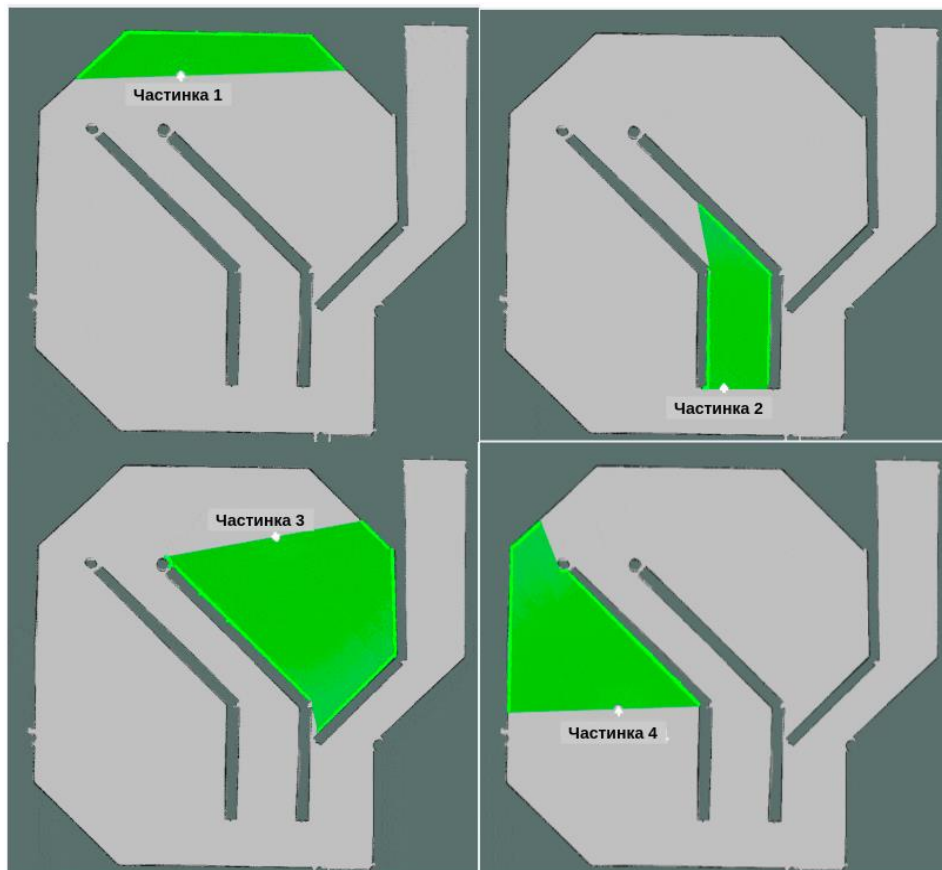


Рисунок 1.6 Порівняння вимірів частинок і реального робота

Ступінь узгодження між відстанями, отриманими за допомогою реального лазерного сканування, та відстанями, розрахованими за допомогою очікуваного вимірювання відстані кожної частинки, визначає ймовірність перебування частинки в районі позиції істини на землі робота. Під час цього процесу кожній частинці присвоюється нова вага, що зображено на рис. 1.7.

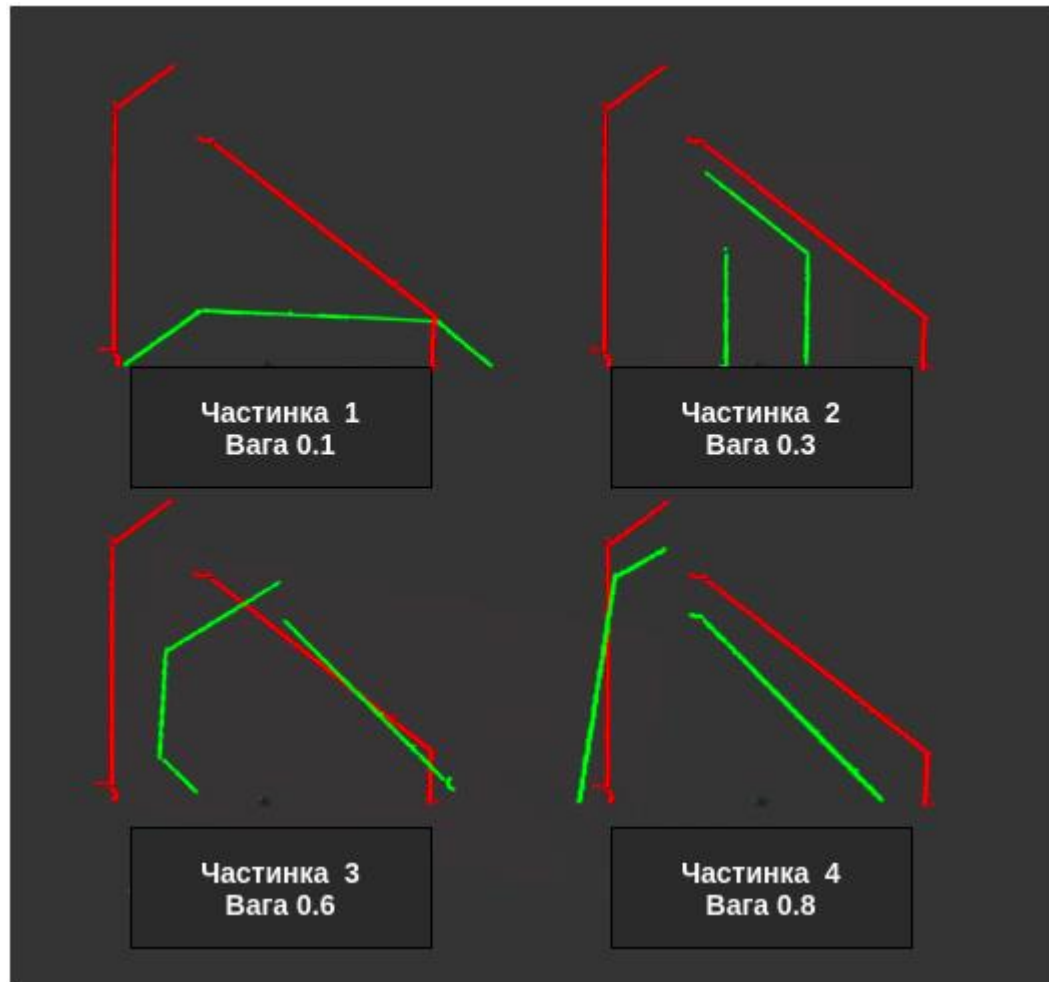


Рисунок 1.7 Етап коригування фільтру частинок

І останній етап - це повторна вибірка частинок. Вона ґрунтується на вагах частинок з попереднього розподілу, які беруться випадковим чином, створюючи новий розподіл.

Головною проблемою є логарифмічна складність фільтра, яка сильно залежить від числа частинок. При їх малій кількості, протягом тривалого часу роботи алгоритму можуть виникати серйозні помилки, тим самим спотворюючи

оцінку. Однак, чим більше число частинок ми будемо мати у своєму розпорядженні, тим більше часу потрібно буде для обчислень.

На рис. 1.8 зображена оцінка позиції рухомого об'єкта отримана в результаті роботи фільтру частинок після виконання декількох вимірів. Можна оцінити, що локалізація робота є дуже не точною.

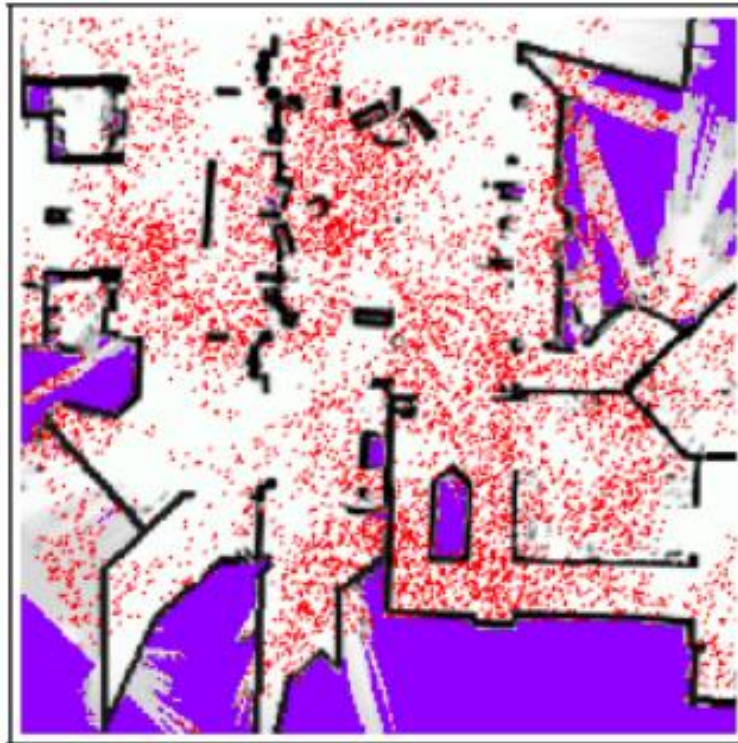


Рисунок 1.8 Оцінка на основі лише кількох спостережень

На рис 1.9 зображена оцінка позиції рухомого об'єкта відносно карти приміщення після тривалої роботи алгоритму та здійснення великої кількості вимірів.

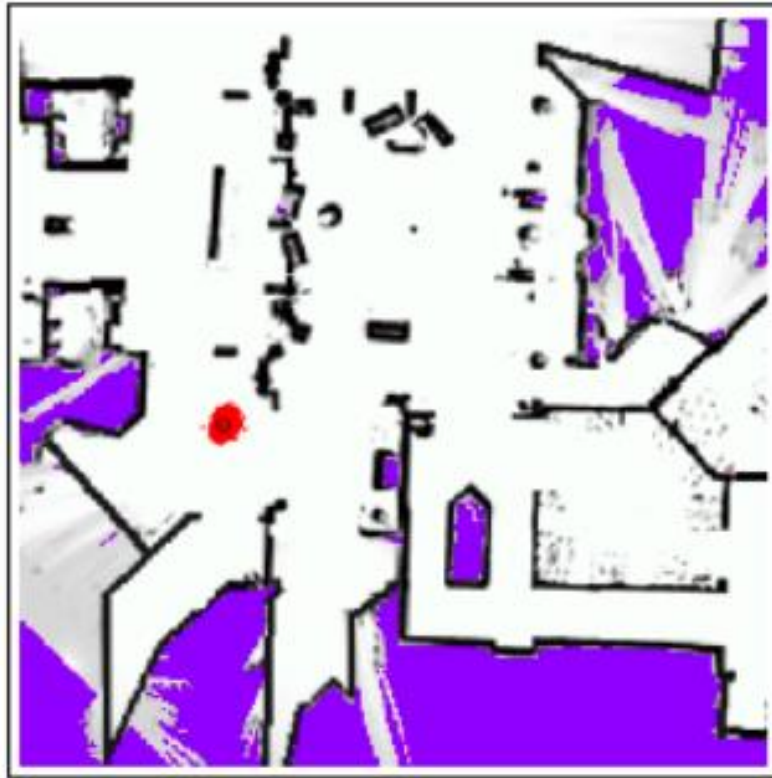


Рисунок 1.9 Оцінка на основі великої кількості спостережень

До найпоширенішим алгоритмам, що базуються на фільтрі часток можна віднести: алгоритм FastSlam, алгоритм HectorSlam, алгоритм Gmapping, алгоритм Google Cartographer[23].

1.2.4 Методи локалізації засновані на теорії графів

Підходи SLAM, що засновані на теорії графів - це новітній підхід до вирішення проблеми одночасного картографування та оцінки місця положення об'єкту відносно карти. Одним з найбільш застосовуваних методів в даному підході є GraphSlam[13]. Причиною винайдення цього методу було представлення проблеми SLAM у вигляді розрідженого графіка та зв'язків між вузлами. Ці вузли - вузли графіків - показують положення робота та елементів карти. Рухи роботи та ось ці елементи карти (які показували положення відносно робота) виражаються на графіку як зв'язки між відповідними вузлами. На рис 1.10 наведено приклад покрокової презентації процесу SLAM. Кожен вузол на графіку відповідає положенню робота. Деякі положення з'єднані ребрами, які відповідають

положенню перешкод щодо положення робота, отриманого в результаті вимірювань. Тоді як інші ребра відповідають зміні положення робота, вимірюваного одометром робота.

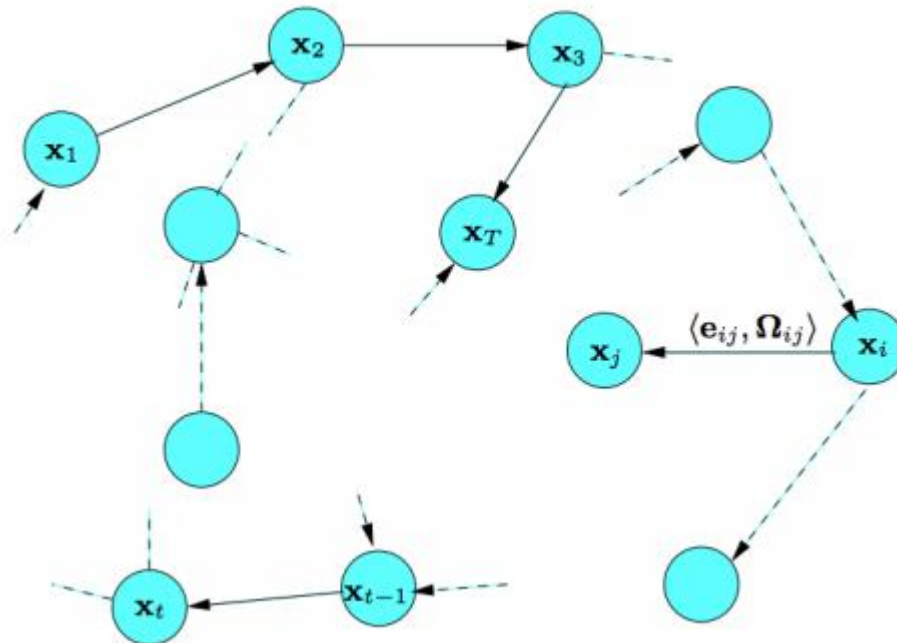


Рисунок 1.10 Модель графа

Таким чином, рішення SLAM можна знайти, обчисливши мінімальний енергетичний стан цієї мережі.

Слід також розглянути переваги та недоліки цього підходу.

Суттєвою перевагою GraphSlam є те, що, порівняно з фільтром Калмана, обсяг обчислень та пам'яті, необхідних для оновлення та збереження коваріаційної матриці, не зростає в квадратичному вимірі із числом елементів.

Але при цьому, основним недоліком методів SLAM[23] на основі графів є те, що вони мають високі вимоги до обчислювальних потужностей, якщо робот пройшов достатньо довгий шлях.

Висновки до розділу

Як висновок можна зазначити, що фільтр Калмана - основний інструмент для фільтрації багатьох речей, однією з причин цього є те, що будь яку оцінку можна подати у вигляді функції гауса та охарактеризувати за допомогою лише двох параметрів, а саме: дисперсії та математичним очікуванням. Фільтр Калмана можна застосовувати лише до лінійних систем з гаусівським шумом. Для роботи з нелінійними системами використовують розширений фільтр Калмана.

Фільтр частинок відстежує позицію робота на відомій карті. Кожна частинка зображує ймовірність перебування робота в тому чи іншому місці на карті. Фільтр частинок використовує показання первинних датчиків навігаційної інформації для співставлення з картою та інтеграції цих даних до кроку коригування. Можна сказати, що фільтр частинок найкраще працюватиме в середовищі з багатьма чіткими орієнтирами, які можуть розпізнати датчики. Крок оновлення частинок допомагає відсіювати частинки з найменшими ймовірностями та допомагає підтримувати фільтр ефективним та точним.

Загалом, справедливо сказати, що не існує жодного універсального методу фільтрації. Якщо один фільтр виходить з ладу за певним сценарієм, інший фільтр може працювати досить добре. Отже, немає одного очевидного вибору найкращого фільтра. Але для розробки комплексного алгоритму локалізації та навігації рухомих об'єктів було обрано застосовувати розширений фільтр Калмана для локалізації на відкритому просторі та фільтр частинок для визначення місця положення рухомого об'єкту на карті.

РОЗДІЛ 2. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Трекінг за допомогою одометрії

Одометрія — це спосіб оцінки переміщення за допомогою даних, отриманих із сенсорів руху таких як одометр, або енкодери коліс. Одометрія застосовується у робототехніці для створення роботів, якщо вони рухаються за допомогою ніг чи коліс для визначення їхньої поточної позиції відносно стартової.

Цей метод дуже чутливий до помилок через інтеграцію вимірювань впродовж всього часу оцінки позиції. Це відбувається за рахунок того, що кожне вимірювання в момент часу t залежить від виміру на попередньому кроці в момент часу $t - l$. Він потребує швидкого і точного збору та обробки даних, тобто потрібна велика частота оновлення значень, а також калібрування обладнання для ефективного використання одометрії.

До плюсів одометрії можна віднести те, що вона проста в реалізації, недорога, отримані значення можна обробляти в режимі реального часу, має хорошу короткочасну точність і дозволяє забезпечити високу частоту дискретизації. Недоліком є необмежене накопичення помилок. Помилки орієнтації та положення збільшуються пропорційно із пройденою відстанню. Основна концепція одометрії полягає у переведенні обертання колеса в лінійний зсув відносно корпусу, що зображено на рис. 2.1.

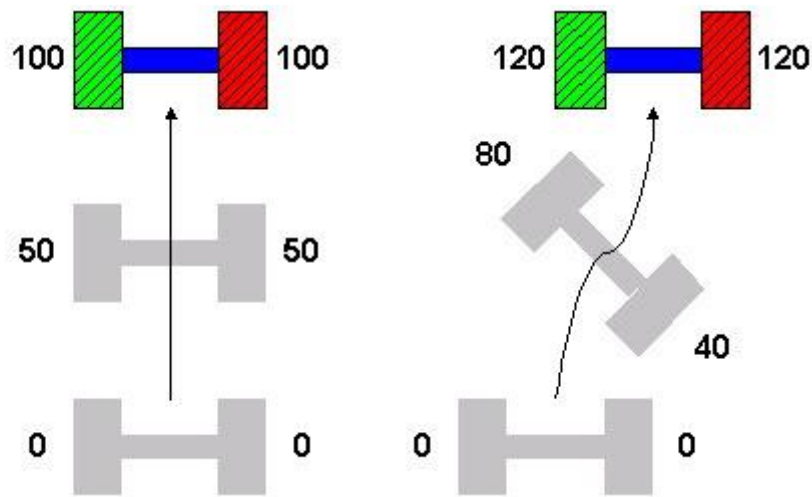


Рисунок 2.1 Зміна позиції робота за показанням енкодерів

Знаючи вихідне положення об'єкта, можна обчислити поточні координати об'єкта, оперуючи обертами коліс та простими геометричними рівняннями.

Одометрія забезпечує хорошу інформацію щодо відносного руху. Для цього вона часто використовується разом із вимірюванням абсолютного положення за допомогою як GPS та/або локалізації за допомогою орієнтирів.

Мінусом одометричної навігації, як було зазначено, є необмежене накопичення помилок. Несподівана взаємодія між колесом та площиною, відносно якої здійснюється рух в сумі з кінематичними недоліками колес робота, збільшують ймовірність, що обертання колеса може не перетворитися пропорційно на лінійний рух та спричинити помилки. В основному похибки орієнтації мають великий вплив на точність одометричного вимірювання. Невелика помилка в орієнтації спричиняє зростання похибки бічного положення без обмеження.

Отриману помилку можна класифікувати в одну із двох груп помилок: систематичні помилки та несистематичні помилки.

Несистематичні помилки спричинені несподіваною взаємодією між колесом та поверхнею. Ця непередбачуваність є великою проблемою для реальних додатків, оскільки неможливо передбачити верхню межу помилки одометрії.

Джерелами помилок для несистематичних помилок є:

- переміщення по нерівних поверхнях;

- прохід через несподівані предмети на дні;
- ковзання колеса через слизьке або надмірне прискорення або швидке повертання.

Систематичні помилки є специфічними для автомобіля та постійними протягом тривалого періоду. Ця група помилок особливо серйозна, оскільки накопичується постійно. Точність вимірювання одометрії можна покращити, протидіючи індивідуальному внеску систематичних джерел помилок.

Джерелами помилок для систематичних помилок є:

- неоднаковий діаметр колеса;
- середнє значення діаметрів коліс відрізняється від номінального діаметра датчиків і прийомів;
- невідповідність коліс;
- невизначеність щодо ефективної колісної бази;
- обмежена роздільна здатність енкодера;
- обмежений час реакцій;

Незважаючи на ці обмеження, більшість дослідників сходяться на думці, що одометрія є важливою частиною навігаційної системи робота і що навігаційні завдання будуть спрощені, якщо вдасться поліпшити одометричну точність. [23]

Одометрія базується на простих рівняннях кінематики, за допомогою яких обороти коліс можна точно перевести в лінійне переміщення відносно площини переміщення. Кінематика чотирьохколісного робота зображена на рис. 2.2.

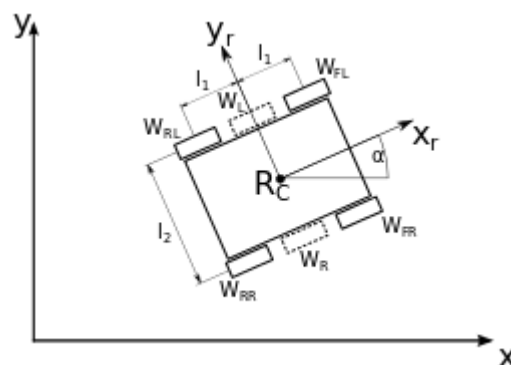


Рисунок 2.2 Кінематика мобільного двоколісного робота

Кутова швидкість ω і кут кожного φ колеса можуть бути обраховані за допомогою формул 2.1 - 2.4:

$$\varphi_{W_L} = \frac{\varphi_{W_{FL}} + \varphi_{W_{RL}}}{2} \quad (2.1)$$

$$\varphi_{W_R} = \frac{\varphi_{W_{FR}} + \varphi_{W_{RR}}}{2} \quad (2.2)$$

$$\omega_{W_L} = \frac{\omega_{W_{FL}} + \omega_{W_{RL}}}{2} \quad (2.3)$$

$$\omega_{W_R} = \frac{\omega_{W_{FR}} + \omega_{W_{RR}}}{2} \quad (2.4)$$

Де:

R_c - геометричний центр мобільного чотирьох колісного робота.

W_{FL} - Положення переднього лівого колеса.

W_{FR} - Положення переднього правого колеса.

W_{RL} - Положення заднього лівого колеса.

W_{RR} - Положення заднього правого колеса.

Тоді знаючи радіус мобільного робота r вираховують лінійні швидкості за формулами 2.5 - 2.6:

$$V_R = \omega_{W_R} \cdot r \quad (2.5)$$

$$V_L = \omega_{W_L} \cdot r \quad (2.6)$$

Обраховуємо кутове положення та швидкість робота за допомогою рівнянь 2.7 - 2.8:

$$\alpha = (\varphi_{W_R} - \varphi_{W_L}) \frac{r}{l_2} \quad (2.7)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.8)$$

Де:

l_1 - відстань між центром робота та передніми/задніми колесами.

l_2 - відстань між лівими та правими колесами робота.

Проекція швидкості на осі системи координат вираховується за формулами 2.9 - 2.10:

$$\dot{x}_c = \left(V_L + \dot{\alpha} \frac{l_2}{2} \right) \cos(\alpha) \quad (2.9)$$

$$\dot{y}_c = \left(V_R + \dot{\alpha} \frac{l_2}{2} \right) \sin(\alpha) \quad (2.10)$$

Де:

x_c - положення геометричного центра робота відносно осі X.

y_c - положення геометричного центра робота відносно осі Y.

Проінтегрувавши швидкість, отримуємо позицію робота:

$$x_c = \int_0^t \dot{x}_c dt \quad (2.11)$$

$$y_c = \int_0^t \dot{y}_c dt \quad (2.12)$$

Як правило, коли мобільна система навігації базується на одометрії, то до вимірів додають поправочні коефіцієнти розміром з найгіршу систематичну помилку. Це зменшує точність оцінки ймовірного положення рухомого об'єкта, але робить алгоритм більш стабільним [22]. Такі системи локалізації можуть вийти з ладу, коли виникає одна або кілька великих несистематичних помилок.

2.2 Інерційний метод локалізації

Інерційна навігація широко використовується для визначення положення, швидкості та вирівнювання курсу транспортних засобів. Інерційні навігаційні системи не потребують зовнішніх посилань, з цієї причини вони корисні для техніки автономної навігації. Ще однією перевагою системи є висока надійність і миттєві та постійні вимірювання при високій швидкості передачі даних.

Джерелами вимірювань для системи є гіроскопи та акселерометри, встановлені разом на платформі, що називається інерційний блок вимірювань (IMU). Прикладом такого блоку є блок від компанії Sparkfun[20], що зображено на рис. 2.3. Акселерометри вимірюють прискорення по осях чітко визначеної системи відліку. Гіроскопи використовуються для механічної або аналітичної стабілізації осей координат.

Позиціонування здійснюється шляхом інтегрування швидкості обертання, вимірної гіроскопами і значень прискорення отриманих від акселерометрів.

Деякі труднощі впливають на обчислення положення в інерційній системі. Одним з них є вплив гравітаційних сил, що мають місце поруч об'єктів з великою масою. Крім того, обертання системи відліку відносно інерційного простору впливає на вимірювання прискорення. При інтегруванні виміряних сил необхідно враховувати умови гравітаційного поля та можливі сили, що з'явилися. Цей автономний метод навігації непридатний для позиціонування протягом тривалих періодів, оскільки дані з часом змінюються. Одним із джерел погіршення вимірювання положення є постійні зміщення датчика. Ще одним недоліком є той факт, що якісні системи досить дорогі. Інерційні навігаційні системи зазвичай використовуються для врівноваження недоліків інших систем.

Інерційні навігаційні системи мають перевагу - вони автономні, тобто їм не потрібні зовнішні посилання. Однак інерційні дані датчика з часом змінюються через необхідність інтегрування даних про швидкість у вихідне положення; будь-яка невелика постійна помилка зростає після інтегрування. Таким чином, інерційні датчики в основному непридатні для точного позиціонування протягом тривалого періоду часу.



Рисунок 2.3 IMU з 9 степенями свободи від компанії Sparkfun

2.2.1 Акселерометр

Основна концепція акселерометрів полягає у вимірюванні сили, що діє на стійку масу. Дві загальні реалізації датчиків прискорення - це розімкнутий і закритий контури. В установці з відкритим контуром вимірюється зміщення стійкої маси. Акселерометр із замкнутим контуром генерує електричну або магнітну силу, яка утримує масу в стані рівноваги. Сформована сила протидіє специфічній силі на масу.

Точність вимірювання прискорення залежить від ряду факторів. Важливими міркуваннями є термочутливість та чутливість по осі. Позичування за допомогою прискорення неможливе для навігації робота через співвідношення сигнал-шум при низьких прискореннях.

Результати випробувань із використанням акселерометрів для навігації мобільних роботів загалом були поганими. В ході дослідження в Університеті Мічигану було виявлено дуже низьке відношення сигнал / шум при малих прискореннях (тобто під час поворотів на низькій швидкості)[12].

Акселерометри також страждають від значного дрейфу, і вони чутливі до нерівного ґрунту, оскільки будь-яке збурення з абсолютно горизонтального положення призведе до того, що датчик виявить компонент гравітаційного прискорення g . Тим не менше, результати, отримані від системи з компенсацією нахилу, вказують швидкість дрейфу положення від 1 до 8 см/с залежно від частоти зміни прискорення. Це неприйнятний рівень помилок для більшості програм мобільних роботів.

2.2.2 Гіроскоп

Гіроскопи мають особливе значення для позиціонування мобільних роботів, оскільки вони можуть допомогти компенсувати найголовнішу слабкість одометрії: у методі позиціонування на основі одометрії будь-яка невелика миттєва похибка орієнтації призводить до постійно зростаючої похибки бічного положення. З цієї причини було б дуже корисно, якби помилки орієнтації могли бути негайно виявлені та виправлені. Донедавна високоточні гіроскопи були надто дорогими для

програм мобільних роботів. Однак зовсім недавно волоконно-оптичні гіроскопи, які, як відомо, дуже точні, різко подешевшали і стали дуже привабливим рішенням для навігації мобільних роботів.[25]

2.2.3 Компас

Напрямок транспортного засобу є найважливішим із навігаційних параметрів (х, у та ψ) з точки зору його впливу на накопичені помилки. З цієї причини датчики, що забезпечують міру абсолютного курсу, надзвичайно важливі для вирішення навігаційних потреб автономних платформ. Магнітний компас є таким датчиком. Однак одним недоліком будь-якого магнітного компаса є те, що магнітне поле Землі часто спотворюється поблизу ліній електропередач або сталевих конструкцій. Це ускладнює пряме використання геомагнітних датчиків у приміщеннях. На основі різноманітних фізичних ефектів, пов'язаних із магнітним полем Землі, доступні різні сенсорні системи: механічні магнітні компаси, компаси типу Fluxgate, компаси з ефектом Холла, магніторезистивні компаси, магнітопружні компаси[12].

2.3 Оптична одометрія за допомогою орієнтирів.

Орієнтири - це відмінні риси, які робот може розпізнати за своїми сенсорними входами. Орієнтири можуть бути геометричними фігурами (наприклад, прямокутниками, лініями, колами) і вони можуть містити додаткову інформацію (наприклад, у вигляді штрих-кодів). Загалом, орієнтири мають фіксоване і відоме положення, щодо якого робот може локалізувати себе.

Орієнтири ретельно вибираються, щоб їх було легко ідентифікувати; наприклад, має бути достатній контраст щодо фону. Перш ніж робот зможе використовувати орієнтири для навігації, характеристики орієнтирів повинні бути відомі та збережені в пам'яті робота. Тоді головним завданням локалізації є надійне розпізнавання орієнтирів та обчислення положення робота.

Для спрощення проблеми отримання наземних орієнтирів часто припускають, що поточне положення і орієнтація робота відомі приблизно, так що роботу потрібно лише шукати орієнтири на обмеженій території. З цієї причини хороша точність одометрії є необхідною умовою успішного виявлення орієнтиру.

Деякі підходи лежать між орієнтиром та позиціонуванням на основі карти. Вони використовують сенсори для відчуття навколишнього середовища, а потім витягують чіткі структури, які служать орієнтирами для навігації в майбутньому. Наше обговорення в цьому розділі стосується двох типів орієнтирів: „штучних” та „природних”. Важливо пам’ятати, що „природні” орієнтири найкраще працюють у високоструктурованих середовищах. Справді, можна стверджувати, що “природні” орієнтири найкраще працюють, коли вони насправді створені людиною (як це має місце у високоструктурованих середовищах). З цієї причини ми визначатимемо терміни «природні орієнтири» та «штучні орієнтири» таким чином: природні орієнтири - це ті об’єкти, які вже перебувають у навколишньому середовищі та мають функцію, відмінну від навігації роботів; штучні орієнтири - це спеціально розроблені об’єкти або маркери, які потрібно розміщувати в навколишньому середовищі з єдиною метою, щоб забезпечити навігацію робота.

Для оптичної одометрії найчастіше застосовуються системи LIDAR, які у разі наявності точної карти і об’єктів для орієнтування на місцевості дають точність $\pm 0,3$ м. Недоліком даної системи навігації є дуже мала кількість карт підготовлених до орієнтації за допомогою системи LIDAR.

2.4 Супутникова навігація

Супутникова система навігації - це система, основне призначення якої полягає у визначенні місця розташування (тобто географічних координат) різного роду об’єктів. Наприклад, наземних, водних, повітряних і низькоорбітальних космічних апаратів.

Окрім цього, супутникові системи навігації можуть отримати швидкості і напрями руху приймача сигналу. Супутникові системи такого роду складаються з космічного обладнання і наземного сегмента (систем управління).

Супутникові системи працюють за таким принципом - вимірювання відстані від антени на об'єкті (чий координати ми маємо знайти) до супутників (їх положення ми знаємо абсолютно достовірно). Таблиця, в якій зазначено положення всіх супутників має назву “альманах”, який має доступ для будь-якого супутникового приймача ще до початку вимірювань. Суть у тому, що приймач зберігає альманах у пам'яті з часу його останнього використання і якщо він не застарів може мментально його використати. Кожен сигнал, що його передає супутник містить саме цей альманах. Тому, взявши за основу цей альманах та скориставшись простими геометричними побудовами, можна визначити положення того чи іншого об'єкта в просторі, оскільки ми знатимемо відстані до декількох супутників системи.

Як правило, швидкість поширення радіохвиль нам відома (хоча його вирахування є складним, оскільки на швидкість може впливати багато зовнішніх факторів), а метод вимірювання відстані від супутника до антени приймача заснований саме на цьому. Кожен супутник навігаційної системи передає сигнали точного часу, що є синхронізованими, саме це дає можливість виміряти їх. Коли супутниковий приймач працює, його годинник синхронізується з системним часом і у будь-якому наступному користуванні і прийомі сигналів - вираховується різниця між часом випромінювання (який є в самому сигналі) та часом прийому цього сигналу. Використовуючи зазначену інформацію, навігаційний приймач вираховує положення (координати) мобільного об'єкта. Решта параметрів руху (швидкість, курс, пройдена відстань) обчислюються на основі вимірювання часу, який об'єкт витратив на переміщення між певною кількістю точок з певними координатами.

Тим не менш, виміри курсу є не ідеальними, саме тому в системах навігації досить часто використовують дані від IMU - інерційного вимірювального пристрою, якщо такий встановлено на рухому платформу.[25]

Найвідомішими наразі системи супутникової навігації це — NAVSTAR GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo.

NAVSTAR GPS (Global Positioning System Navigation Satellite Time and Ranging) — це високоточна супутникова система навігації, яка дає змогу визначити

місцезнаходження об'єкта, включно з його широтою, довготою та висотою над рівнем моря, а також визначає напрямок і швидкість його руху. Комплекс NAVSTAR розроблений, реалізований і, відповідно, належить Міністерству оборони США. Для кращого розуміння, - звичайна точність сучасних GPS-приймачів в горизонтальній площині становить 5-10 метрів, та 10-20 метрів за висотою. При використанні складнішого і, можливо, додаткового обладнання точність визначення координат можна довести аж до 10 см.

ГЛОНАСС (Глобальна Навігаційна Супутникова Система) - російська радіонавігаційна супутникова система, яка була розроблена на замовлення ще Міністерства оборони СРСР. За останніми дослідженнями, які були проведені цією системою, похибки навігаційних показників супутників ГЛОНАСС по довготі і широті становлять варіацію між 3—6 м при тому, що використано в середньому 7—8 супутників.

Наступна система Galileo – система супутникової навігації іншого табору, - Європейського Союзу та Європейського космічного агентства. Після завершення проєкту, який заплановано на 2020 рік, навігаційні сигнали Галілео забезпечать якісне покриття на широтах до 75° північної широти, а точність визначення місцезнаходження об'єкта наблизатиметься до 1 м.

BeiDou - це китайська супутникова система навігації. Планується, що цей космічний сегмент навігаційної супутникової системи Бейдоу буде складатися з орбітального угруповання змішаного типу, який в свою чергу, складатиметься з супутників на орбітах 3 різних типів. Точність позиціонування системи для населення становить менше 10 метрів, а точність вимірювання швидкості менше 0,2 метра в секунду.

2.5 Локалізація за допомогою карти

Позиціонування на основі карти - це техніка, при якій робот використовує свої датчики для створення карти місцевості середовища в котрому здійснює переміщення[25]. Потім цю локальну карту, побудовану в процесі руху порівнюють із глобальною картою, яка була побудована раніше та зберігається в

пам'яті рухомого об'єкту. Якщо збіг буде знайдено, тоді робот може обчислити своє фактичне положення та орієнтацію в навколишньому середовищі відносно карти.

Попередньо збережена карта може бути моделлю САПР навколишнього середовища або побудованою на основі попередніх даних датчика.[18]

Позиціонування на основі карти є вигідним, оскільки воно використовує природну структуру типового внутрішнього середовища для отримання інформації про місцезнаходження без зміни середовища. Крім того, з деякими алгоритмами, що розробляються, позиціонування на основі карт дозволяє роботу вивчати нове середовище та покращувати точність позиціонування за допомогою нових вимірів. Недоліками позиціонування на основі карти є суворі вимоги до точності датчиків, а також вимога до того, що має бути достатньо стаціонарних, легко розрізнявальних характеристик (орієнтирів), які можна використовувати для узгодження. Через складні вимоги в даний час більшість робіт з позиціонування на основі карт обмежуються лабораторними установками та відносно простими середовищами.

Висновки до розділу

Підсумовуючи розділ, потрібно звернути увагу на сильні та слабкі сторони описаних сенсорів та методик, що найчастіше використовують для вирішення задач навігації та локалізації.

Майже всі рухомі платформи укомплектовані енкодерами коліс, що побудовані на ефекті Холла або мають оптичну природу. Це пояснюється дешевизною даних сенсорів. Але використовувати лише їх для встановлення навігаційної інформації не можна, оскільки кожний вимір залежить від попереднього виміру. Отже, вони мають накопичувальну похибку, тому на абсолютні виміри не можна покладатись, але можна довіряти відносним вимірам.

Супутникова система навігації має похибку позиціювання близько 2.5 - 3м, що зумовлена багатьма факторами. Також не можна покладатись на виміри супутникової системи навігації поруч будівель через ефект перевідбиття. А в середині приміщень, де сигнал супутників взагалі відсутній вона не може бути застосована взагалі.

Інерційний блок вимірювань використовують для вимірювань лінійних і кутових прискорень та для встановлення точного курсу.

Навігація орієнтирами та навігація за допомогою карти тісно пов'язані між собою. Оскільки карта складається з орієнтирів, які може розрізнити робот за допомогою датчиків первинної інформації. Застосування карти надає змогу використовувати фільтр частинок для локалізації робота в середині приміщень. Що буде використано при створенні комплексного алгоритму локалізації рухомих об'єктів.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

3.1 Середовище розробки алгоритму.

Для розробки та програмування була обрана мета-операційна система для програмування роботів - ROS[21]. Операційна система для програмування роботів (ROS) не є фактичною операційною системою, але надає набір інструментів та можливості, які забезпечують функціональні можливості операційної системи на обчислювальному кластері. Її користь не обмежується розробкою роботів, але більшість наданих інструментів орієнтована саме на роботу з периферійним обладнанням.

ROS розділена на більш ніж 2000 пакетів, кожен з яких забезпечує спеціалізований функціонал та призначення. Кількість інструментів, підключених до фреймворку, ймовірно, є його найбільшою силою.

ROS надає функціональні можливості для абстракції обладнання, драйверів пристроїв, обміну даними між процесами на декількох машинах, інструментів для тестування, візуалізації і багато чого іншого.

На сьогоднішній день ROS надає можливість реалізувати як централізовану систему так і децентралізовану систему. Також є можливість під'єднувати середовище Matlab для обробки даних та побудови графіків.[4] Процес комунікації здійснюється за допомогою вузлів та топіків. Топік - це контейнер, який містить дані одного типу. Будь який вузол може відправляти інформації в топік, такий вузол має назву публікант. Вузол, що зчитує інформацію з топіку має назву підписника. Процес комунікації між вузлами зображено на рис. 3.1.

Саме через вище наведені переваги було прийнято рішення використовувати ROS, як головне середовище для розробки. Оскільки система складається з вузлів, будуть написані вузли для моделювання роботи кожного сенсора, які будуть використовуватися для локалізації та навігації рухомого об'єкта. Також будуть написані вузли, які будуть виконувати різні запропоновані алгоритми локалізації.

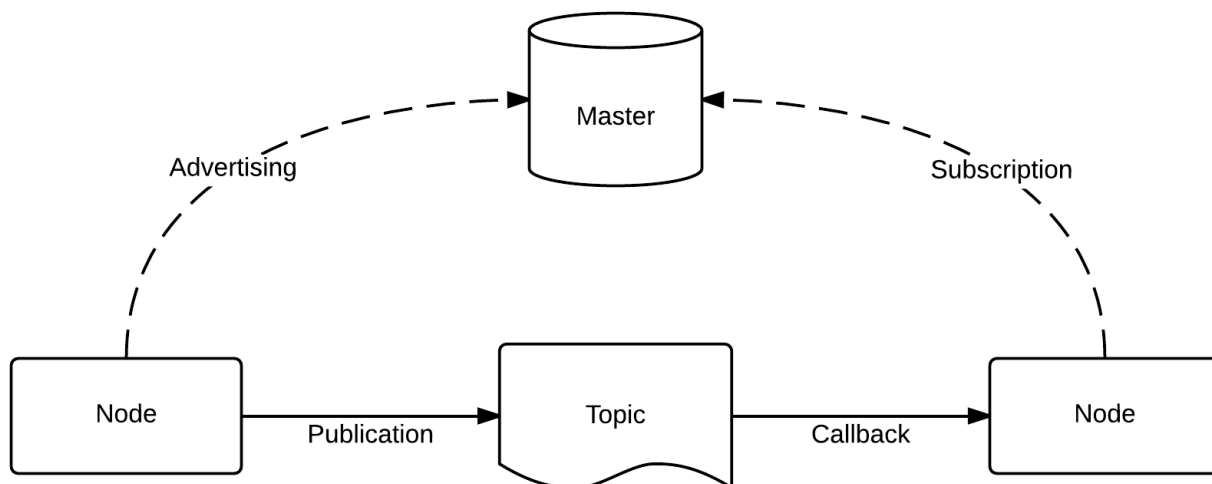


Рисунок 3.1 Процес комунікації в ROS

Додатково для порівняння ідеально отриманих координат від сенсорів руху будуть створені вузли, що будуть додавати шум з Гаусівським розподілом. Ці вузли дозволять зменшувати або збільшувати рівень зашумленості датчиків та встановлювати його величину близьку до реальних аналогів.

Процес симуляції буде здійснюватись у програмі Gazebo[21]. Gazebo - це тривимірний динамічний симулятор з можливістю точного і ефективного моделювання рухів роботів в складних внутрішніх і зовнішніх середовищах.

Подібно системам, що моделюють процеси фізики у сучасних комп'ютерних іграх Gazebo здійснює моделювання фізики з набагато більш високим ступенем точності. Він має великий набір датчиків та інтерфейси як для користувачів, так і для програм. Інтерфейс програми зображено на рис. 3.2.

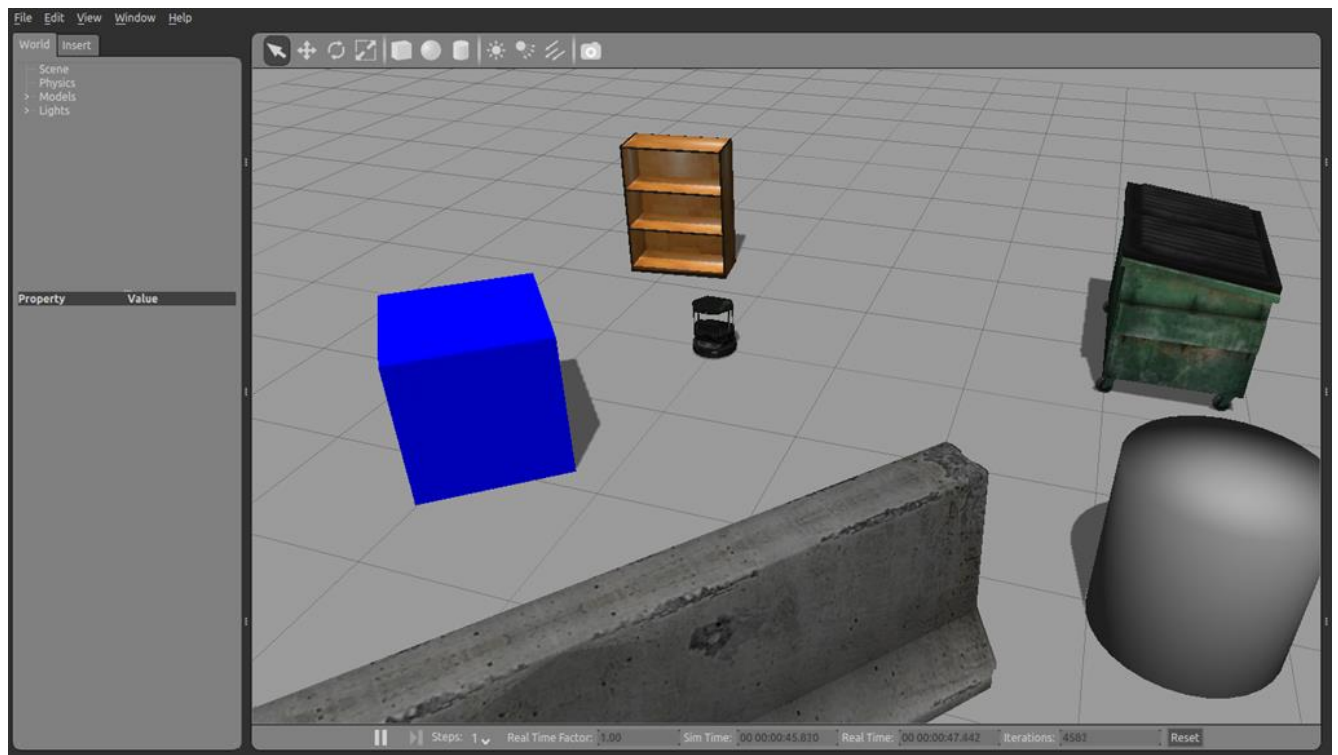


Рисунок 3.2 Інтерфейс програми Gazebo

Для симуляції обраний робот husky[14] від компанії Clearpath. Husky - це платформа для розробки роботів середнього розміру. Вона має велику вантажопідйомність і її системи дозволяють використовувати найрізноманітніші корисні навантаження, адаптовані до дослідницьких потреб. Стереокамери, системи LIDAR, GPS, IMU, маніпулятори і багато інших датчиків та актуаторів можуть бути доданим до цієї роботизованої платформи. Міцна конструкція Husky і трансмісія з високим крутним моментом дозволяють досліджувати те, чого не зможе зробити жоден інший робот. Також Husky повністю підтримується в ROS, має відкритий код та приклади роботи з ним, що є значною перевагою для подальшої розробки. На рис. 3.3 зображений робот husky в середовищі Gazebo.

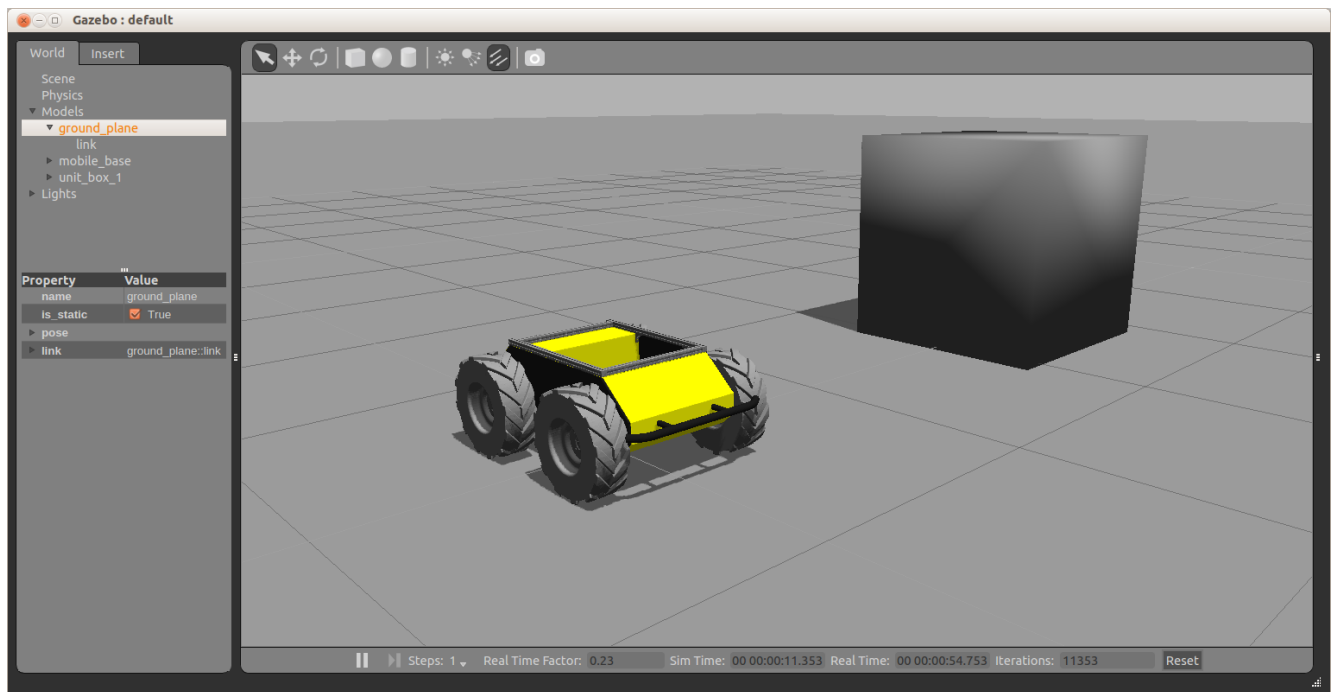


Рисунок 3.3 Робот husky у середовищі Gazebo

3.2 Комплексування різних джерел навігаційної інформації.

Обраний робот husky надає змогу застосовувати великий спектр датчиків, узагальнена схема для комплексування інформації яких зображена на рис. 3.4. Для комплексування інформації від різних сенсорів буде використано фільтр Калмана.

Фільтр Калмана має хорошу реалізацію в ROS, а саме пакет, що має назву robot_localization[11]. Він буде інтегрований для локалізації робота з різними варіаціями датчиків. Кожна схема буде детально описана у розділі 4.

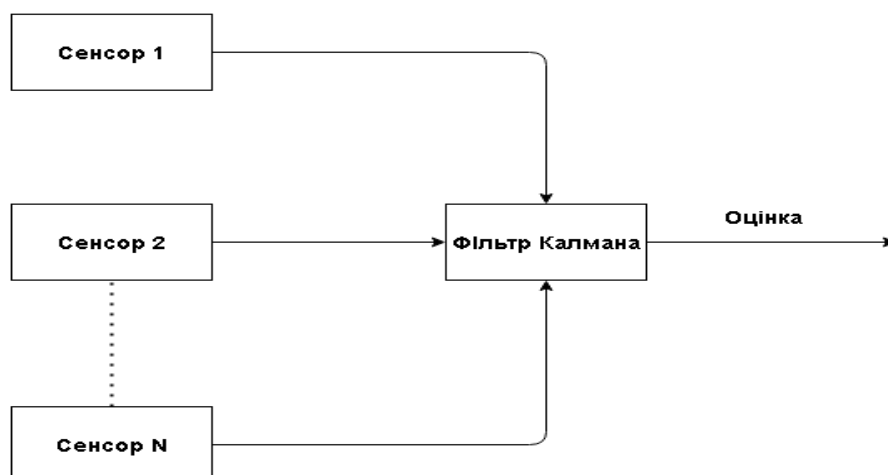


Рисунок 3.4 Схема доповнення навігаційної інформації від N сенсорів

Також для комплексування двох оцінок можуть бути застосовані формули 3.1 та 3.2.

$$\mu = \Sigma_2(\Sigma_1 + \Sigma_2)^{-1}\mu_1 + \Sigma_1(\Sigma_1 + \Sigma_2)^{-1}\mu_2 \quad (3.1)$$

$$\Sigma = \Sigma_1(\Sigma_1 + \Sigma_2)^{-1}\Sigma_2 \quad (3.2)$$

Результатом множення двох багатовимірних функції Гауса буде інша функція Гауса з меншою дисперсією, вона буде вища та вужча. Це логічно, оскільки якщо дві частини невизначеної інформації підтверджують одна одну, то оцінка буде мати більшу достовірність.

3.3 Вибір датчиків первинної інформації

Для розрахунків та симуляції віртуального робота в середовищі Gazebo було обрано розповсюджені моделі датчиків таких, як: LIDAR, енкодери коліс, GPS приймач та блок IMU.

В якості датчика LIDAR був обраний пристрій під назвою RPLIDAR A1[9], що зображений на рис. 3.5. Це ідеальний вибір для застосування з метою локалізації в середині приміщень оскільки він має радіус дії до 12м, має точність в 1° та дозволяє отримувати 8000 семплів з частотою оновлення 10 Гц.



Рисунок 3.5 RPLIDAR A1

В якості оптичного енкодера був вибраний енкодер з дешевого цінового діапазону з можливістю забезпечення 400 семплів за оберт, який зображено на рис. 3.6. Одним з мінусів таких енкодерів є те, що вони дуже чутливі до вібрацій, та можуть враховувати вібрації, як оберти і за таких умов буде вноситись додаткова похибка у вимірювання.



Рисунок 3.6 - Оптичний енкодер

В якості блоку IMU був обраний блок під назвою Razor від компанії Sparkfun, що був зображений на рис. 2.3. Він має 9 степеней вільності так як до його складу входять трьохосьовий компас IC HMC5883L[6], трьохосьовий гіроскоп ITG-3200[7] та трьохосьовий акселерометр ADXL345x[5]. Всі дані для програмування моделей в системі ROS були взяті з документації, що наводиться у посиланнях.

Ідеальним приймачем для застосування супутникової системи навігації був би приймач з підтримкою стандартів RTK (Real Time Kinematic). Які дозволили б збільшити точність встановлення місця положення до десятків сантиметрів. Але оскільки приймачі з підтримкою RTK занадто дорогі їх використовують лише в специфічних конфігураціях мобільних платформ. Тому для моделювання був обраний приймач GPS Ublox NEO-M8N[8] з точністю позиціювання 2-2,5м при наявності сигналу від 6 супутників. Накладається умова на використання антени з хорошим підсиленням. Приймач зображено на рис. 3.7.



Рисунок 3.7 GPS приймач Ublox NEO-M8N

3.4 Алгоритм визначення координат об'єкта

Головною метою дисертації є реалізація комплексного алгоритму локалізації та навігації основанийого на різних підходах.

Оскільки навігація за допомогою системи глобальної супутникової навігації має занадто велику помилку поруч з будівлями за рахунок перевідбиття сигналу, або зовсім не працює в приміщеннях через абсолютну відсутність сигналу її не доцільно використовувати за таких умов, або покладатись зі стовідсотковою впевненістю на отримані координати.

Використання системи LIDAR, в якості оптичного сенсора не є хорошою ідеєю в приміщеннях де немає орієнтирів, наприклад в довгих коридорах, так як алгоритм локалізації базуються саме на чітко виражених орієнтирах.

Інерційна система навігації має помилки при великому відношенні сигнал шум, що має місце при низьких швидкостях. Та поруч місць, що вносять шум до магнітних полів, на які орієнтується гіроскоп.

Одометрія має високу точність на відносні переміщення, але через накопичувальну природу помилок, не може бути використана, як єдиний сенсор для трекінгу або локалізації.

Кожен з підходів локалізації має свої плюси та мінуси. Запропоновано реалізувати алгоритм для локалізації рухомих об'єктів на відкритому просторі та в середині приміщень. Що надасть змогу використовувати мобільну платформу на якій буде встановлена запропонована система в будь яких умовах для різних цілей.

Для локалізації в середині приміщень буде використано підхід зображений на рис. 3.8. Він включає у себе застосування інерційного вимірювального блоку та одометрії, що комплексуються в фільтрі Калмана та дають оцінку відносного переміщення. Системи LIDAR застосовується в поєднанні з сервером карти. Алгоритм, що буде використовуватись побудований на чисельних методах Монте Карло. Він дозволяє порівнювати карту отриману від системи LIDAR в момент часу t та порівнювати її з картою, яка була побудована заздалегідь. Актуальна карта приміщення хоститься за допомогою вузлу під назвою “сервер карти”. Дві оцінки комплексуються між собою за допомогою вузлу комплексування оцінки.

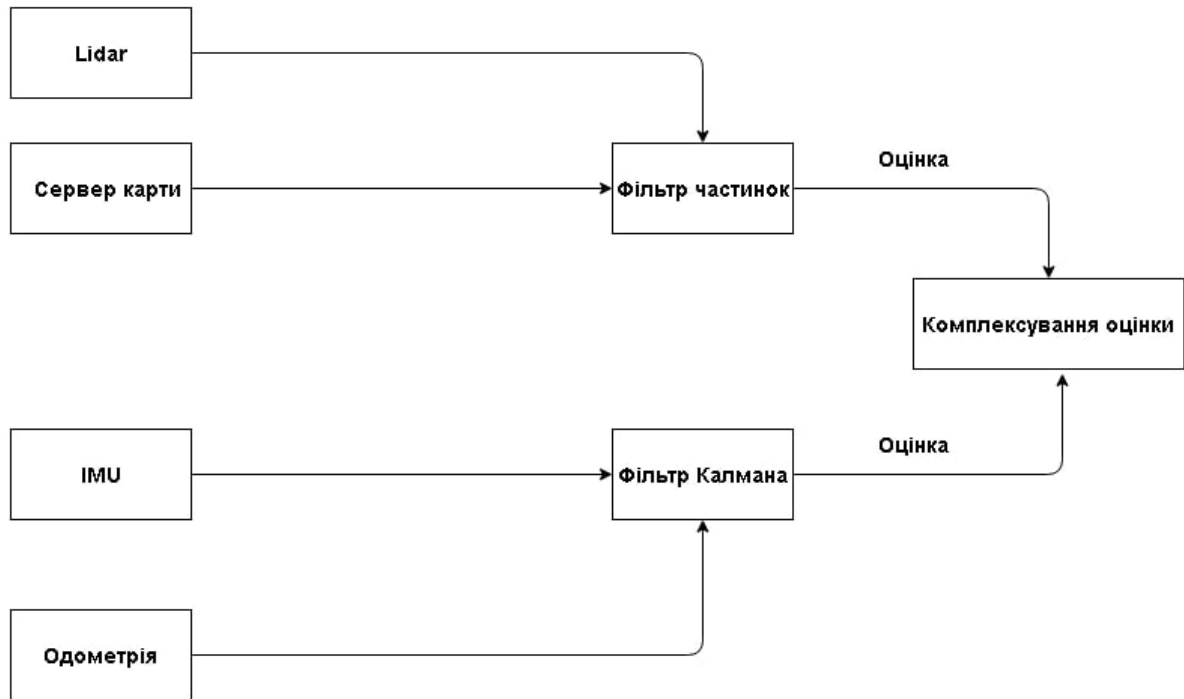


Рисунок 3.8 Узагальнена структурна схема навігаційної системи локалізації об'єкта в середині приміщень

Для локалізації та навігації на відкритому просторі буде використовуватись супутникова навігація, одометрія коліс та інерційний блок вимірювань. Схема реалізації даної частини комплексного алгоритму зображена на рис. 3.9. Одометрія отримується шляхом описаним в розділі 2.1. Вузол комплексування оцінки побудований на формулах 3.1 та 3.2.

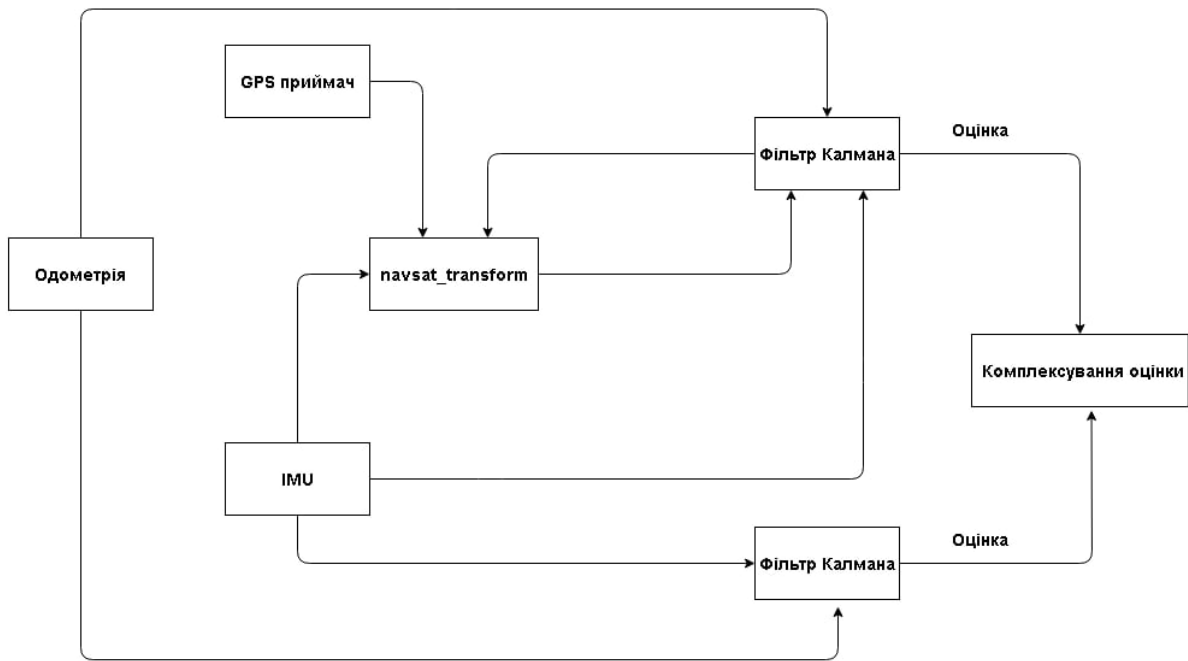


Рисунок 3.9 Узагальнена структурна схема навігаційної системи локалізації рухомого об'єкта на відкритому просторі

Розглянувши узагальнені структурні схеми навігаційної системи локалізації рухомого об'єкта на відкритому просторі та в середині приміщень перейдемо до опису комплексного алгоритму, блок-схема, якого зображена на рис. 3.10.

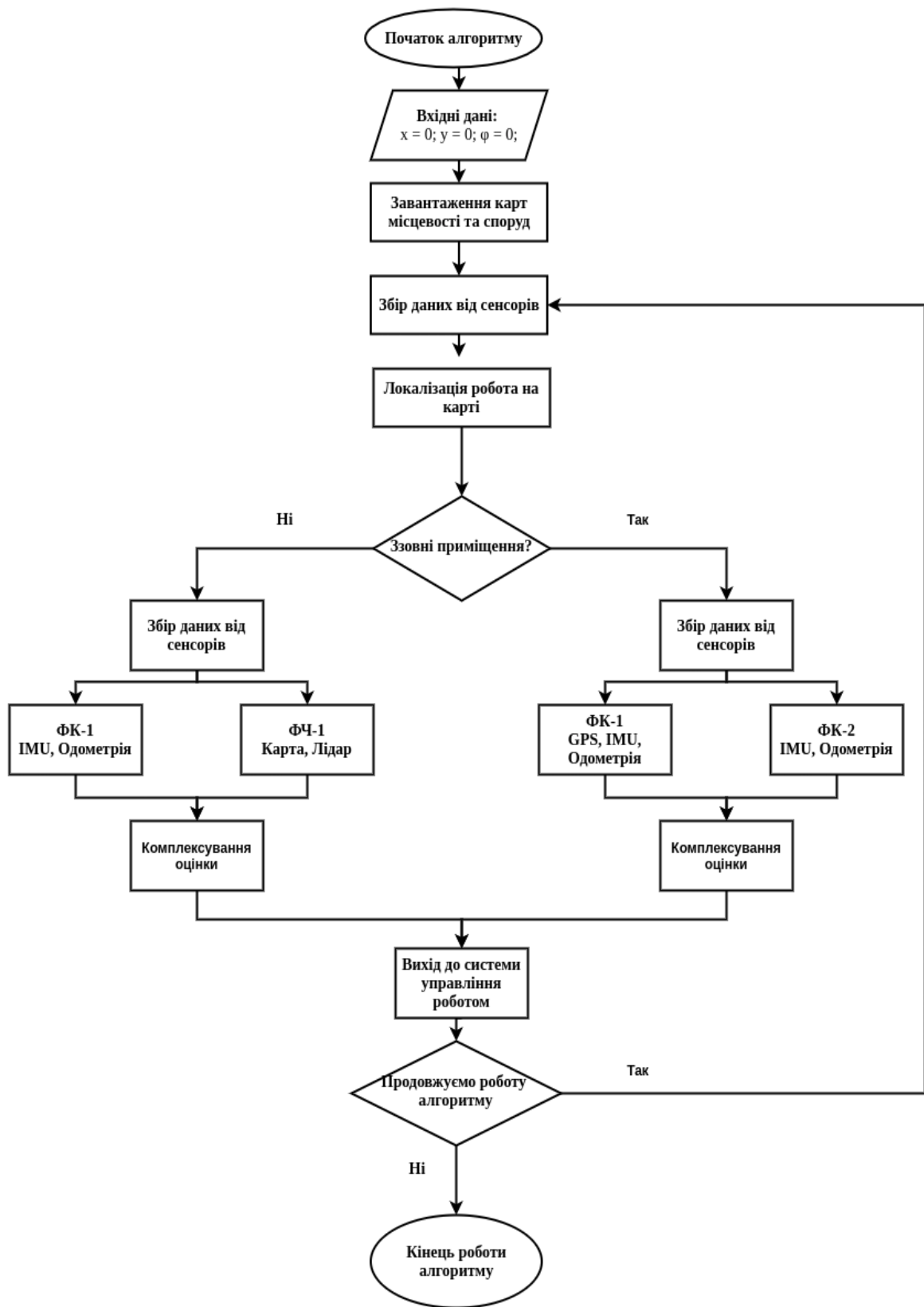


Рисунок 3.10 Блок-схема алгоритму роботи комплексної навігаційної системи локалізації рухомого об'єкту

Алгоритм розпочинає роботу з ініціалізації початкових умов. Якщо робот нічого не знає про своє місце розташування на момент початку алгоритма, то початкові значення зазначаються нулями. Якщо була відома апріорна навігаційна інформація вона може бути внесена під час ініціалізації задля кращої та швидкої оцінки дійсного місця положення рухомого об'єкту.

Наступним кроком алгоритму є завантаження заздалегідь побудованих карт місцевості або карт приміщень в яких буде здійснюватись рух.

Далі робот починає збір даних від сенсорів та намагається локалізувати себе відносно завантаженої на попередніх етапах алгоритму карти або відносно всесвітньої системи координат WGS 84.

Далі виконується перевірка умови чи виконується локалізація відносно всесвітньої системи координат чи відносно карти приміщення або місцевості. Якщо локалізація відбувається відносно WGS 84, то запускаються вузли, які зображені на узагальненій структурній схемі навігаційної системи локалізації рухомого об'єкта на відкритому просторі, що зображена на рис.3.9.

У цьому варіанті запускаються два незалежні один від одного вузли, у яких виконується алгоритм фільтрів Калмана. У одному фільтрі комплексується отримана після препроцесинга інформація від приймача GPS, одометрії та IMU. У іншому фільтрі Калмана комплексується інформація від IMU та одометрії. Далі отримані оцінки комплексується за формулами 3.1 та 3.2 та отримується оптимальна оцінка навігаційної інформації.

Якщо локалізація відбувається відносно карти місцевості, то запускаються вузли, які зображені на узагальненій структурній схемі навігаційної системи локалізації рухомого об'єкта на всередині приміщень, що зображена на рис.3.8.

У цьому випадку запускаються два вузли, а саме вузол фільтру Калмана та вузол фільтру частинок. У фільтрі Калмана комплексується інформація отримана після препроцесинга від IMU та одометрії. А у фільтрі частинок відбувається оцінка місця положення робота відносно карти місцевості за рахунок обробки інформації від системи LIDAR.

Далі отримані оцінки комплексуються за формулами 3.1 та 3.2 та отримується оптимальна оцінка навігаційної інформації.

Після отримання оптимальної оцінки місця положення робота, оцінка передається до системи керування роботом, яка може використовувати отриману навігаційну інформацію для виконання траєкторій, або інших завдань, від інших модулів, що можуть бути інтегровані до платформи автономного робота.

Алгоритм виконується до тих пір поки не прийде сигнал про вимкнення системи комплексної навігації та локалізації від системи управління роботом або від оператора.

Висновки до розділу

У цьому розділі був представлений розроблений комплексний алгоритм локалізації та навігації рухомого об'єкта на відкритому просторі та у середині приміщень. Що розширює можливості автономних мобільних роботів для використання їх в універсальних умовах. Алгоритм побудований на основі двох фільтрів - фільтру Калмана та фільтру частинок, що є найкращими рішеннями для вирішення поставлених задач.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИТМУ

4.1 Комплексування GPS та IMU в одновимірному просторі

Дані про місце положення об'єкта отримані за допомогою GPS надходять в форматі NMEA 0183. Вони несуть інформацію про положення об'єкта в світовій системі координат, а саме - довготу, широту та висоту об'єкта. Для того щоб співставити координати з відносним переміщенням було написано препроцесор для обробки інформації.

В препроцесорі використовується пакет ROS - `navsat_transform`[10], що дозволяє перераховувати глобальні координати в відносне переміщення об'єкта та дозволяє комплексувати отримані дані за допомогою фільтра Калмана.

Дані, що отримуються з блоку інерційного вимірювання (IMU) містять в собі інформацію про лінійні та кутові прискорення об'єкта. Вони відразу можуть бути зкомплексованими в фільтрі Калмана.

Структурна схема комплексування зображена на рис. 4.1:

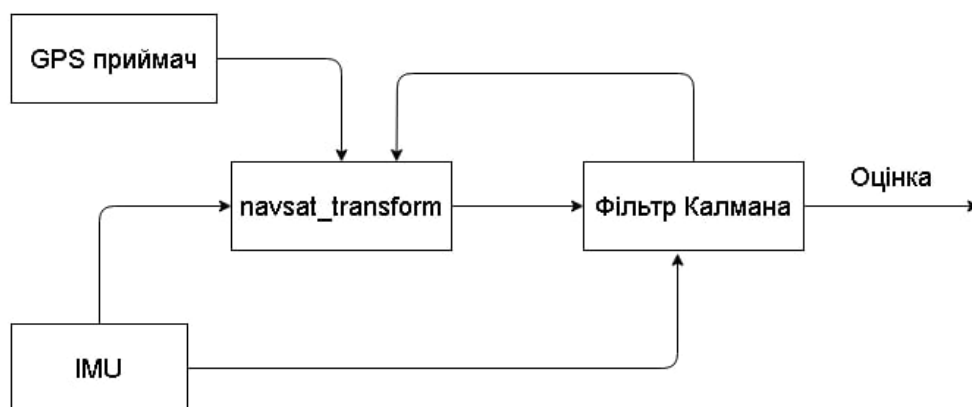


Рисунок 4.1 Схема комплексування даних IMU та GPS

Для дослідження даного варіанту комплексування була написана програма та просимульований процес руху робота по прямій лінії. Так як сенсори мають ідеальні показники, були написані вузли, які вносять шум вимірювань, що має Гаусівський розподіл. Також написаний вузол, що будує графік ідеальної траєкторії

робота та траєкторії отриманої за допомогою фільтра Калмана. Структурна схема для дослідження має вигляд зображений на рис. 4.2:

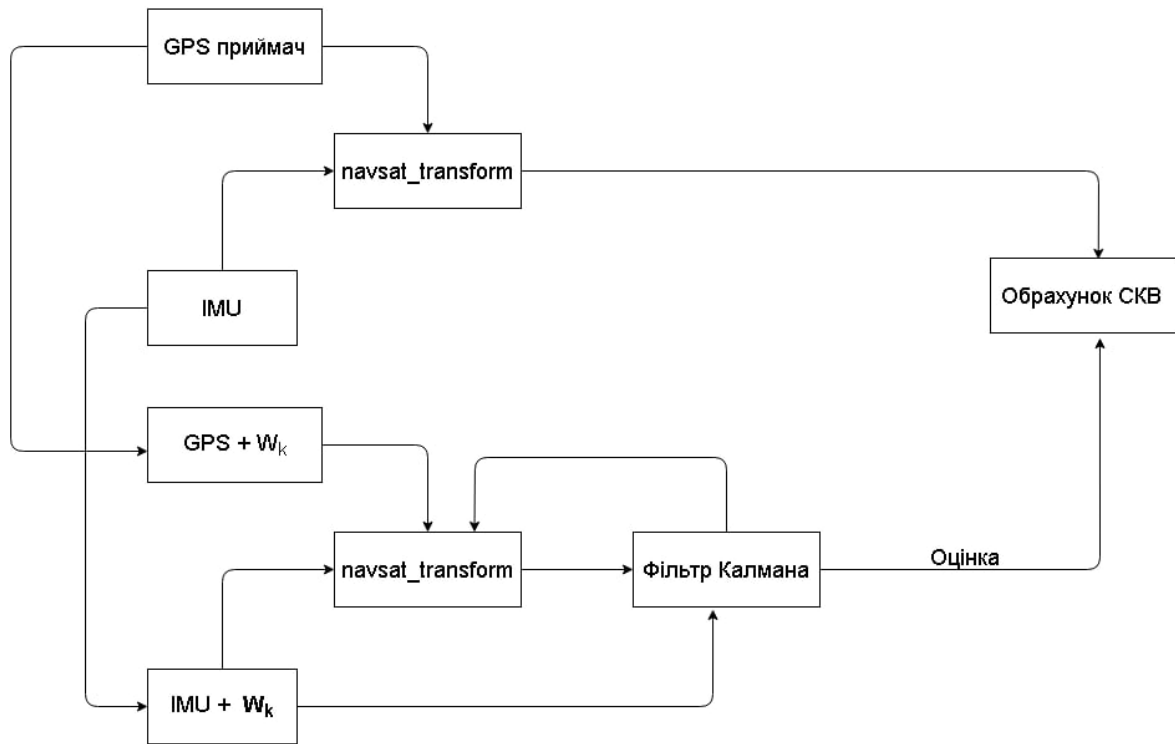


Рисунок 4.2 Схема дослідження комплексування IMU та GPS

В якості експерименту було написано програму в якій робот husky рухається прямолінійно зі сталою швидкістю в середовищі Gazebo. Опишемо кожний вузол.

Вузол IMU отримує дані від датчика та передає їх в вузол під назвою “IMU + W_k ”.

Вузли navsat_transform отримують дані про довготу, широту, висоту від GPS приймача та перераховують їх у відносно переміщення, яке надалі подається в фільтр Калмана.

Вузол “IMU + W_k ” додає до ідеальних вимірів інерційного вимірювального блоку Гаусівський шум.

Вузол “GPS + W_k ” додає до ідеальних вимірів GPS приймача Гаусівський шум.

Вузол фільтра Калмана комплексує дані від двох датчиків і робить оцінку місця положення робота husky.

У вузол під назвою обрахунків СКВ надходять ідеальні виміри та оцінка на кожному кроці роботи фільтра Калмана та виконується розрахунок середньоквадратичного відхилення оцінки від дійсних координат робота. Результати експерименту зображені на рис. 4.3 та рис. 4.4.

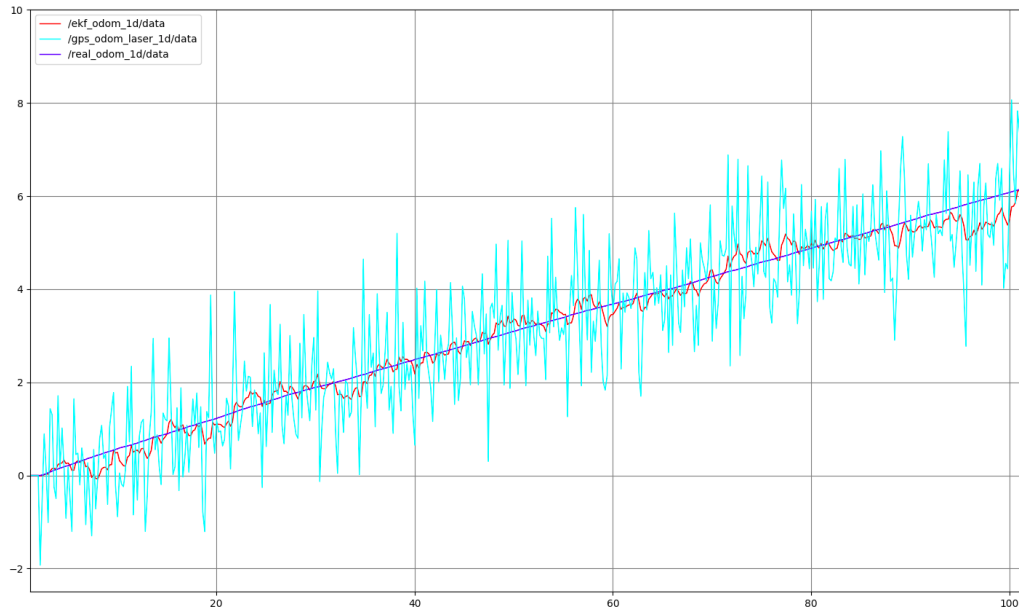


Рисунок 4.3 Траєкторія руху об'єкта отримана за допомогою ФК та GPS

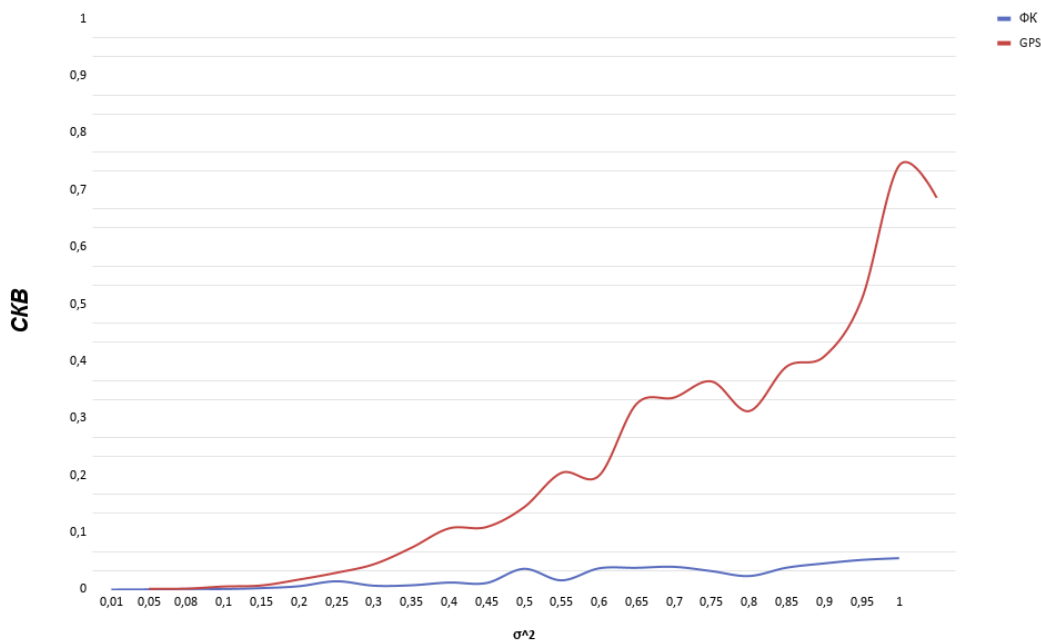


Рисунок 4.4 СКВ траєкторії отриманої за ФК

Видно, що комплексування GPS та IMU за допомогою ФК значно покращують оцінку місця положення об'єкту в порівнянні з використанням лише GPS модуля в 2-3 рази.

4.2 Комплексування GPS, IMU, одометрії в одновимірному просторі

На рис. 4.5 зображена схема комплексування даних отриманих від IMU, GPS та одометрії. Від попереднього варіанту вона відрізняється наявністю двох фільтрів Калмана.

Новий вузол, що додається має назву “Одометрія”, він відповідає за перерахунок отриманих від енкодерів “сирих” даних про оберти. Та за допомогою формул перерахунку наведених у розділі 2.1 формує дані про швидкість та позицію робота, що можуть бути зкомплексованими, використовуючи фільтр Калмана.

Так як оцінки на виході фільтрів Калмана є функціями Гауса, то вони легко можуть бути перемножені між собою для отримання єдиної оптимальної оцінки.

На рис. 4.6 зображено траєкторії руху робота отримані від IMU, GPS, одометрії та траєкторію отриману за допомогою фільтру Калмана. Бачимо, що траєкторія отримана за рахунок одометрії вносить у фільтр Калмана похибку так як має інтегрувальний характер. Для наглядності було додано велику дисперсію шуму. На рис. 4.7 зображено СКВ для проведеного експерименту.

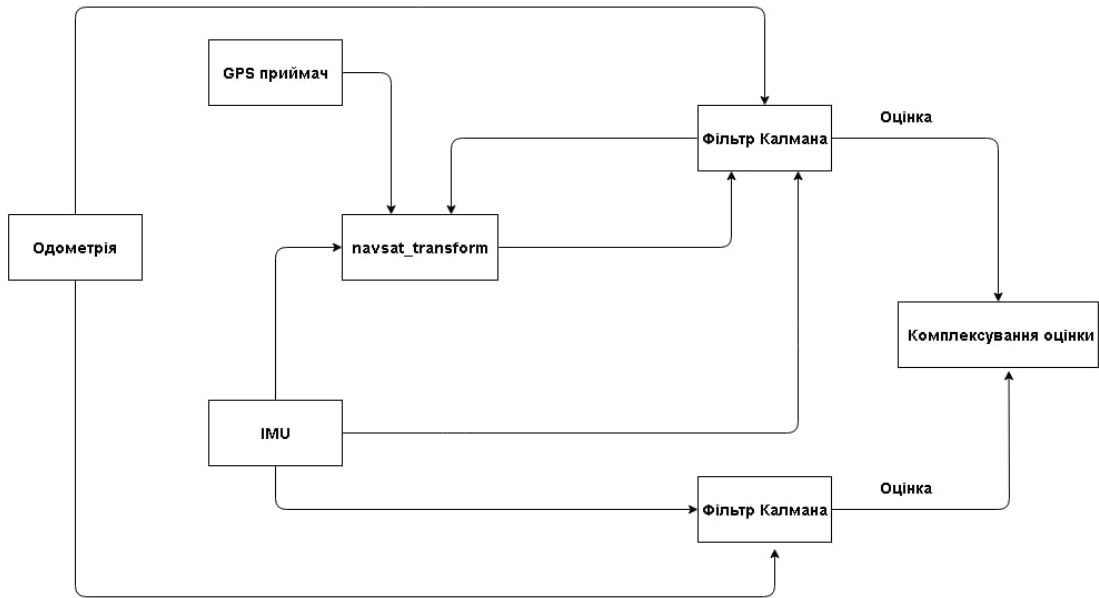


Рисунок 4.5 Схеми комплексуювання GPS, одометрії та IMU

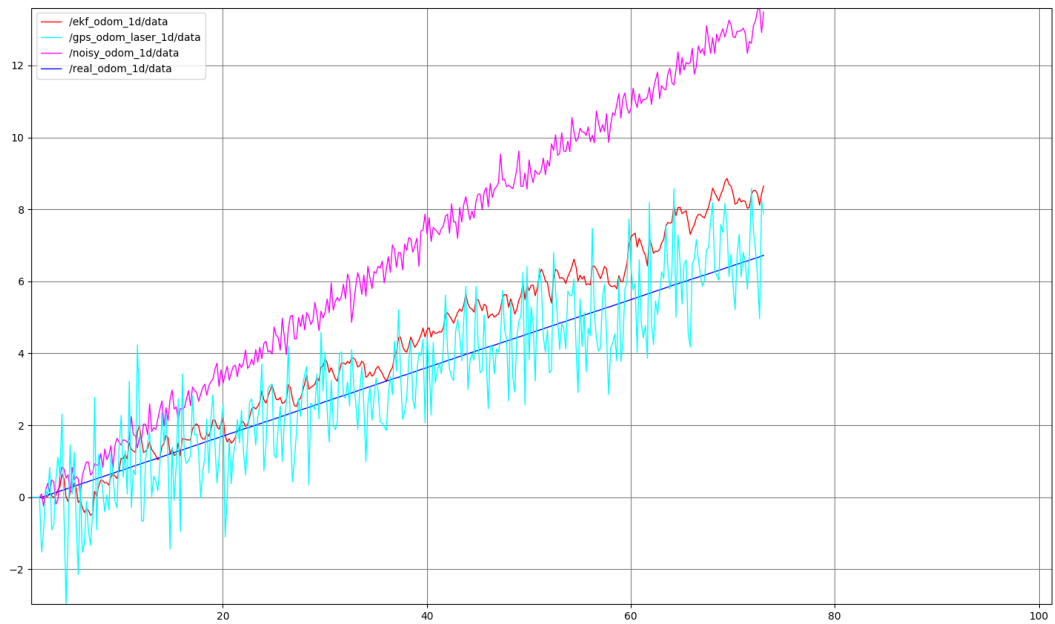


Рисунок 4.6 Траєкторія руху отримана за допомогою комплексуювання GPS, одометрії та IMU

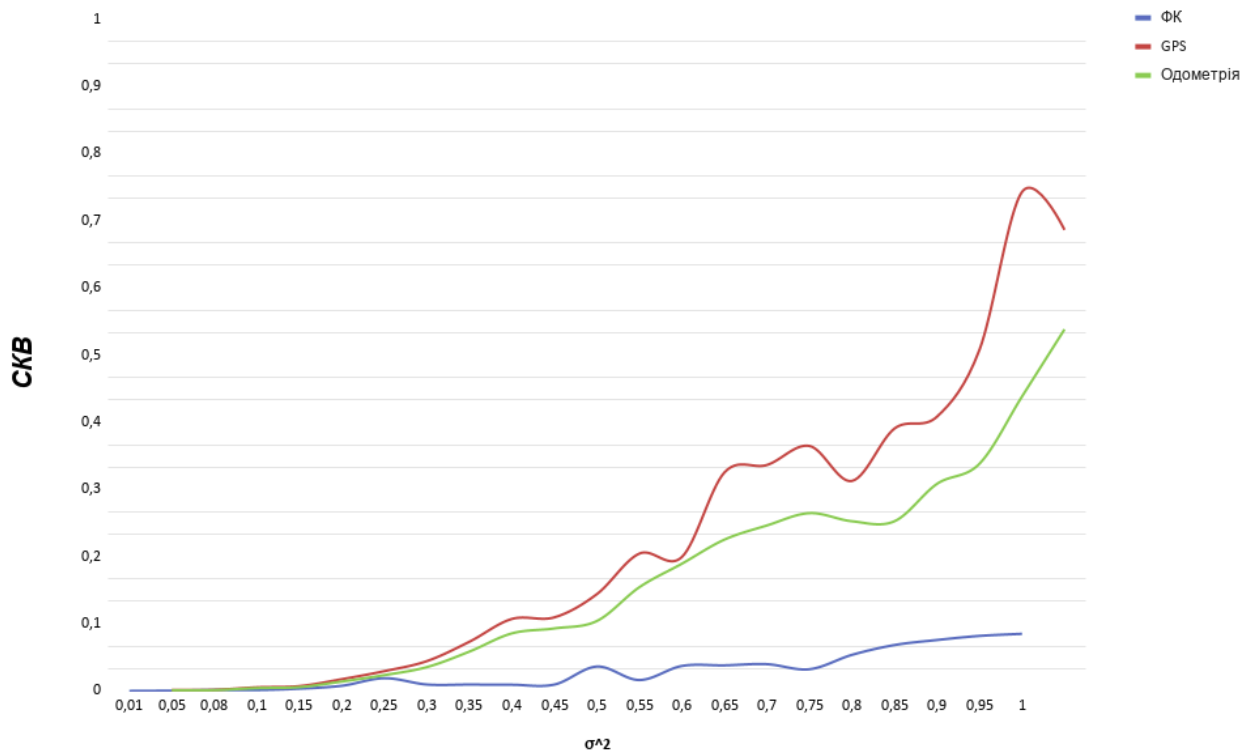


Рисунок 4.7 СКВ траєкторії отриманої за ФК, GPS, одометрії

4.3 Комплексування GPS, IMU, енкодерів та LIDAR в одновимірному просторі

Для того, щоб застосувати LIDAR в симуляції було додано перешкоду в вигляді стіни. Так як робот рухається лише в одному напрямку, в напрямку стіни, то показання системи LIDAR будуть обернено пропорційні відстані, яку проїхав робот, що дає змогу дізнатись відносно переміщення та комплексувати дані отримані з системи LIDAR в фільтрі Калмана. Результати зображені на рис. 4.8 та 4.9.

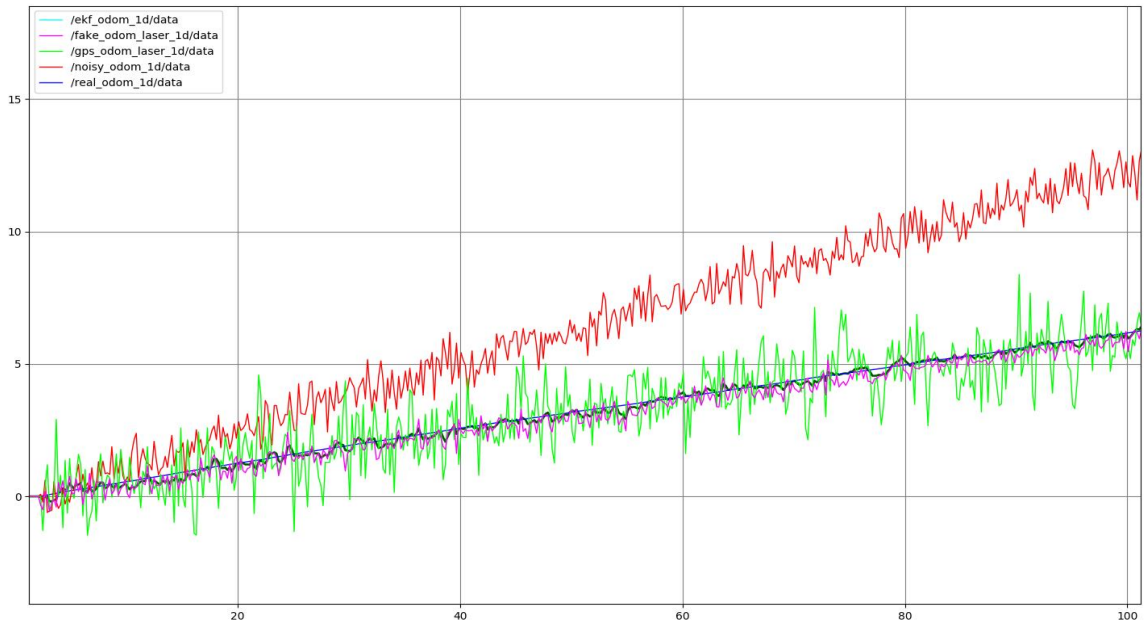


Рисунок 4.8 Траєкторія руху отримана за допомогою комплексування GPS, одометрії, IMU та LIDAR

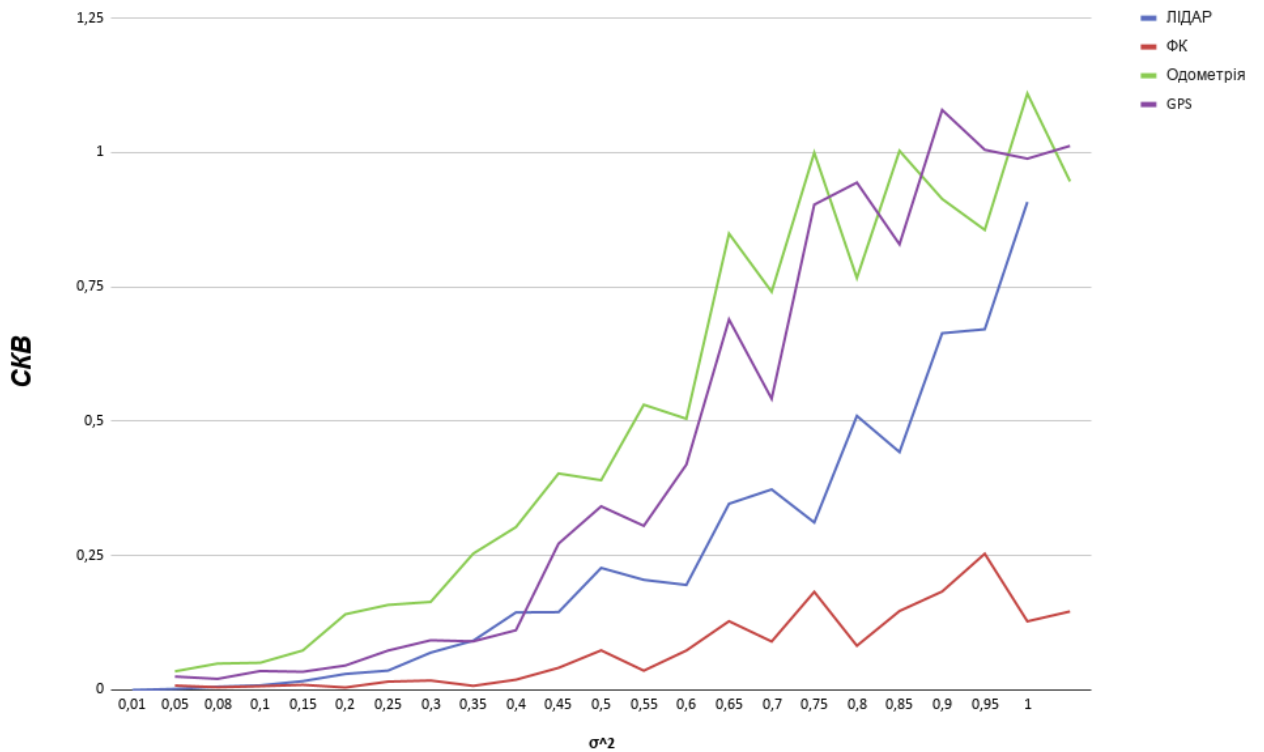


Рисунок 4.9 СКВ траєкторії отриманої за ФК, GPS, одометрією та LIDAR

Як висновок можна сказати, що навіть при наявності дуже не точних датчиків первинної навігаційної інформації, оцінка отримана за допомогою фільтру Калмана є досить точною та відповідає вимогам сучасних мобільних роботів. Після дослідження системи з комплексуванням GPS, одометра та IMU прийшли до висновку, що у разі можливості обов'язково необхідно включити систему LIDAR. Що підвищить точність у 5-7 разів.

4.4 Комплексування GPS, IMU, одометрії в двовимірному просторі

Для аналізу роботи запропонованого алгоритму була створена програма на базі мета-операційної системи ROS та створено процес симуляції руху робота за допомогою Gazebo. На рис. 4.10 можна спостерігати процес руху робота husky по 2d траєкторії на місцевості з орієнтирами. Червоними маркерами показано реальну траєкторію руху робота. Можна спостерігати, що обрано дуже зашумлений gps приймач, що спричиняє великі коливання в вимірах.

На вхід фільтра Калмана подається одометрія, сигнал GPS та виміри інерційного блоку вимірювань. Потім отримана оцінка комплектується з оцінкою від фільтру частинок.

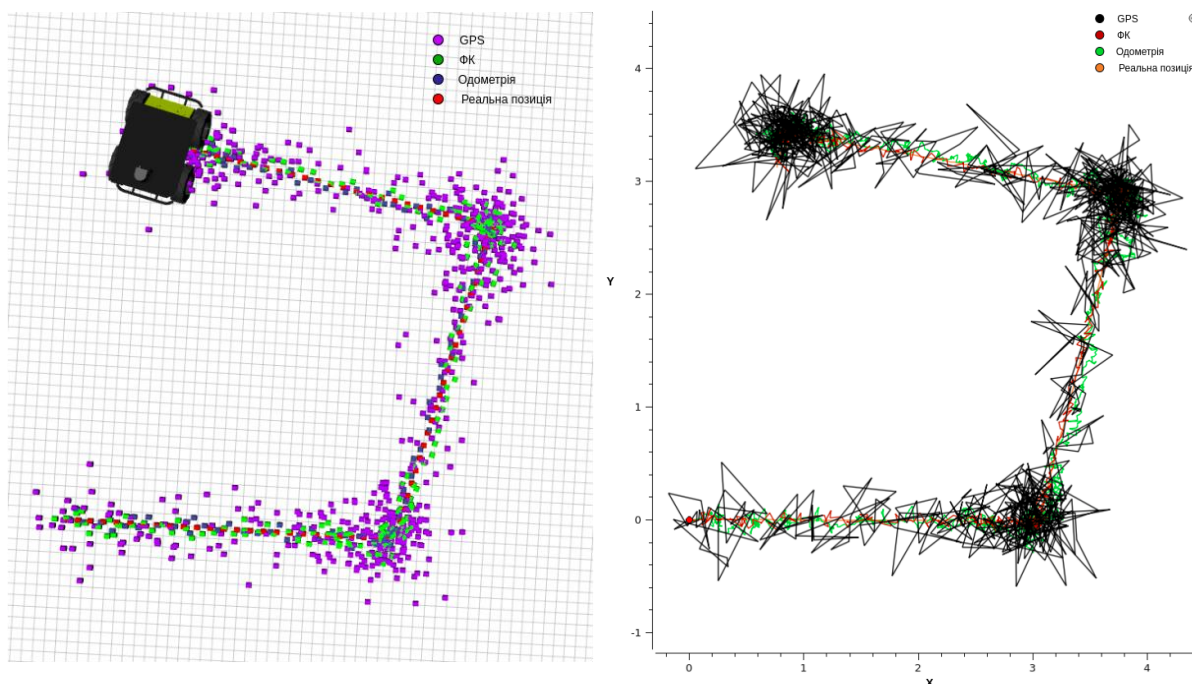


Рисунок 4.10 Траєкторії руху робота в двовимірному просторі

Для кращої оцінки роботи алгоритму зображені зміни координати X та Y, на рис. 4.11 та 4.12.

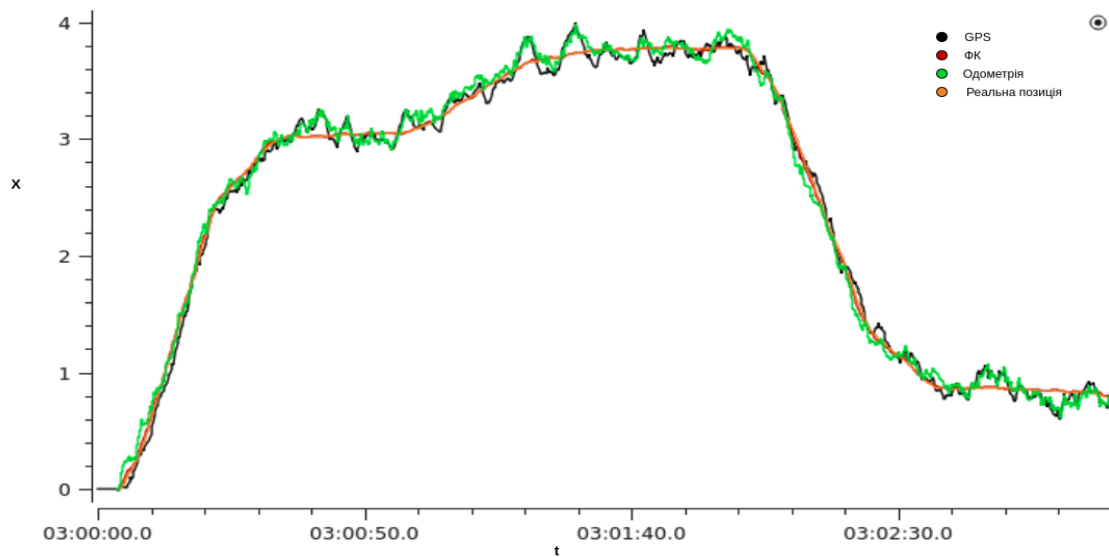


Рисунок 4.11 Зміна координати X

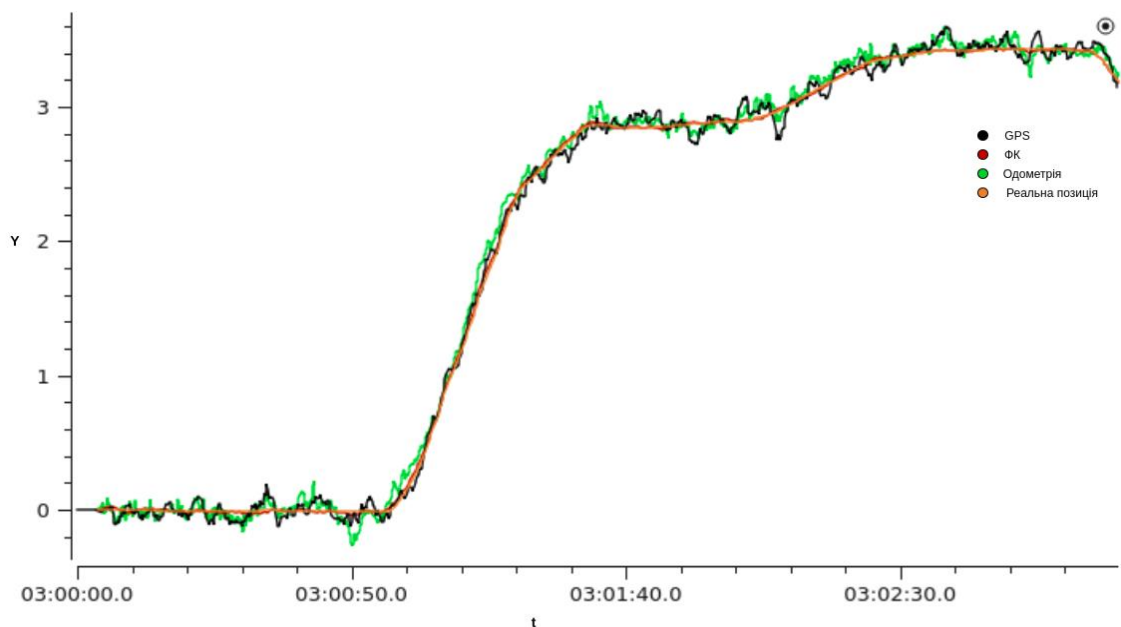


Рисунок 4.12 Зміна координати Y

Також для кращої оцінки були масштабовані графіки змін координат X та Y на рис. 4.13 та 4.14.

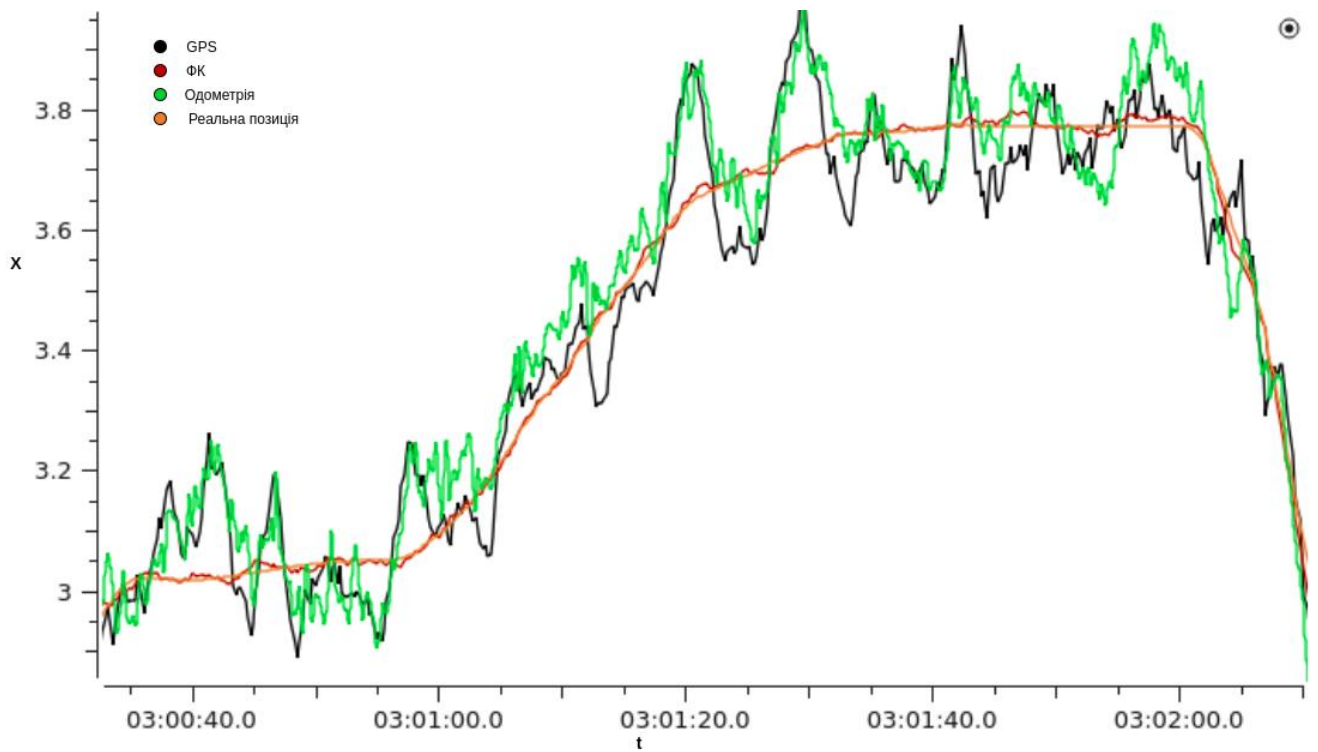


Рисунок 4.13 Зміна координати X (збільшений масштаб)

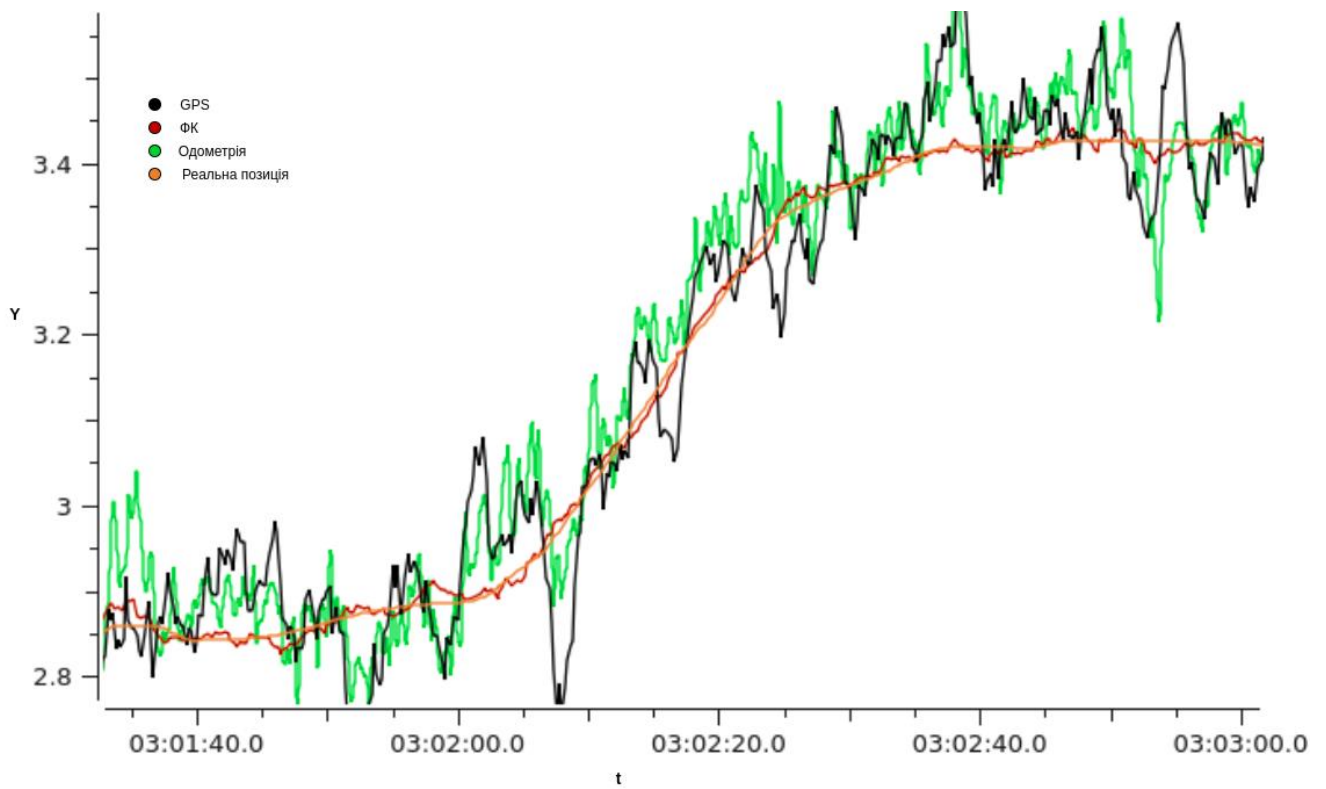


Рисунок 4.14 Зміна координати Y (збільшений масштаб)

Висновки до розділу

Аналіз запропонованого алгоритму показав, що навіть при наявності дуже зашумлених датчиків можна отримати дуже точну оцінку місця положення рухомого об'єкту. В деяких місцях оцінка навіть співпадає з точним місцем розташування робота. Можна спостерігати, що показання GPS та одометрії дуже нестабільні в місцях поворотів, але оцінка компенсується вимірами інерційного блоку вимірювання та оцінкою місця положення за допомогою фільтру частинок.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї проекту

Результати даного дослідження можливо використати для створення навігаційного застосунку із підвищеною достовірністю отримуваних навігаційних даних.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Навігаційний алгоритм із високою достовірністю отриманих навігаційних даних та високою достовірністю локалізації рухомого об'єкта в просторі.	1. Виробнича діяльність	1. Автоматизація процесів переміщення вантажів 2. Збільшення швидкості переміщення мало та великогабаритних об'єктів
	2. Сфера обслуговування	1. Заощадження фінансових ресурсів компаній 2. Пришвидшене обслуговування збільшує попит серед клієнтів.

	3. Сільське господарство	<ol style="list-style-type: none"> 1. Автоматизоване переміщення урожаю. 2. Переміщення за чітко зазначеними координатами, яке надає можливість не нашкодити врожаю.
	4. Розумний будинок	<ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість економії часу та коштів.

Висновок: в таблиці наведені основні напрямки застосування запропонованого алгоритму локалізації та навігації рухомих об'єктів. Споживачами є зацікавлені користувачі.

Таблиця 5.2 Визначення сильних слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко економічні характеристики ідеї	Мій алгоритм	Gmapping	Hector SLAM	W (слабка сторона)	N нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Мінімальна вартість системи	3000грн	2000грн	2000грн	-	+	-

2	Наявність додатку контролю	Присутня	Відсутня	Відсутня	-	+	-
3	Стійкість до відмов	Середня	Середня	Середня	+	-	-
4	Локалізація в середині приміщень	Присутня	Присутня	Присутня	+	-	-
5	Локалізація на відкритому просторі	Присутня	Відсутня	Відсутня	+	-	-
6	Можливість розширення кількості сенсорів первинної інформації	Присутня	Відсутня	Відсутня	+	-	-
7	Технічна документація	Присутня	Присутня	Присутня	-	+	-
8	Поріг освоєння	Середній	Високий	Високий	-	+	-
9	Зручний та зрозумілий інтерфейс комунікації з користувачем	Присутній	Відсутній	Відсутній	-	+	-

10	Підтримка GPS	Присутня	Відсутня	Відсутня	+	-	-
11	Підтримка лідару	Присутня	Присутня	Присутня	+	-	-
12	Підтримка IMU	Присутня	Присутня	Присутня	+	-	-
13	Підтримка карти приміщення	Присутня	Присутня	Присутня	+	-	-

У порівнянні з зазначеними алгоритмами конкурентів запропонований в магістерській дисертації алгоритм має ряд переваг – підтримка локалізації та навігації як всередині приміщень, так і на відкритому просторі, можливість розширення кількості датчиків первинної інформації, що збільшуватиме точність роботи алгоритму, але має дорожчу вартість, що зумовлена більшим функціоналом та більшою кількістю датчиків.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Керування роботизованою автономною платформою	Бібліотеки мов програмування C, C++, Python; різноманітні API доступні в ROS	Наявні	Доступні

2	Підвищення точності визначення місця розташування	Фільтр Калмана, фільтр частинок	Наявні	Доступні
3	Програма контролю виконання встановлених переміщень	Мета-операційна система ROS	Наявні	Доступні

Висновок: зазначені ініціативи з точки зору технологій, що мають бути застосовані для реалізації є здійсненими. Кожна з запропонованих ідей є підґрунтям для створення якісного продукту. Комбінування готових рішень наведених в технологія дають змогу пришвидшити розробку, шляхом комбінування.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	5
2	Загальний обсяг продаж, грн./ ум.од.	700шт/рік, 2000 грн/ум.од
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	65%

Висновок: якщо врахувати невелику кількість головних гравців на ринку та динаміку ринку, яка зростає з року в рік за рахунок клієнтоорієнтованості. То можна дійти висновку про привабливість ринку для запуску запропонованого стартап-проекту.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Виконання мобільною роботизованою платформою безпечних траєкторій	Виробництва, склади, фабрики, сфера обслуговування, сфера сільського господарства	Різноманітні вимоги до функціоналу.	Зрозумілий інтерфейс керування. Легкість у використанні.
2	Застосування в військовій сфері для виявлення та розмінування небезпечних об'єктів з високою точністю рухів	Військова сфера	Різноманітні вимоги до функціоналу.	Захищеність даних.

Висновок: було визначено цільову аудиторію стартап-проекту, вимоги та їх особливості для потенційних споживачів.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Специфічний напрям	Мала кількість зацікавлених осіб.	Проведення онлайн лекцій та маркетингових заходів, що освітлюватимуть переваги запропонованого алгоритму. Впровадження програм лояльності.
2	Вихід системи з ладу	Окремі датчики вийшли із ладу та надають неправдиву первинну інформацію	Заміна/ремонт обладнання
3	Низький рівень початкових капіталовкладень	Нестача початкових інвестицій для запуску продукту	Пошук альтернативних джерел інвестицій

Висновки: відповідно до досліджуваної інформації головними факторами загроз є конкуренти та нестача інвестицій. Товари від інших провідних компаній мають певну репутацію та контракти на постачання продуктів споживачам. Конкурентні компанії мають змогу демпінгувати ціни для отримання нових клієнтів.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Інтеграція з іншими системами	Надає можливість розширення ринку збуту	Масштабування алгоритму, створення інтерфейсу для інтеграції алгоритму з іншими модулями
2	Зацікавленість споживачів у продукті	Зростання кількості клієнтів	Розширення штату розробників. Зміна цін на продукт
3	Зменшення кількості конкурентних компаній	Ліквідація конкурентного виробництва	Проведення компанії для монополізації клієнтів
4	Запуск аналогічного продукту конкурентами	Інтеграція нового функціоналу	Впровадження нових підходів для здешевлення продукту.

Висновок: існують фактори можливостей та шляхи реагування на них.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№ п/п	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	Тип конкуренції: олігополія	Кількість конкурентів - незначна, велика кореляція технологій, що використовуються	Співпраця з конкурентами на вигідних умовах. Запуск рекламної кампанії.
2	Рівень конкурентної боротьби: галузевий	Поява нових конкуруючих компаній	Запуск рекламної кампанії спрямованої на висвітлення переваг.
3	Галузева ознака: внутрішньогалузева	Конкуренція здійснюється всередині однієї галузі	Підвищення рівня надійності, онлайн підтримка користувачів.
4	Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між схожими товарами	Зміна маркетингової політики
5	Характер конкурентних переваг: неціновий	Конкуренція в якісних	Постійна розробка для зменшення недоліків та

		характеристиках	збільшення надійності.
6	За інтенсивністю: марочна	Спільна цільова аудиторія	Інформування споживачів про використання кращих технологій.

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

С к л а д о в і а н а л і з у	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Відсутні	Clearpath, Romba	Розробники програмного забезпечення, постачальники електронних комплектуючих	Дилери точок продажів техніки	Обчислювальні модулі, альтернативні алгоритми
В и с н о в	Прямі конкуренти в галузі спрямовані на розробку інших напрямків продукту.	Конкуренція відбувається на корпоративному рівні.	Іноді постачальникам послуг властиве зловживанням виконання повноважень в зазначені	Клієнти формують цінову і якісну політику.	Можливість розширення функціоналу шляхом імплементації додаткових

К И			терміни. Завищення рівня оплати праці.		алгоритмів та підтримки більшої кількості сенсорів первинної інформації
--------	--	--	--	--	---

Висновок: за результатами проведеного аналізу конкуренції в галузі за М. Портером, можна дійти до висновку, що на ринку є достатньо місця для виходу стартап-проекту. Оскільки кожен з продуктів конкурентів, хоч і має подібний функціонал та схоже призначення, але основними відмінностями є інші способи реалізації та інші цілі.

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Висока достовірність навігаційних даних	Застосування різноманітних алгоритмів фільтрації для отримання найбільш достовірних даних.
2	Швидкість роботи	Швидкість роботи алгоритму дозволяє застосовувати його в різноманітних ситуаціях,

		коли оцінка потрібна з високою частотою дискретизації.
3	Автономність	Алгоритм працює повністю автономно, отримуючи на вхід команди від інших модулів, якщо такі присутні в системі.
4	Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс взаємодії	Низький поріг адаптації при роботі з алгоритмом дозволяє його використання в будь яких технічних умовах.

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бал и 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Romba						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Висока достовірність навігаційних даних	20					+		
2	Швидкість роботи	15					+		
3	Автономність	10					+		
4	Інтуїтивно	5				+			

	зрозумілий інтерфейс взаємодії								
--	-----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Висновки: беручи до уваги фактори конкурентоспроможності та рейтинг продукту можна висловити припущення, що відносно конкуренту, продукт, що запропоновано має більший рейтинг.

Таблиця 5.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <p>висока достовірність навігаційної інформації.</p> <p>Можливість інтеграції додаткових алгоритмів та сервісів.</p> <p>Висока надійність</p>	<p>Слабкі сторони:</p> <p>малий початковий капітал.</p> <p>Необхідність випуску рекламної кампанії.</p>
<p>Можливості:</p> <p>висока зацікавленість у реалізації потенційних споживачів.</p> <p>Знаходження інвестицій.</p>	<p>Загрози:</p> <p>вихід на ринок конкурентного продукту з аналогічним алгоритмом роботи.</p> <p>Відмова у фінансуванні.</p> <p>Низька довіра користувачів</p>

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
----------	--	--------------------------------	-------------------

1	Реклама	Використання грошей інвесторів	1 - 2 місяці
2	Написання статей в наукові видання	Використання власних коштів	1 - 2 місяці
3	Презентація алгоритму на виставках, IT конференціях	Зацікавлення організаторів	2 - 3 місяці
4	Надання тестового доступу до продукту	Людський ресурс та час	1 - 2 місяці

5.4 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Сфера обслуговування	Низька	Низька	Низька	Середня
2	Розумний будинок	Висока	Середній	Середня	Висока
3	Підприємницька діяльність	Висока	Високий	Середня	Висока

4	Військова сфера	Висока	Високий	Середня	Висока
5	Сільське господарство	Висока	Високий	Середня	Середня

Висновки: як цільові групи обрано 3ту, 4ту та 5ту.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Надання системи навігації та локалізації для будь-яких цілей	Вибіркова стратегія, на основі орієнтованості	Низькі витрати на зміну орієнтації за рахунок модульності алгоритму.	Стратегія диференціації

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів,	Чи буде компанія копіювати основні	Базова стратегія розвитку

		або забирати існуючих у конкурентів?	характеристик и товару конкурента, які?	
1	Ні	Забирати існуючих у конкурентів та орієнтуватись на нових.	Ні, оскільки аналогів немає.	Стратегія розширення первинного попиту.

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Правильність оцінки навігаційних даних	Стратегія диференціації	Точність	Висока достовірність
2	Легкий в освоєнні інтерфейс	Стратегія диференціації	Лаконічність	Простота
3	Захищеність інформації	Стратегія диференціації	Захист даних	Безпека

4	Можливість додавання входів	Стратегія диференціації	Розширення функціоналу	Кастомізація
---	-----------------------------	-------------------------	------------------------	--------------

5.5 Розроблення маркетингової програми

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Правильність оцінки навігаційних даних	Розрахунки підлягають перевірці фахівців та QA	Якість наданої інформації
2	Легкий в освоєнні інтерфейс	Інтуїтивно зрозуміле API	Інноваційність та зручність дизайну.
3	Захищеність інформації	Застосування криптографічних алгоритмів для шифрування	Підвищений рівень безпеки.
4	Можливість додавання входів	Адаптивність фільтрів шляхом налаштування кількості входів	Простота реалізації

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Алгоритм підвищення точності локалізації та навігації рухомих об'єктів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/ характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	Достовірність розрахунків	М	Тл
	Швидкість роботи алгоритму	М	Тх
	Документація	Нм	Тх
	Вартість	Нм	Тл
III. Товар із підкріпленням	До продажу: забезпечення документацією, програма лояльності для споживачів, забезпечення API для інтегрування алгоритму в подальші системи.		
	Після продажу: допомога спеціалістів в подальшому налаштуванні та імплементації алгоритму, підтримка в аварійних випадках, консультації у будь яких питаннях		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент, захист інтелектуальної власності. Код алгоритму буде приховано від кінцевого користувача.			

Висновок: до старту продажів потрібно зробити повну документацію на продукт, написати API та створити програму лояльності. Після продажу потрібна підтримка спеціалістів в питаннях налаштувань та імплементації.

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1500 – 2000 грн./од.	2500 – 3000 грн./од	15 000 – 25 000 грн./міс.	1000 – 2500 грн./од.

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Програма лояльності для постійних покупців. Окремі умови для корпоративних	Інформування користувачів	Канал другого рівня	Роздріб

	закупівель.			
--	-------------	--	--	--

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канал комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Підприємці	Приватні зустрічі з компаніями. Реклама в соціальних мережах.	Надійність, Достовірність розрахунків, легкість та зручність інтерфейсу.	Донести до потенційних споживачів інформацію про появу нового продукту на ринку.	Таргетова стратегія реклами
2	Розробники	ІТ вебінари, конференції, мітапи.		Забезпечити відповіді на всі питання, що виникають.	
3	Власники сільського господарства	Спеціалізовані виставки та форуми		Пояснити принципи роботи алгоритму. Розширити знання про потреби споживачів для подальшого вдосконалення продукту.	
4	Військові	Спеціалізовані виставки та форуми			

Результатом пункту 5.5 є створення ринкової програми, що складається з концепту послуг, збуту та просування продукту. Програма спирається на потреби споживачів та є клієнто-орієнтованою.

Висновки до розділу

Описаний стартап-проект буде затребуваним на ринку, адже має низку переваг, таких як - ціна, якість, орієнтованість на клієнтську базу. Незважаючи на високий рівень конкурентності в цій області, продукт є більш вдосконаленим технічно, а отже матиме більший попит, не залежно від фінансових можливостей споживачів.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації було проведено огляд сучасних підходів до навігації та локалізації рухомих об'єктів. Було встановлено, що переважна більшість алгоритмів побудована на використанні фільтрів Калмана та фільтрів частинок. Саме через це було прийнято рішення створення комплексного алгоритму на їх основі.

Було вивчено, як саме отримувати первинну навігаційну інформацію від сенсорів рухомого об'єкта. Також було досліджено, які саме перетворення потрібно зробити над первинними даними для того, щоб комплексувати їх за допомогою фільтру Калмана та фільтру частинок для отримання достовірної навігаційної інформації про місце положення та орієнтацію робота.

Досліджено особливості застосування фільтру Калмана та фільтру частинок для отримання комплексної навігаційної інформації. Створено програмне забезпечення, що дозволяє отримати достовірну оцінку.

Було розроблено комплексний алгоритм підвищення точності локалізації та навігації рухомих об'єктів, який протестовано на віртуальному роботі в середовищі Gazebo. За результатами тестів, оцінка отримана на виході алгоритму майже співпадає з реальним положенням робота при дисперсіях датчиків не більше 0,5м.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Adams, M.D. Sensor Modelling, Design and Data Processing for Autonomous Navigation. World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems./ Adams, M.D , Singapore 1999.-103с.
2. Adaptive Monte Carlo localization [електронний ресурс]. — <http://wiki.ros.org/amcl> — назва з екрану
3. B. Hofmann-Wellenhof, K. Legat, M. Wieser. Navigation: Principles of Positioning and Guidance./ B. Hofmann-Wellenhof, K. Legat, M. Wieser. Springer, Wien 2003.-215-245.c
4. Corke, P. Robotics Vision and Control. Fundamental algorithms in MATLAB./ P. Corke, 2011 – 570 с.
5. Datasheet ADXL345 [електронний ресурс]. — <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf> — назва з екрану
6. Datasheet HMC5883L-FDS [електронний ресурс]. — <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Magneto/HMC5883L-FDS.pdf> — назва з екрану
7. Datasheet ITG-3200 [електронний ресурс]. — <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Gyro/PS-ITG-3200-00-01.4.pdf> — назва з екрану
8. Datasheet NEO-M8-FW3 [електронний ресурс]. — https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_%28UBX-15031086%29.pdf — назва з екрану
9. Datasheet RPLIDAR A1 [електронний ресурс]. — <https://www.generationrobots.com/media/rplidar-a1m8-360-degree-laser-scanner-development-kit-datasheet-1.pdf> — назва з екрану
10. Documentation for navsat_transform [електронний ресурс]. — http://docs.ros.org/en/jade/api/robot_localization/html/navsat_transform_node.html — назва з екрану

11. Documentation for robot_localization[электронный ресурс]. — http://wiki.ros.org/robot_localization — назва з екрану
12. Gerald Cook, Feitian Zhang. Mobile Robots: Navigation, Control and Sensing, Surface Robots and AUVs, 2nd Edition 2020 – 47-129 с
13. Graph SLAM [электронный ресурс]. — http://wiki.ros.org/mrpt_graphslam_2d — назва з екрану
14. Husky unmanned ground vehicle [электронный ресурс]. — <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/> — назва з екрану
15. K.S. Choi, S.J. Lee .Enhanced SLAM for a Mobile Robot using Extended Kalman Filter./ K.S. Choi,S.J. Lee. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010. – 255–264 с.
16. M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, B. Wegbreit. FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem with unknown data association./ M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, B. Wegbreit. Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence 2002 – 593-598 с.
- 17.M. Quigley, B. Gerkey, W. D. Smart.Programming Robots with ROS./ M. Quigley, B. Gerkey, W. D. Smart O’Reilly Media Inc., 2015.-17 с.
- 18.OpenSLAM [электронный ресурс]. — <http://openslam.org/> — назва з екрану
19. R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems./ R. E. Kalman. Journal of Basic Engineering, 1960– 35 – 45 с.
20. Razor IMU [электронный ресурс]. — <https://www.sparkfun.com/products/retired/10736> — назва з екрану
- 21.ROS Documentation[электронный ресурс]. — <http://wiki.ros.org/>— назва з екрану
- 22.T. Moore, D. Stouch . A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System, in Intelligent Autonomous Systems 13./ T. Moore, D. Stouch. 2015. 335–348 с.

23. T. S. Levitt and D. T. Lawton. Qualitative Navigation for Mobile Robots./ T. S. Levitt and D. T. Lawton. Artificial Intelligence, Artificial Intelligence 1990.- 305–360 с.
24. А.Н. Забегаев, В.Е. Павловский. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системами навигации./ А.Н. Забегаев, В.Е. Павловский. XII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. 2010– 399-404 с.
25. Минин, А. А. Навигация оснащенный лазерным и управление дальномером./ А.А. Минин. Москва, 2008 – 182 с.