

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

Модель управління рухом мобільного «s-bot» в міських
умовах

(тема)

Виконав:

студент _____ II курсу, групи _____ КСМм-21-1
_____ Думчиков А.П.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність _____
_____ 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма _____
_____ Комп'ютерні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: _____ доц. Токарєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

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

Освітня програма _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ 22 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Думчикову Артему Петровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Модель управління рухом мобільного «s-bot» в міських умовах _____

затверджена наказом по університету від “ 07 ” листопада 2022 р. № 1453Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 13 грудня 2022р.

3. Вхідні дані до роботи _____ 1) провести дослідження проблеми навігації, визначення положення мобільного «s-bot» у робочому просторі; 2) провести дослідження проблеми управління рухом «s-bot» у міських умовах; 3) провести дослідження алгоритмів під час вирішення, завдання глобальної навігації; 4) провести дослідження метода фільтрації Калмана; 5) провести дослідження метода фільтрації часток.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) огляд літератури за темою роботи;

2) аналіз предметної області;

3) вибір та обґрунтування методики дослідження;

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайд-презентація – 20 слайдів _____

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	08.11.22 - 11.11. 22	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	13.11. 22 - 18.04. 22	
3	Вибір інструментальних засобів	19.11. 22 - 28.11. 22	
4	Проведення експериментів	29.11. 22 - 02.12. 22	
5	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	03.12. 22 - 06.12. 22	
6	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	07. 12. 22 - 08.12. 22	
7	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	09.12. 22 - 12.12. 22	

Дата видачі завдання 07 листопада 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Токарев В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 61 с., 17 рис., 1 дод., 14 джерел.

МОБІЛЬНИЙ «S-BOT», НАВІГАЦІЯ, «SWARM-BOT» SYSTEMS, WI-FI.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження моделі управління рухом мобільного «s-bot» в міських умовах.

Рішення задачі навігації має на увазі визначення положення мобільного «s-bot» у робочому просторі – локалізацію і складання уявлення, описи навколишнього світу – картографію. Інформація про поточне становище мобільного «s-bot» необхідна для вирішення більшості завдань управління: проходження заданої траєкторії, пошуку шляху в задану точку, повернення у вихідне положення. Інформація про навколишній світ, яка найчастіше представляється у вигляді карти або плану місцевості, необхідна для запам'ятовування пройденого маршруту, планування траєкторії в обхід статичних перешкод, стеження динамічними об'єктами.

ABSTRACT

Master's thesis: 61 pages, 17 figures, 1 appendices, 14 sources.

MOBILE «S-BOT», NAVIGATION, «SWARM-BOT» SYSTEMS, WI-FI.

The purpose of the qualification work is to study the model of mobile s-bot movement control in urban conditions.

The solution of the navigation task implies the determination of the position of the mobile s-bot in the working space – localization and composition of the representation, description of the surrounding world – cartography. Information about the current position of the mobile s-bot is necessary for solving most control tasks: traversing a given trajectory, finding a path to a given point, returning to the initial position. Information about the surrounding world, which is most often presented in the form of a map or a plan of the area, is necessary for memorizing the route traveled, planning a trajectory to avoid static obstacles, tracking dynamic objects.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО «S-BOT».....	10
1.1 Засоби відчуттів мобільних «s-bots», що рухаються, у міських умовах	18
1.2 Аналіз проблем під час вирішення завдань навігації за даними лазерного далекоміра.....	22
1.3 Застосування ймовірнісних алгоритмів під час вирішення завдання глобальної навігації.....	23
1.3.1 Метод фільтрації Калмана	24
1.3.2 Метод фільтрації частинок.....	25
1.4 Постановка завдання досліджень	29
2 УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО «S-BOT» У МІСЬКИХ УМОВАХ ЗА ДАНИМИ 3D-ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМІРА	31
2.1 Управління мобільним s-bot з інформаційною системою, основним елементом якої є 3D-лазерний далекомір.....	31
2.2 Управління рухом мобільним «s-bot» вздовж тротуару	34
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОБІЛЬНИХ «S-BOTS» У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ.....	43
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	48
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	51

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

ААУ – автономне адаптивне управління

БЗ – база знань

МСЕ – міжнародний союз електрозв'язку

МСО – мережа, яка самоорганізується

ПЗ – програмне забезпечення

СМО – система масового обслуговування

ВСТУП

За останні десятиліття дослідження, що відносяться до галузі «Swarm-bot» systems і технології, пов'язані з ними, розвиваються стрімкими темпами, набуваючи все більшої можливості використання «s-bots» у різних галузях людської діяльності. Насамперед, це пов'язано з постійним удосконаленням:

- характеристик двигунів для «s-bots»;
- джерел енергії;
- обчислювальних засобів бортових систем;
- головним чином, розвитку засобів сенсорного оснащення.

Це дозволяє не тільки покращити керування рухом «s-bots» (наприклад, підвищити точність), а й створювати системи підвищеного рівня адаптивного керування, що відкриває нові можливості для використання «s-bots».

Серед мобільних «s-bots» найбільшого розвитку отримали автономні мобільні s-bots, що функціонують у несформованому фізичному зовнішньому середовищі, що було викликано прагненням замінити машиною людину у важкій, небезпечній та відповідальній роботі. І останнім часом виник новий ринок складніших «s-bots» для використання у побуті. «Swarm-bot» systems та технології, пов'язані з ними, можна представити як програмно-апаратне поєднання, що забезпечує все більш повне задоволення потреб суспільства.

З іншого боку, в даний час в більшості випадків людина є причиною дорожньо-транспортної пригоди. Тому сучасні автомобілі оснащуються широким переліком електронних технологій, покликаних допомагати водієві, які відомі як технології автономного керування і служать для того, щоб звести до мінімуму вплив людського фактора - помилок, які можуть призвести до дорожньо-транспортної пригоди. Компанії займаються розробками у цій галузі (наприклад компанія Siemens, яка активно рекламує комплекси, які попереджають про небезпечні маневри інших водіїв та допомагають у дощ чи туман, повідомляючи про швидкість інших автомобілів, що знаходяться на 250

метрів попереду). Крім того, система ефективно вирішує проблему так званих сліпих зон - якщо водій зібрався перебудуватися на іншу смугу і не помітив, як його обганяють. Такий комплекс попередить аварію сильною вібрацією керма або гучним звуком. Загальна філософія полягає у наданні допомоги водіям для підвищення безпеки, комфорту та ефективності автомобільного транспорту.

Тому дослідження наукових проблем управління мобільними «s-bots» у міських умовах та пошуком нових алгоритмічних рішень на сьогоднішній день є актуальним завданням.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО «S-BOT»

Розвиток «Swarm-bot» systems пов'язаний із спробами створення автономного засобу, що було викликано прагненням замінити машиною людини у важкій, небезпечній та відповідальній роботі. Найважливішими властивостями подібного «s-bot» є мобільність і автономність. Автономність в даному випадку необхідна для забезпечення переміщення без зв'язку з пунктом керування, а також можливістю самостійного повернення транспортного засобу після виконання завдання. Успіхи в цій галузі можна спостерігати на регулярних змаганнях Grand Challenge, які проводяться під патронажем підрозділу міністерства оборони США (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Змагання Grand Challenge безпілотних автомобілів у пустелі
США

Мета змагань – у проходженні автономним транспортним засобом заданого маршруту без участі людини. Маршрут протяжністю майже 212 км прокладено кам'янистою пустелею Мохава. На подолання дистанції учасникам відводиться не більше 10 годин. У ході попередніх заїздів зі 195 s-bots в середньому до фінішу дістаються не більше 23.

Автомобілі розділені на ведучі та ведені. Так, якщо машина, що йде попереду, знаходиться в межах видимості, то друга йтиме за нею. Якщо одна з них не бачить іншу, тоді відстала покладається на інформацію, отриману за допомогою GPS. Обидва автомобілі при цьому ще реєструють навколишнє оточення і намагаються самостійно виробити спосіб вирішення тієї чи іншої складної ситуації, таким чином самонавчаючись.

Провідною машиною, зрозуміло, керує людина. У кожному електромобілі встановлені сім відеокамер та чотири сенсори. Вони за допомогою лазерного променя визначають становище автомобіля на дорозі, стежать за сусідньою смугою, контролюють дистанцію. Найважливішими за самі гонки виявилися технічні новинки, розроблені гоночними командами, причому навіть тими, чийі «s-bots» не дійшли до фінішу або навіть не були допущені до старту.

Згодом ці винаходи допоможуть створити якісно новий клас наземних самохідних машин, здатних перевозити вантажі, орати, рити шахти, прибирати бруд, досліджувати далекі світи і навіть вести бій без втручання людини. Особливо змагання виявило пріоритетні напрямки розвитку «Swarm-bot» systems.

Основні завдання, які вирішуються при проектуванні руху мобільного «s-bot» у міських умовах:

- формування моделі видимої частини робочої зони у вигляді карти;
- накопичення та коригування бази знань про зовнішнє фізичне середовище;
- планування руху «s-bot» до мети;
- рух «s-bot» вздовж тротуару;

- рух «s-bot» на перехресті;
- паркування та розворот;
- подолання динамічних перешкод.

Алгоритмічне забезпечення управлінням «s-bot» повинно мати такі властивості:

- будувати «карту» поточного стану тієї частини простору, в якій здійснюється переміщення «s-bot», із зазначенням розташування цілей руху та перешкод, що заважають потрібним рухам;
- коригувати траєкторію руху на підставі апріорних та апостеріорних відомостей, що зберігаються в пам'яті системи та поточних сенсорних даних;
- здійснювати рух спланованою траєкторією.

Аналіз існуючих розробок мобільних «s-bot», що рухаються в міських умовах, показує, що існує ряд базових завдань для «Swarm-bot» systems. Одними з базових завдань є:

- завдання навігації, що має на увазі визначення положення мобільного «s-bot» у робочому просторі;
- завдання управління рухом «s-bot» у міських умовах.

Інформація про поточне положення «s-bot» необхідна для вирішення більшості завдань управління. При успішній навігації у просторі система управління «s-bot» повинна вміти (рисунки 1.2):

- будувати маршрут руху «s-bot»;
- управляти параметрами руху (задавати кут повороту коліс та швидкість їх обертання);
- правильно інтерпретувати інформацію про довкілля, одержувану від датчиків;
- постійно відстежувати власні координати.

Незважаючи на конструктивні відмінності мобільних «s-bot», перед їх розробниками виникає загальний набір пов'язаних між собою завдань навігації та управління рухом «s-bot» в міських умовах. У кваліфікаційній роботі досліджується модель управління рухом мобільного «s-bot» в міських умовах.

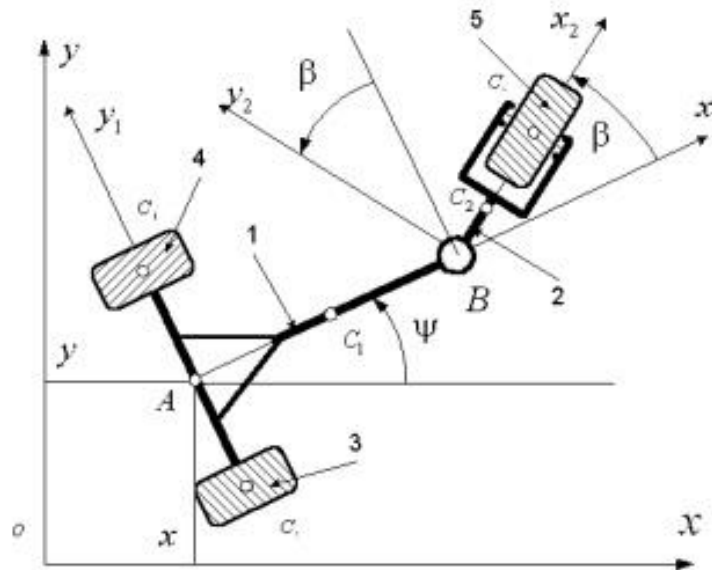


Рисунок 1.2 – Система управління «s-bot» повинна вміти задавати кут повороту коліс та швидкість їх обертання

Проблема навігації та управління рухом мобільного «s-bot» складається з двох головних завдань.

Перше завдання – це складання уявлення про навколишнє середовище та орієнтування у ньому:

- створення карт місцевості;
- визначення місця розташування «s-bot» у робочому просторі.

У науково-технічній літературі вона згадується як завдання картографування (mapping problem).

Друге завдання – забезпечення руху «s-bot» у міських умовах:

- прокласти траєкторію руху «s-bot» вздовж тротуару;
- прокласти траєкторію руху «s-bot» на перехресті;
- коригувати траєкторію руху «s-bot» на підставі сенсорних даних.

У науково-технічній літературі це завдання згадується як завдання розвідки (exploration problem). Інтегрована система навігації та управління рухом мобільного «s-bot» повинна бути здатна моделювати навколишнє середовище, визначати параметри руху «s-bot», керувати рухом. Протягом

багатьох століть термін «навігація» означав сукупність зазначених значень.

У ХХ столітті, з розвитком науки та техніки, появою повітряних суден, космічних кораблів – нових об'єктів навігації, з'явилися смислові значення терміна. Тепер, у загальному сенсі, навігація – процес управління деяким об'єктом (що має власні методи пересування) у певному просторі пересування.

Взагалі, існують три основні завдання навігації:

- де я? – мобільний «s-bot» повинен знати своє положення щодо навколишнього простору. Завдання визначення положення називається локалізацією;

- куди я прямую? – для того, щоб виконати своє завдання, мобільний «s-bot» повинен знати, куди він прямує;

- як мені туди дістатися? – коли «s-bot» знає, де він знаходиться і куди йому треба рухатися, виникає питання як йому туди дістатися.

Останні два завдання залежать від вимог до мети мобільного «s-bot», що виконується. Проте, для коректного розв'язання цих завдань, зазвичай, потрібно визначити становище «s-bot» у навколишньому просторі, тобто розв'язати задачу локалізації. Завдання визначення мобільного «s-bot» свого місця розташування в просторі є ключовим і навіть називається фундаментальним завданням для наділення мобільного «s-bot» автономними здібностями. У кваліфікаційній роботі під навігацією мобільного «s-bot» розуміється визначення положення «s-bot» у просторі – локалізація, а також керування параметрами руху (задавати кут повороту коліс та швидкість їх обертання) по програмній траєкторії та об'їзд перешкод, які з'являються перед «s-bot» під час руху. Для виконання другого завдання «s-bot» необхідно сформуванню досить точний образ навколишнього простору, наприклад, у вигляді плану місцевості, тобто повинно вирішуватися завдання картографії. Слід зазначити, що критичною вимогою додатків навігації є те, що «s-bot» має визначити свою позицію стосовно нерухомої системи координат.

Процес оцінювання позиції «s-bot» по відношенню до нерухомої системи координат називається локалізацією «s-bot» і цьому завданню

присвячена більша частина праць у галузі навігації «s-bot». Це завдання можна вирішити за допомогою двох різних класів датчиків s-bot»:

- пропріоцептивні;
- екстероцептивні датчики.

Пропріоцептивний датчик – кодувальник або інерційний вимірювальний пристрій, що вимірює параметри руху «s-bot». Отримані дані можна використовувати для оцінки відносного переміщення «s-bot». Такі виміри називаються відносними вимірами позиціонування, які сприймають внутрішній стан «s-bot». Зауважимо, що жодних джерел зовнішньої інформації не використовується і тому ці вимірювання можуть лише забезпечувати інформацію щодо його стартової позиції. Відносно позиціонування найчастіше ґрунтується на навігаційному зчисленні шляху (dead reckoning).

Наприклад, можна здійснювати підрахунок кількості оборотів коліс «s-bot» і приблизно обчислювати відстань від його стартової позиції. Такий спосіб обчислення шляху – простий і дешевий спосіб навігації «s-bot» в реальному масштабі часу. На жаль, у міру віддалення «s-bot» від стартової позиції відбувається суттєве накопичення помилок. При навігаційному зчисленні шляху помилки бувають двох типів:

- систематичні;
- несистематичні.

Систематичні помилки викликані кінематичною недосконалістю даного мобільного "s-bot", наприклад, неоднаковим діаметром його коліс. Систематичні помилки є властивістю даного "s-bot". Вони залишаються практично постійними протягом тривалого часу, тоді як несистематичні помилки – це функція властивостей поверхні. Несистематичні помилки викликані властивостями поверхні, якою переміщаються колеса «s-bot» (наприклад, прослизання коліс, нерівності).

Екстероцептивний датчик – лазерний далекомір, радар, сонар або камера, сприймає інформацію про довкілля. Автономні «s-bot» зазвичай мають ряд датчиків, що відносять до навколишнього середовища. Такі вимірювання

називають абсолютними вимірюваннями, вони забезпечують інформацію про місцезнаходження «s-bot», яка не залежить від попередніх вимірювань.

Перевага абсолютного позиціонування в порівнянні з відносним позиціонуванням полягає в тому, що не відбувається необмежене накопичення помилки позиції «s-bot».

Один з методів локалізації за даними екстероцептивних датчиків – це використання орієнтирів, що легко виявляються і ідентифікуються. Орієнтири можна розділити на:

- активні;
- пасивні.

Активні орієнтири, які також називають маяками, активно надсилають інформацію про своє місцезнаходження. Активний орієнтир зазвичай реалізується у формі радіобуя або іншої радіопередавальної апаратури. Мобільний «s-bot» сприймає сигнали орієнтирів для визначення своєї позиції. Два методи зазвичай використовуються для визначення абсолютного положення «s-bot» з використанням активного орієнтира:

- триангуляція;
- трилатерація.

Метод триангуляції використовує відстані та напрямки на три або більше активних орієнтирів, а метод трилатерації використовує лише відстані для визначення положення та орієнтації «s-bot». Проте, ці способи мало досконалі. Використання активних орієнтирів було відхилено з двох причин.

По-перше, передача сигналів активного орієнтиру може бути порушена в результаті атмосферного та географічного впливу і це призведе до неправильних вимірів.

По-друге, ще однією проблемою є те, що активний орієнтир практично не може посилати свої сигнали в усіх напрямках. Крім того, навігація за допомогою радіобуїв та орієнтирів, як правило, вимагає дорогої установки та обслуговування.

У разі пасивних орієнтирів мобільний s-bot повинен активно їх шукати,

щоб визначити свої координати. Наприклад, у разі виявлення орієнтирів з використанням системи технічного зору, використовуються методи обробки зображення.

При виявленні трьох або більше орієнтирів, можна використовувати методи триангуляції або трилатерації для визначення положень мобільного «s-bot». Пасивний орієнтир може бути штучним чи природним і продуктивність системи локалізації залежить від типу орієнтиру. Використання штучних орієнтирів має низку недоліків. Одним з них є те, що якщо «s-bot» знаходиться далеко від орієнтиру, тоді система локалізації оцінює позиції «s-bot» не дуже точно.

Це видно, наприклад, у разі виявлення орієнтирів з використанням системи технічного зору. Чим далі знаходиться орієнтир від «s-bot», тим меншим буде розмір орієнтира в полі зору камери, внаслідок чого виникають проблеми з його виявленням.

Крім того, у порівнянні з активним орієнтиром, виявлення штучних орієнтирів потребує використання великих обчислювальних потужностей. Проектування та побудова штучних орієнтирів саме по собі є великою проблемою. В якості альтернативного підходу до проблеми позиціонування, використовуються природні орієнтири. Такими орієнтирами у міських умовах є дороги, дерева та дорожні знаки. Інший метод, заснований на застосуванні екстероцептивних датчиків, дозволяє порівнювати дані датчика з відомою картою. Карта може відображатися у двох видах:

- супутникова фотографія;
- побудований "s-bot" план місцевості.

Цей спосіб складніше, ніж метод ідентифікування орієнтирів, особливо при порівнянні даних датчика з даною картою. Хоча цей метод не вимагає попередньої підготовки, але він вимагає попередніх знань про навколишнє середовище «s-bot» і тому не відповідає багатьом додаткам локалізації «s-bot».

Якщо попередньо побудована карта робочої зони «s-bot» не доступна, можна будувати для «s-bot» глобальну карту з використанням зовнішнього

датчика при паралельному відстеженні власного положення в цьому оточенні.

Завдання локалізації та картографії для «s-bot» з використанням зовнішнього датчика тісно пов'язані один з одним. Зазвичай, ці дві проблеми вирішуються спільно і в літературі отримали назву SLAM. Упорядкування уявлення про довкілля і локалізації у ньому автономного мобільного «s-bot» – два супутні один одному завдання і рішення кожного з них окремо неможливе без систематичних помилок.

Якщо є точна карта навколишнього середовища, то автономний мобільний «s-bot» може легко орієнтуватися по ній і, навпаки, якщо ми знаємо точне положення «s-bot» в просторі, то побудова опису навколишнього світу є нескладною проблемою.

Таким чином, залежно від сенсорів «s-bot», формулювання цих завдань вимагає розробки алгоритмів навігації та управління рухом «s-bot» в міських умовах.

1.1 Засоби відчуттів мобільних «s-bots», що рухаються, у міських умовах

Як видно з вищевикладеного, серед усіх засобів відчуття, що застосовуються для вирішення сформульованих завдань, велике значення мають системи навігації та рухом «s-bot» у міських умовах. До них можна віднести:

- системи, побудовані з урахуванням екстероцептивних датчиків відеокамер;
- лазерних далекомірів;
- ультразвукові датчики;
- радарів.

З їх допомогою система навігації та управління мобільного s-bot може отримати інформацію про навколишнє середовище, вирішити завдання безпечного руху, об'їзду перешкод та визначення або уточнення свого розташування. Як правило, найбільш істотною для вирішення цих завдань

мобільним «s-bot» є інформація про відстані до навколишніх об'єктів та їх геометричний опис. У разі відеокамер така інформація може бути отримана за рахунок розв'язання задачі стереогляду, у разі інших датчиків відстань виходить як результат прямого виміру. Вимір відстані в одному напрямку мало інформативний для вирішення завдань навігації мобільного «s-bot», тому широкого поширення набули скануючі лазерні далекоміри. Лазерні далекоміри дозволяють сформувати дуже точне уявлення про рельєф робочої зони у процесі руху. Дані про рельєф використовуються при складанні карти прохідності, відстеження свого розташування та об'їзду перешкоди, що заважають потрібним рухам.

Таке рішення дозволяє збільшити точність визначення положення «s-bot» в порівнянні з необробленими даними GPS. Ці прилади випромінюють пучок лазерних променів в одній площині із заданим растровим кутом та кроком (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Модель мобільного «s-bot» зі скануючим лазерним далекоміром

Як правило, це досягається за допомогою одного джерела лазерного випромінювання і дзеркала, що обертається, яке служить для зміни напрямку

променя. Результатом виміру є масив дальностей до найближчих об'єктів у площині, своєрідне зображення перерізу навколишнього світу у площині, зване також сканом. Сучасні прилади такого типу мають високу точність (до 10-15 мм) при великих дальностях (до 80 м) і швидкостях вимірювання (до 75 сканів за секунду). Вони дозволяють отримувати найточніші геометричні характеристики вимірюваних об'єктів у площині та просторі. Розв'язання задачі стереогляду також дозволяє вирішити таку задачу, тобто отримати значення відстаней до багатьох точок сцени одночасно, але такі виміри вимагають великих обчислювальних витрат.

Крім того, їх точність дуже залежить від можливості ідентифікувати однакові об'єкти на зображеннях від різних камер. Побудова систем, здатних вимірювати одночасно відстані у різних напрямках, з використанням радарів і сонарів утруднено, оскільки визначають відстань до найближчого об'єкта у досить широкому тілесному куті. Радарні системи навігації дуже дорогі та чутливі до відображення радарних імпульсів від металевих об'єктів. Радари та ультразвукові датчики, як правило, відіграють допоміжну роль, через недостатню точність вимірювань. Крім того, їх точність дуже залежить від можливості ідентифікувати однакові об'єкти на зображеннях від різних камер.

Перевага лазерних скануючих далекомірів у порівнянні з відео стереосистемами крім точності полягає також у меншому обсязі інформації, і незалежності від освітленості та помітності об'єктів у сцені, що спостерігається (рисунок 1.4).

До недоліків систем штучного зору на базі лазерних далекомірів можна віднести залежність від прозорості повітря, обмеженість максимальних дальностей, що вимірюються, і відсутність вимірювання інших характеристик (кольору, прозорості) спостережуваних об'єктів. Завдяки своїм перевагам лазерні далекоміри успішно застосовуються для оснащення мобільних «s-bot», навіть стають де-факто стандартним обладнанням, що входить до складу інформаційних систем сучасних мобільних «s-bot» (рисунок 1.5).

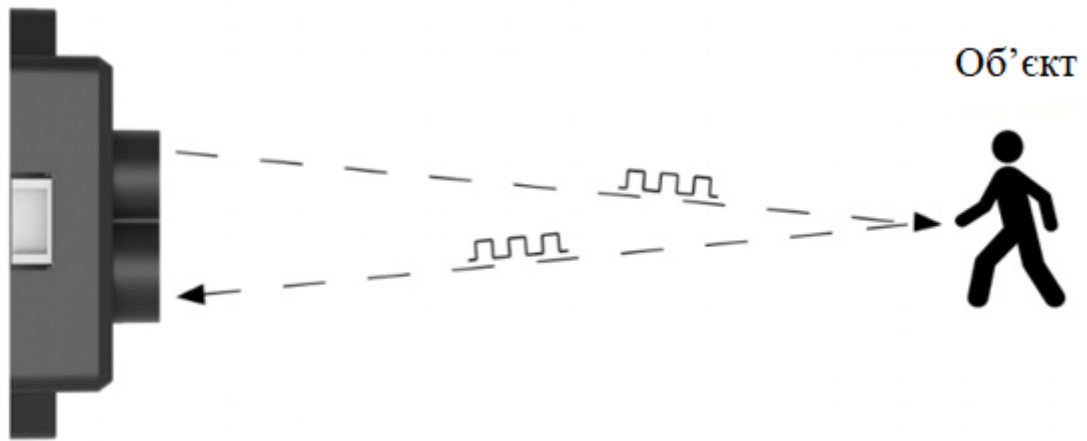


Рисунок 1.4 – Лазерний далекомір виявлення та визначення дальності

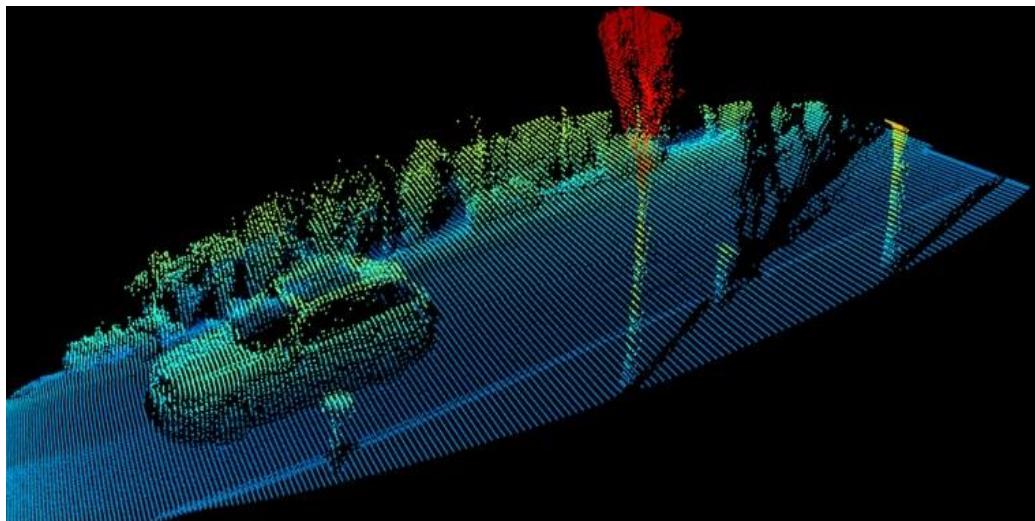


Рисунок 1.5 – Зображення з інформаційної системи сучасного мобільного «s-bot»

Для вирішення завдань ідентифікації місцевості та навігації вимірювання одного перерізу навколишнього світу необхідно отримати повний тривимірний опис хоча б частини навколишнього світу, наприклад, дороги з метою визначення зон прохідності. Більшість лазерних датчиків сканує сектор перед машиною. Відбиті сигнали перетворюються на тривимірну хмару точок.

Аналізуючи її, програма виявлення перешкод будує двомірну карту. Перевагою 3D лазерного далекоміра є можливість сканування у вертикальній та горизонтальній площині з кутом огляду до 360 °. Це дозволяє вирішити як завдання навігації та уникнення зіткнень, так і побудови тривимірних карт.

1.2 Аналіз проблем під час вирішення завдань навігації за даними лазерного далекоміра

При русі мобільного «s-bot», оснащеного лазерним далекоміром, зміну його положення може бути визначено по сканах, отриманих в різних точках. І тут завдання локалізації зводиться до проблеми визначення взаємного становища двох і більше далекометричних зображень.

Природною умовою для її вирішення є наявність зони перекриття двох сканів, що розглядаються. Як правило, таке завдання вирішується з деяким періодом у часі для двох послідовно одержуваних сканів (останнього і знову отриманого), таким чином, щоразу визначається зміна положення мобільного «s-bot» за останній часовий проміжок. Зазвичай з початковим положенням мобільного «s-bot» зв'язується нерухома система координат, щодо якої визначається нове положення мобільного «s-bot». Такий підхід називається локальною навігацією.

При проходженні мобільним «s-bot» замикаючого або циклічного рельєфу, при визначенні відносної зміни положення мобільного «s-bot» відбувається накопичення помилки і така проблема називається проблемою замикання циклів. Описана проблема є другим аспектом завдання локалізації мобільного «s-bot». Зазвичай глобальна навігація вирішується на основі локального рішення із застосуванням ймовірнісних алгоритмів.

Завдання картографії для мобільного «s-bot», оснащеного лазерним далекоміром, зводиться до побудови плаского або просторового плану

місцевості. Він може бути отриманий за рахунок перекладу точок далекометричних зображень, виміряних у різних положеннях мобільного «s-bot», в загальну нерухому систему координат плану.

1.3 Застосування ймовірнісних алгоритмів під час вирішення завдання глобальної навігації

Розглянемо існуючі рішення задачі глобальної навігації, що полягає у визначенні абсолютного становища мобільного «s-bot» по відношенню до деякої нерухомої системи звіту. Більшість методів, які успішно вирішують завдання глобальної навігації, є ймовірнісними за своєю суттю. Вони можуть враховувати неточності у показаннях датчиків «s-bot», неточності методів їх обробки, а також відсутність повної інформації про модель руху «s-bot» за допомогою ймовірнісних розподілів.

Основний принцип, який лежить в основі всіх ймовірнісних методів локалізації та картографування мобільного «s-bot» – правило Байєса:

$$p(x|z) = \eta \cdot p(z|x) \cdot p(x), \quad (1.1)$$

де x – величина, значення якої ми хочемо визначити, наприклад позиція «s-bot» у просторі;

z – дані вимірювань (одометрія, лазерні скани);

$p(z|x)$ – значення щільності розподілу ймовірності події – отримання даних z при гіпотезі, що положення мобільного «s-bot» – x .

Цей множник описує процес генерації даних датчика за різних припущень про позицію «s-bot».

Розглянемо основні ймовірні алгоритми глобальної локалізації, що застосовуються в сучасних «Swarm-bot» systems.

1.3.1 Метод фільтрації Калмана

Метод фільтрації Калмана призначений для отримання оцінок стану та статистичних характеристик системи за деякими вимірами, запропонований Р. Калманом у 1960 році. Фільтр Калмана призначений для стеження за позицією мобільного «s-bot» шляхом оцінювання положення спеціальних міток-маяків, які можуть бути доступні для огляду та помітні датчиками мобільного «s-bot» (рисунок 1.6).

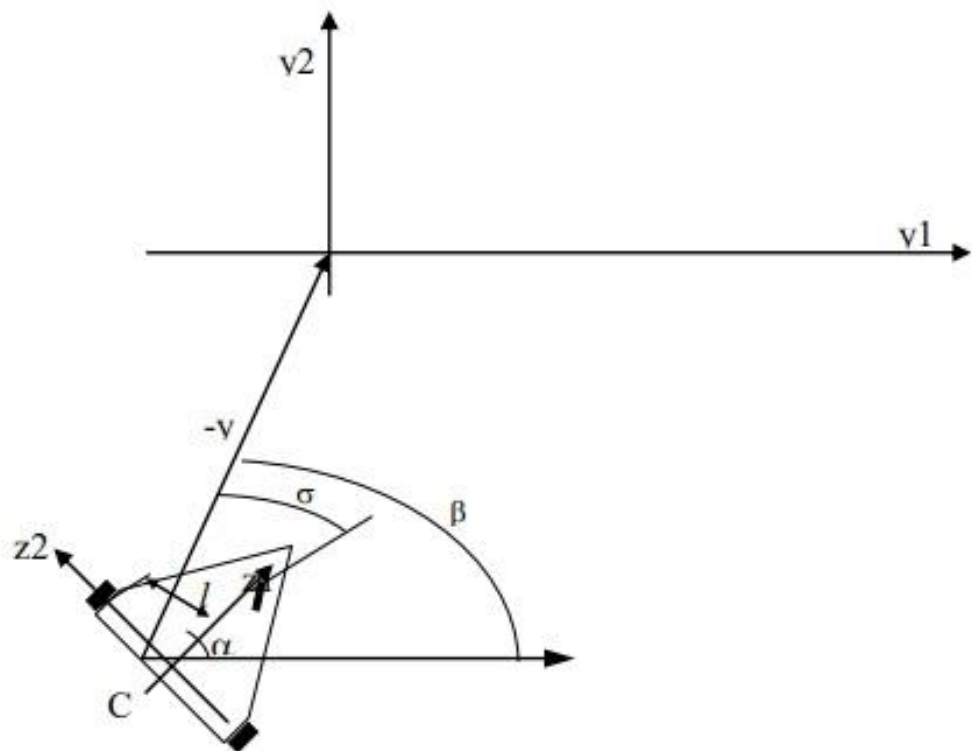


Рисунок 1.6 – Модель визначення напрямку на маяк методом фільтрації Калмана

За своєю суттю фільтр Калмана є фільтром Байєса з поданням апостеріорної щільності ймовірності $p(st,m|zt, ut)$ за допомогою нормального розподілу Гауса, який характеризується стандартними параметрами (математичним очікуванням та матрицею коваріації).

Для «s-bots», що діють у пласкому середовищі, положення описується

трьома координатами (дві декартові координати та кут напрямку). Уявлення про навколишнє середовище у методі фільтрації Калмана полягає у заздалегідь відомих координатах спеціальних міток-маяків. Таким чином, для K міток-маяків величина вектора стану, що оцінюється фільтром Калмана, буде $2K+3$. Модель руху та сприйняття у разі фільтрації Калмана вважаються лінійними з додаванням Гаусового шуму. Початковий розподіл ймовірності становища мобільного «s-bot» вважається також Гаусовим. У спрощеному вигляді рівняння фільтра формуються так:

$$\begin{aligned} p(x|u, x^t) &= Ax^t + Bu + \varepsilon_{\text{control}}, \\ p(z|x) &= Cx + Bu + \varepsilon_{\text{measure}}, \end{aligned} \tag{1.2}$$

де x – вектор стану системи;

z – вектор вимірювань;

u – вектор управління;

A, B, C – матриці системи;

ε – характеризують невизначеність руху мобільного «s-bot» та шум вимірів відповідно.

Ці величини є нормально розподіленими шумами з нульовим математичним очікуванням та заданими матрицями коваріації.

1.3.2 Метод фільтрації частинок

Метод фільтрації частинок (particle filter) можна розглядати як апроксимацію та розширення методу фільтрації Калмана для вирішення задачі локалізації та побудови карти для мобільних «s-bots».

В даному методі, як і у фільтрі Калмана, здійснена спроба оцінити щільність розподілу ймовірності положення мобільного «s-bot» і стану

навколишнього світу у вигляді:

$$p(x_t, m | z^t, u^t), \quad (1.3)$$

де x_t – становище мобільного «s-bot» на момент часу t ;

m – карта;

z^t – вимірювання, зібрані мобільним "s-bot" за час руху $0..t$;

u^t – дані про рух мобільного «s-bot» (одометричні або інформація про управління).

Якщо у фільтрі Калмана розподіл ймовірності представлений у нормальному вигляді зі змінними параметрами, то в даному методі розподіл ймовірності розглядається у вигляді деякої кількості гіпотез, що дозволяє спочатку оцінювати лише траєкторію руху мобільного «s-bot», а потім обчислювати карту виходячи з отриманої траєкторії. Розподіл, що відповідає уявленню про карту, може бути отриманий аналітично, якщо відома траєкторія руху мобільного «s-bot». Алгоритм фільтра часток оцінює кілька гіпотез про становище мобільного «s-bot» одночасно. Кожна гіпотеза може бути представлена у вигляді точки-частинки на площині, що характеризує проєкцію положення «s-bot» що і дало назву фільтру. З гіпотезою пов'язана ймовірна траєкторія руху та сітчаста карта місцевості, побудована виходячи з припущень про траєкторію та отримані далекометричні вимірювання. Сукупність гіпотез-часток, кожна з яких характеризується своєю вагою, є повним розподілом ймовірності положення «s-bot».

Алгоритм складається із чотирьох ітераційних кроків.

Крок № 1. Sampling – припущення. Породження нової множини частинок з поточного розподілу на основі імовірнісної моделі руху з розподілом p . Тобто для кожної гіпотези відбувається генерація припущень у вигляді нових частинок про положення мобільного «s-bot» через вибраний проміжок часу. Припущення робляться виходячи з наявних даних про рух «s-bot», це можуть бути одометричні дані або результати визначення відносного

переміщення «s-bot» за показаннями лазерного далекоміра (результати вирішення локальної задачі навігації). Розподіл нових гіпотез зазвичай формується як нормальне на базі знань про точність використаних даних (точність показань одометричних датчиків або точність вирішення локальної задачі навігації).

Крок № 2. Importance Weighting – оцінка важливості. Присвоєння нового вагового коефіцієнта кожній новонародженій частинці на основі моделі вимірювання по карті, яка пов'язана з кожною часткою, правила Байєсу. Нове значення вагового коефіцієнта залежить від того, наскільки нова гіпотеза про становище мобільного «s-bot» відповідає існуючій карті: чим менше похибок у показаннях далекоміра про положення «s-bot» і чим більше вони збігаються з картою, тим вище коефіцієнт. В якості моделі вимірювання використовується оцінка ймовірності отримання скана на даній карті за допомогою трасування променів.

Крок № 3. Resampling – повторна вибірка. Перегляд нових гіпотез, нормалізація ваги часток. На основі розрахованих вагів відбувається відсів частинок, так щоб у розгляді залишилося лише певне, кінцеве число гіпотез, з найбільшими вагами. Ваги частинок, що залишилися, нормалізуються таким чином, щоб сума їх ваг дорівнювала одиниці. На цьому кроці відсіваються малоймовірні гіпотези про становище «s-bot».

Крок № 4. Map estimation – оцінка карти. Для кожної частки на основі останніх вимірювань та припущень про позицію «s-bot» добудовується карта місцевості.

Всі ці чотири кроки виконуються рекурсивно через заданий інтервал часу щоразу з новим виміром далекоміра. Розгляд кількох гіпотез дозволяє компенсувати помилки, що накопичуються при відносному локальному розв'язанні задачі навігації. При цьому, чим більше розглядається частинок тим краще алгоритм справляється з помилками, що накопичуються, але тим вище вимоги до обчислювальних ресурсів і обсягів оперативної пам'яті для зберігання карт, пов'язаних з кожною часткою. Дуже важливим є крок

генерації нових гіпотез. Їх розподіл має включати вірну гіпотезу про становище «s-bot», але, в той же час, збільшення числа припущень також веде до зростання обчислювальних витрат на третьому і четвертому кроках алгоритму. Генерація нових гіпотез на основі визначення положення «s-bot» методами локальної навігації дозволяє значно зменшити кількість пропонованих частинок в порівнянні з аналогічною генерацією на основі одометричних даних. Недоліком такого підходу є те, що існуючі алгоритми локальної навігації, розглянуті вище, не дозволяють отримати оцінки точності визначення положення «s-bot» безпосередньо, тому для породження нових гіпотез використовується нормальний розподіл з параметрами, отриманими за статистичними даними про точність алгоритмів. Такий розподіл не залежить від характеру руху мобільного «s-bot» і рельєфу середовища і може призводити до генерації невиправдано великої кількості частинок або упушення з розгляду вірних гіпотез у випадку, коли точність розв'язання локальної задачі навігації падає, наприклад, під час руху вздовж стіни або коридору. На рисунку 1.7 представлений крок № 1 (Sampling - припущення) алгоритму на основі методу фільтрації частинок та відсіву частинок на підставі ймовірнісної моделі розподілу.

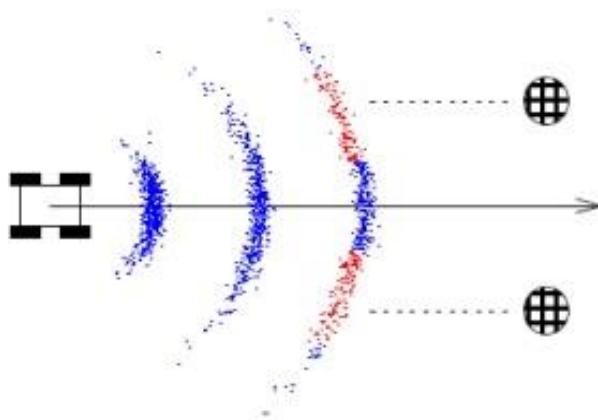


Рисунок 1.7 – Крок № 1. Sampling – припущення, алгоритм на основі методу фільтрації частинок

Припустимо, що в кожний момент проходження сегмента мобільний «s-bot» розпізнає якусь непусту підмножину раніше нанесених на карту орієнтирів. Коли «s-bot» знаходиться на початку сегмента, середнє положення видимих орієнтирів дорівнює приблизно $[\rho, 0]$. Коли «s-bot» перетинає сегмент, він втрачає з уваги сусідні орієнтири та отримує інформацію про нові орієнтири (рисунок 1.8).

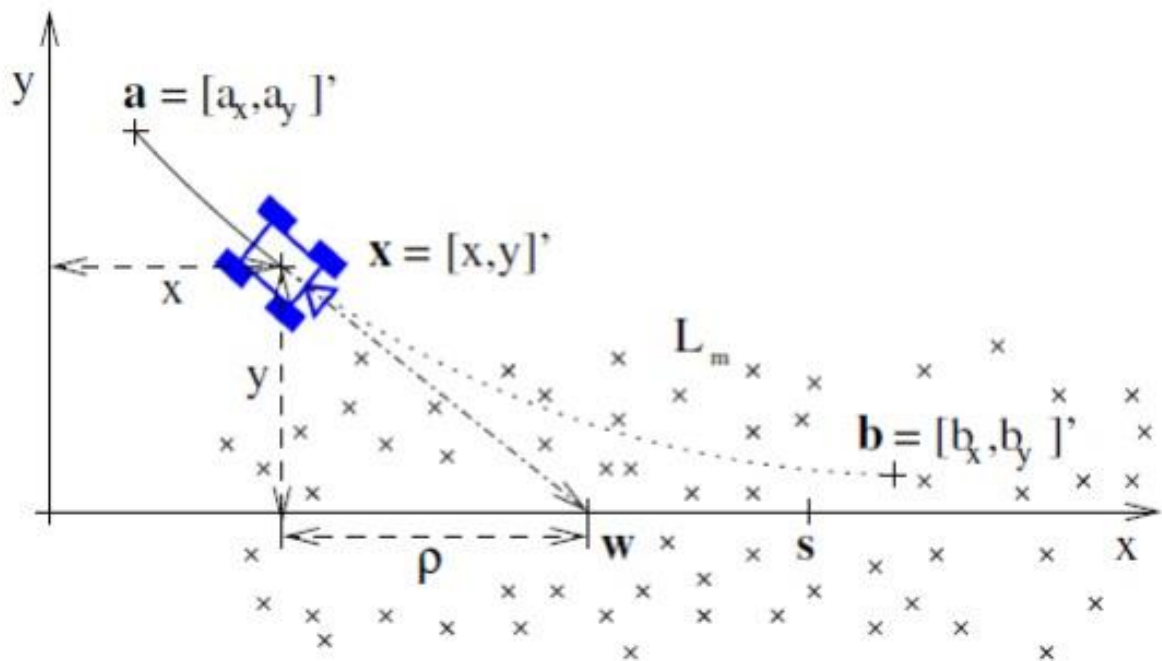


Рисунок 1.8 – Приклад моделі навігації для одного мобільного «s-bot»

1.4 Постановка завдання досліджень

Розглянемо недоліки та переваги розглянутих методів. Спосіб фільтрації Калмана. Недолік: висока чутливість до початкових умов нелінійного об'єкта. Переваги: одержання точності оцінки, висока обчислена ефективність. Метод фільтрації частинок. Недолік: точність залежить від кількості частинок, проблема виснаження частки. Переваги: ефективна реалізація.

У першому розділі кваліфікаційної роботи показано, що задача глобальної навігації може бути вирішена за допомогою ймовірнісних методів,

що дозволяють розглянути кілька гіпотез про становище мобільного «s-bot» і при можливості компенсувати помилку, що накопичується. Розглянуті методи глобальної навігації використовують розв'язання алгоритмів локальної навігації для отримання нових гіпотез. Тому для забезпечення роботи мобільного «s-bot» необхідно вирішувати завдання локальної навігації в першу чергу. При цьому, основний недолік існуючих методів локальної навігації – це відсутність оцінки точності отриманого рішення може призвести до втрат продуктивності та точності методів глобальної навігації. На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що необхідна розробка методів локальної навігації, що дозволяють отримати оцінки точності визначення положення мобільного «s-bot», що залежать від характеру рельєфу місцевості та руху мобільного «s-bot». Такі методи можуть бути використані для вирішення глобального завдання навігації з більшою ефективністю, ніж існуючі.

2 УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО «S-BOT» У МІСЬКИХ УМОВАХ ЗА ДАНИМИ 3D-ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМІРА

2.1 Управління мобільним s-bot з інформаційною системою, основним елементом якої є 3D-лазерний далекомір

У цьому розділі розглядається завдання управління мобільним «s-bot» з інформаційною системою, основним елементом якої є 3D-лазерний далекомір. У частині, присвяченій управлінню рухом мобільним «s-bot» за даними 3D далекоміра, було розглянуто кілька завдань. Завдання полягають у наступному:

- керування рухом мобільним «s-bot» вздовж безперервного тротуру;
- керування рухом мобільним «s-bot» вздовж розривного тротуру;
- керування рухом мобільного робота на перехресті;
- поворот наліво на перехресті;
- поворот праворуч на перехресті;
- рух прямо на перехресті;
- управління рухом мобільним «s-bot» при об'їзді перешкод, які з'являються перед «s-bot» під час руху.

Під керуванням мобільним «s-bot» розуміється зміна параметрів руху з метою виконання певного завдання:

- забезпечення руху за певним законом;
- проїзду у задану точку;
- виконання заданої траєкторії, тощо.

Для мобільного «s-bot» з двома симетрично розташованими провідними колесами, управління зводиться до завдання швидкостей коліс кожної сторони. Їхні величини визначають рух мобільного «s-bot» у разі відсутності прослизання за формулами:

$$\begin{cases} v = \frac{R}{2}(\omega_r + \omega_t) \\ \omega = \omega_r - \omega_t \end{cases}, \quad (2.1)$$

де ω_r та ω_t – кутові швидкості правого та лівого коліс мобільного «s-bot»;
 R – радіус колеса мобільного «s-bot»;
 v та ω – відповідно кутова та лінійна швидкості мобільного «s-bot» без урахування прослизання.

Приводи сучасних мобільних «s-bot» містять внутрішній контур управління, що дозволяє підтримувати задану кутову швидкість коліс. Тим не менш, управління зміною положення «s-bot» тільки за рахунок вирішення зворотного кінематичного завдання, тобто знаходження ω_r та ω_t , коліс, виходячи з бажаних v та ω за формулами (2.1), неможливо. Навіть у відсутності прослизання коліс, динаміка їх приводів не може бути однаковою, що призведе до помилок (рисунок 2.1).

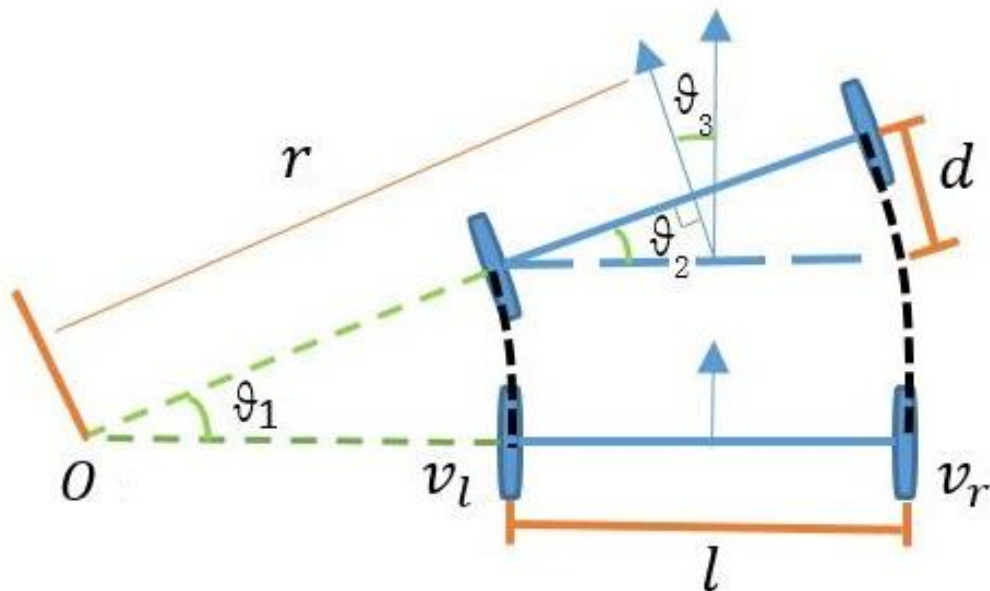


Рисунок 2.1 – Кінематична схема коліс мобільного «s-bot»

Наприклад, якщо ми хочемо, щоб «s-bot» їхав по прямій, заданій його початковим напрямком і встановимо для цього рівні швидкості обертання коліс, «s-bot», швидше за все, відхилиться від курсу (рисунок 2.2).

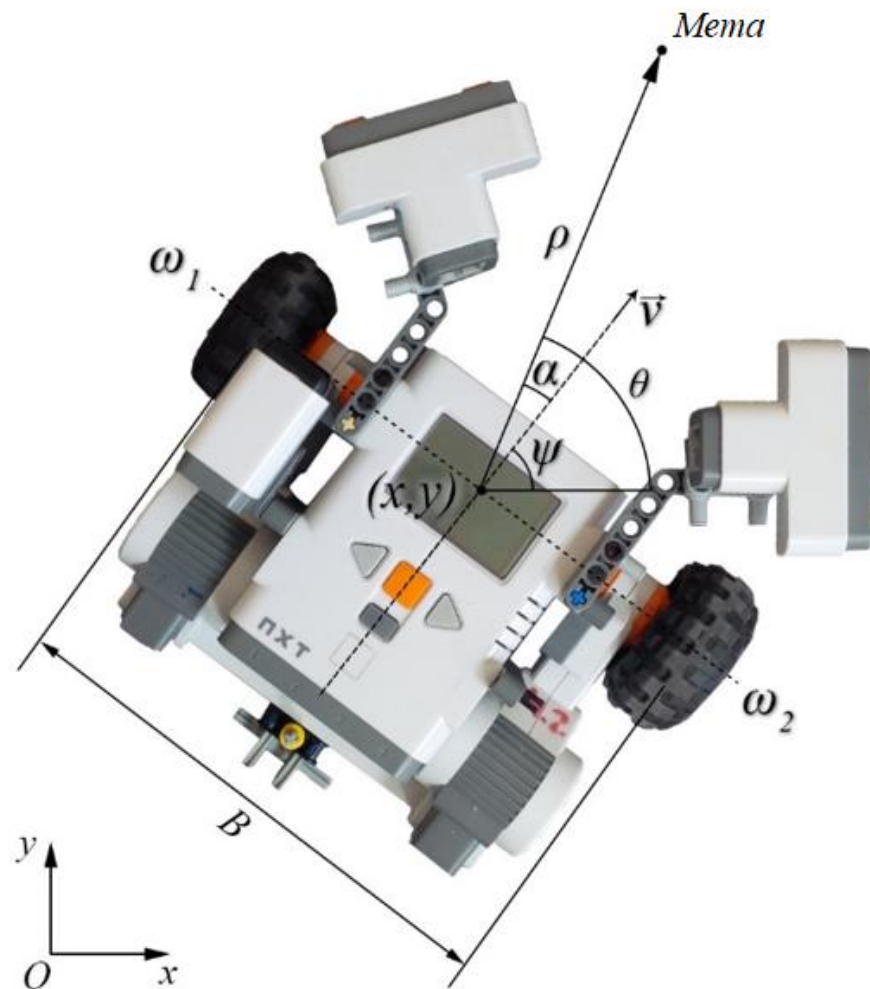


Рисунок 2.2 – Відхилення мобільного «s-bot» від заданого курсу, викликане різною динамікою набору швидкостей приводів коліс

Як уже зазначалося, інформацію про зовнішній світ мобільний «s-bot» отримує від лазерного скануючого далекоміра. Тому відомі методи управління таким «s-bot» можна розділити на два класи методів:

- методи управління за безпосередніми поточними даними далекоміра;
- методи, які враховують також інформацію, отриману в минулі моменти часу.

Перший клас методів є простими у реалізації, не вимогливими до обчислювальних ресурсів системи, але, водночас, дозволяють вирішувати такі завдання управління як, наприклад, рух уздовж тротуару, рух вулицею, довільний рух з об'їздом перешкод. Принцип їх роботи полягає у постійному виконанні циклу: опитування датчиків та обчислення нових параметрів руху, які відразу приймаються до виконання.

Другий клас методів використовує для управління інформацію про світ, сформовану за даними далекоміра. Ці методи набагато складніші в алгоритмічному плані і вимагають великих обчислювальних ресурсів, але вони набагато стійкіші в різних формах перерізу рельєфу і мають ширше застосування.

Розглянемо колісний мобільний «s-bot», який рухається по плоскій горизонтальній поверхні в міських умовах. При цьому метою управління є забезпечення руху мобільного «s-bot» вздовж тротуару і на перехресті, використовуючи наявні на борту систему відчуття, в якості якої виступає скануючий лазерний 3D далекомір. Використовуючи лазерний 3D далекомір був запропонований метод, що дозволяє постійно відстежувати координати положення мобільного «s-bot» та інтерпретувати інформацію про навколишнє середовище за вимірюваннями далекоміра. У цьому розділі буде представлено розроблений та випробуваний алгоритм управління мобільним «s-bot».

2.2 Управління рухом мобільним «s-bot» вздовж тротуару

При дослідженні руху мобільного «s-bot» в міських умовах, має вирішуватися завдання руху «s-bot» уздовж тротуару. В даному випадку, «s-bot» може орієнтуватися на тротуар, розташований по одну його сторону (праву або ліву), що дозволяє забезпечувати рух «s-bot» в міських умовах. Завдання ставиться так: «s-bot» має рухатися на заданій відстані від об'єкта – тротуару (рисунок 2.3).

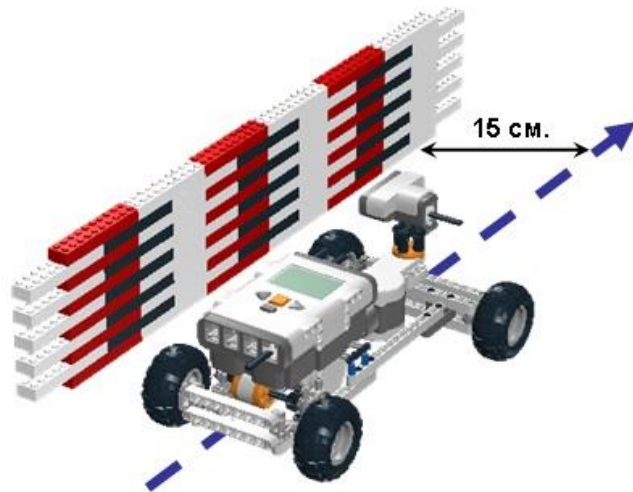


Рисунок 2.3 – Приклад руху мобільного «s-bot» на заданій відстані від об'єкта – тротуару

Ця задача може бути вирішена за допомогою алгоритмів керування «s-bot» першого типу. У загальному випадку, рух мобільного «s-bot» паралельно стіні і сенсор відстані показує цілком очікувані значення, на основі яких приймається рішення в який бік повертати (рисунок 2.4) .

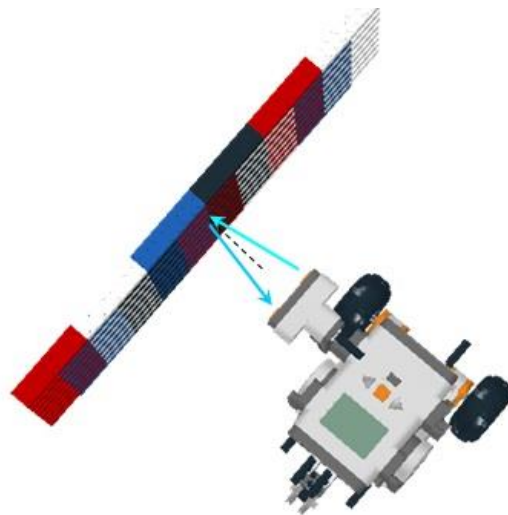


Рисунок 2.4 – Приклад руху мобільного «s-bot» на заданій відстані від об'єкта – тротуару за допомогою лазерного сенсора

Приклад повороту мобільного «s-bot» ліворуч на рисунку 2.5.

Сенсор відстані вільно обертається, намагаючись бути спрямованим прямо на стіну, а при повороті праворуч, мотор повертає сенсор в інший бік (рисунок 2.6).

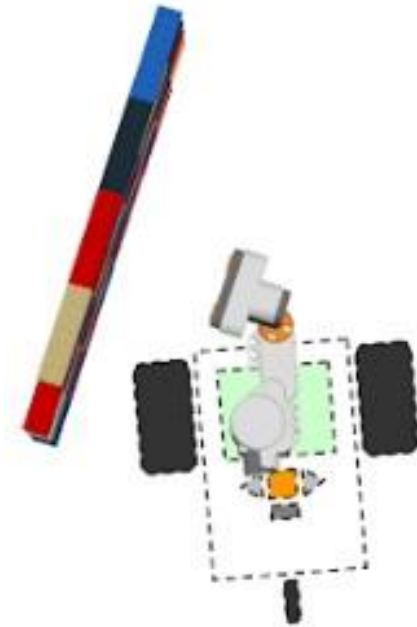


Рисунок 2.5 – Приклад повороту мобільного «s-bot» ліворуч

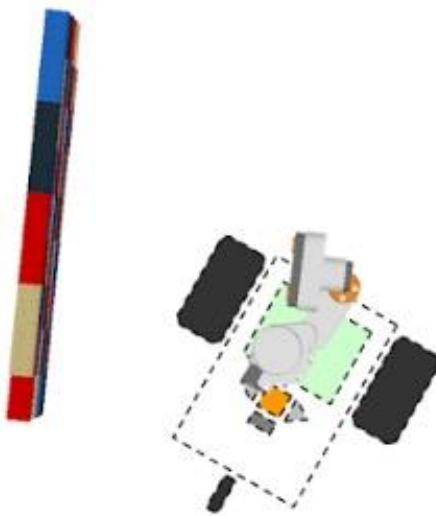


Рисунок 2.6 – Приклад повороту мобільного «s-bot» праворуч

У цьому розділі описуються основні принципи, покладені основою методу управління автономним мобільним «s-bot» вздовж тротуару. На початку розглянемо найпростіший випадок. Припустимо, що абсолютна система координат розташована так, що вісь X_0 паралельна тротуару, а сам тротуар являє собою послідовність відрізків, що лежать на одній прямій, розташованій на вісі X_0 . Таким чином, в даному моменті не розглядаються складніші рухи «s-bot», наприклад, повороти. У цьому випадку «s-bot» повинен рухатися прямою, розташованою на заданій відстані від тротуару. Такі завдання виникають часто при реалізації автоматичного управління мобільним «s-bot». При формуванні закону управління, що забезпечує рух мобільним «s-bot» уздовж тротуару, необхідно враховувати не тільки кінематичні, а й динамічні властивості мобільного «s-bot». Розглянемо модель управління рухом.

Кутові швидкості правого ω_R і лівого ω_L колеса та кутова ω і лінійна v швидкості мобільного «s-bot» пов'язані співвідношеннями:

$$\begin{cases} \omega_R = \frac{1}{p} \left(v + \frac{\omega W}{2} \right) \\ \omega_L = \frac{1}{p} \left(v - \frac{\omega W}{2} \right) \end{cases} \quad (2.2)$$

Прийmemo наступний спосіб формування керуючих напруг, що подаються на приводи провідних коліс мобільного «s-bot»:

$$\begin{cases} U_R = U_d + U_\varphi \\ U_L = U_d - U_\varphi \end{cases} \quad (2.3)$$

де $U_d = \text{const}$ – напруга, що забезпечує задану лінійну швидкість руху мобільного «s-bot»;

U – напруга, що управляє кутовою швидкістю руху мобільного «s-bot».

Виберемо наступний закон управління:

$$U_{\varphi} = -k_1\varphi + k_2(-y + \dot{y}), \quad (2.4)$$

де k_1, k_2 – деякі параметри;

φ – кут між поздовжньою віссю мобільного «s-bot» та напрямком тротуару;

\dot{y} та y – бажана та поточна координата тротуару у власній системі координат.

Параметри y та φ шукаються по сканах, які отримують від 3D лазерного далекоміра. Зробимо тепер такі припущення. Будемо вважати, що при русі мобільного «s-bot» на площині вздовж гладкої програмної траєкторії, керуючі моменти провідних коліс, що розвиваються електродвигунами, змінюються незначно (це припущення часто використовують при дослідженні електромеханічних систем). Виконавши певні перетворення отримаємо остаточне рівняння керованого об'єкта як:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \varphi \\ \dot{y} = v \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \omega \end{cases} \quad (2.5)$$

Співвідношення (2.5) є системою нелінійних диференціальних рівнянь п'ятого порядку, що описує рух мобільного «s-bot» на площині під дією напруг U_R, U_L , поданих на якірні обмотки двигунів правого та лівого борту. Завдання полягає в тому, щоб визначити φ, y і вибрати параметри k_1, k_2 , що забезпечують прийнятну якість траєкторії руху мобільного «s-bot» уздовж тротуару. Отримані рівняння руху мобільного «s-bot» (2.5), являють собою систему

нелінійних диференціальних рівнянь п'ятого порядку, що значно ускладнює завдання подальшого аналізу системи та вибору коефіцієнтів k_1, k_2 для реалізації алгоритму обчислення керуючої напруги U_ϕ . Тому для вибору коефіцієнтів k_1, k_2 проведемо лінеаризацію рівнянь руху для того, щоб можна було використовувати класичні методи аналізу лінійних стаціонарних систем. Лінеаризацію рівнянь руху мобільного «s-bot» будемо проводити відносно певної заданої програмної траєкторії $x(t)$ при впливі сигналу, що управляє $u = u(t)$, який забезпечує необхідний рух мобільного «s-bot» у зовнішньому середовищі. Виконавши математичні перетворення отримаємо систему лінійних, нестаціонарних диференціальних рівнянь:

$$\dot{x}(t) = v_c, \dot{y}(t) = \dot{y}, \dot{\phi}(t) = 0, \dot{\omega}(t) = 0. \quad (2.6)$$

Тоді рівняння у відхиленнях щодо програмної траєкторії матимуть вигляд:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = \Delta v \\ \Delta \dot{y} = v_c \Delta \phi \\ \Delta \dot{\phi} = \Delta \omega \end{cases}. \quad (2.7)$$

Таким чином, отримано систему лінійних диференціальних рівнянь п'ятого порядку, яка описує рух мобільного «s-bot» на площині в околиці заданої програмної траєкторії $x(t)$. За допомогою цієї системи лінійних диференціальних рівнянь вирішується завдання руху мобільного «s-bot» на перехресті в міських умовах. Завдання полягає в тому, щоб мобільний «s-bot», повертаючи ліворуч, в'їхав у цільову точку паралельно тротуару і ця цільова точка знаходилася б між двома тротуарами (рисунок 2.7). Дана цільова точка може бути призначена оператором.

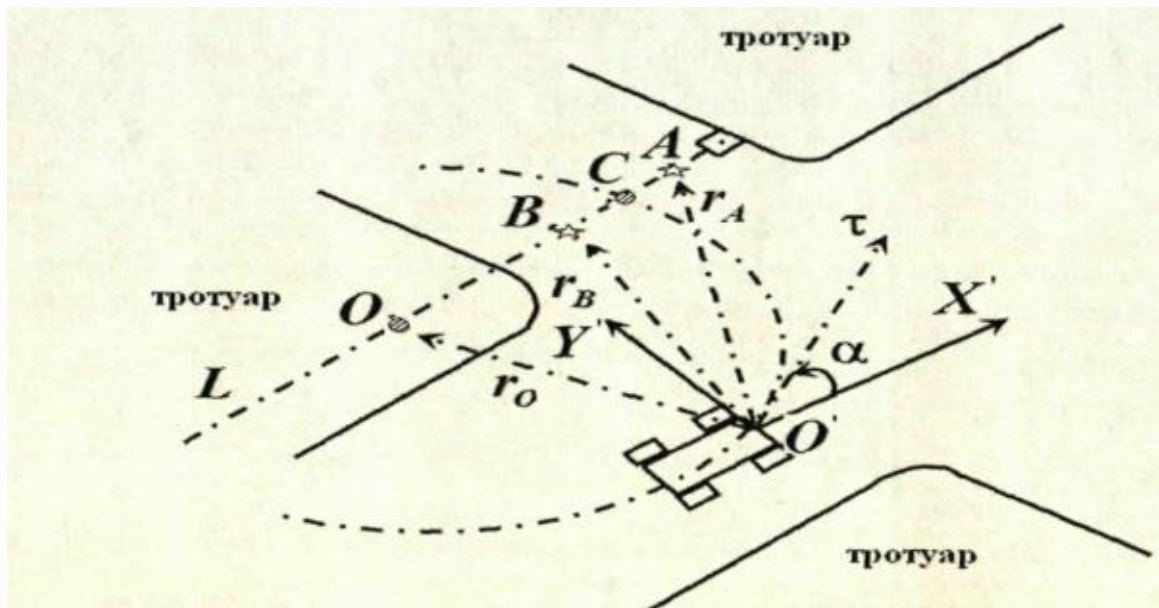


Рисунок 2.7 – Моделювання руху мобільного «s-bot» на перехресті програмною траєкторією

Вибір програмної траєкторії, безперечно, не є однозначним, і в цій ситуації відображає лише вимогу проїхати ліворуч на перехресті, не зачепивши тротуар. Таким чином, кроки програмної траєкторії мають бути такими:

- крок № 1 – програмна траєкторія – дуга кола;
- крок № 2 – програмна траєкторія проходить через початок зв'язаної системи координат та цільову точку;
- крок № 3 – програмна траєкторія паралельна тротуару в цільовій точці;
- крок № 4 – програмна траєкторія перераховується у процесі руху.

Розглянемо рух мобільного «s-bot» по колу. Для цього необхідно, щоб кут орієнтації лежав у проміжку $[0; 2\pi)$, тому не слід використовувати необмежено зростаючий по модулю з часом кут $(\omega t + \varphi_0)$ для цієї мети, але можна пов'язати орієнтацію мобільного «s-bot» з кутом $\text{atan2}^*(y - y_c, x - x_c)$, що відображає поточне положення мобільного «s-bot» на колі. Позначимо кут

$\text{atan2}^*(y-y_c, x-x_c)$ як β і визначимо цей взаємозв'язок. Якщо β належить проміжку $[0; \pi/2]$, то отримаємо наступний взаємозв'язок кутів φ та β (рисунок 2.8). Розрахунки були проведені у середовищі MatLab:

- якщо $\omega > 0$:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \beta, \quad (2.8)$$

- якщо $\omega < 0$:

$$\varphi = \frac{3\pi}{2} - \beta. \quad (2.9)$$

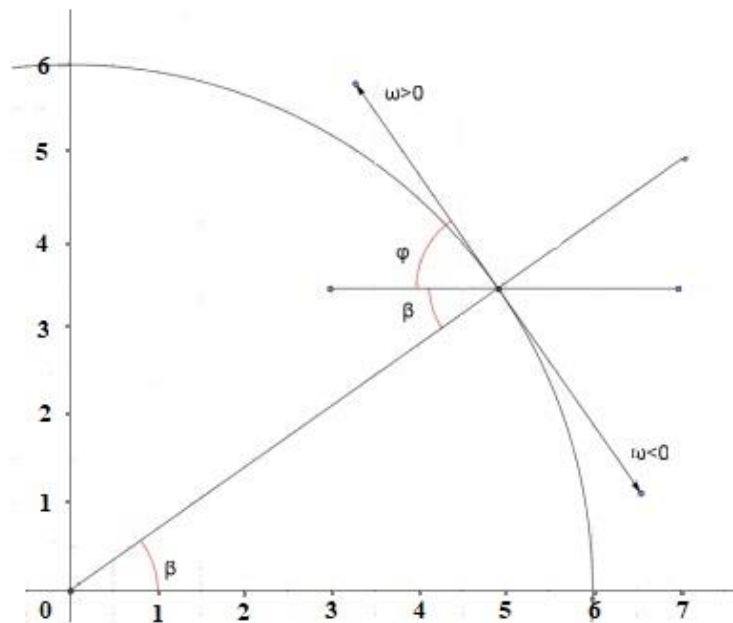


Рисунок 2.8 – Зв'язок кута орієнтації φ з кутом положення мобільного «s-bot» на колі β якщо $0 \leq \beta \leq \pi/2$

Обчислення точки початку повороту мобільного «s-bot» наведено на рисунку 2.9.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОБІЛЬНИХ «S-BOTS» У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Проведені дослідження, що підтверджують забезпечення руху мобільного «s-bot» у міських умовах за 3D далекометричними вимірюваннями, були проведені в середовищі MatLab для ілюстрації роботи алгоритму визначення параметрів руху «s-bot» та його локалізації, а також алгоритму управління рухом мобільного «s-bot» вздовж тротуару та на перехресті. Для перевірки правильності проведених розрахунків та отриманих результатів теоретичних досліджень, створених алгоритмів навігації та управління рухом автономного мобільного «s-bot», були проведені експериментальні дослідження з використанням моделі мобільного «s-bot», оснащеного віртуальним 3D-лазерним далекоміром у середовищі моделювання Microsoft Robotic Developer Studio. Система управління мобільного «s-bot», організована як розподілена система, в якій кожен модуль виконує певну функцію (сервіс). Така побудова дозволяє забезпечити такі властивості системи:

- незалежність роботи окремих модулів;
- можливість розробки та налагодження кожного модуля окремо;
- масштабованість системи для розподілу навантаження обчислювальних потужностей у embedded system;
- реконфігурація архітектури всієї системи.

Система управління мобільним «s-bot» складається з наступних модулів:

- модуль користувача інтерфейсу. Він відповідає за візуалізацію відображення інформації далекоміра. Модуль дозволяє оператору в масштабі реального часу отримувати інформацію про довкілля, поточні лінійні та кутові швидкості руху мобільного «s-bot». Даний модуль також здійснює передачу команд керування від джойстика до модуля керування приводами віртуальних шасі. Задані значення лінійної та кутової швидкостей пропускаються через

фільтр. Отримані значення передаються до модуля управління приводами віртуальних шасі. Використовуючи вказаний фільтр, є можливість забезпечити плавність управління мобільного «s-bot» при розгоні та гальмуванні;

- модуль взаємодії із 3D симуляцією. Дозволяє симулювати поведінку мобільного «s-bot» у віртуальному світі, що дозволяє використовувати просунуту фізичну модель;

- модуль керування приводами віртуальних шасі. Здійснює видачу сигналів управління на приводи віртуальних шасі, згідно з заданими значеннями кутової та лінійної швидкостей;

- модуль взаємодії з віртуальним 3D-лазерним далекоміром. Даний модуль отримує дані з віртуального лазерного скануючого далекоміра і забезпечує їх розсилку процесам, що підписалися. Після підписки першого клієнта лазерний далекомір переводиться модулем в режим постійних вимірювань, в якому він безперервно надсилає дані вимірювань через програмний інтерфейс. Модуль приймає ці дані, додає до них позначку системного часу, в який був отриманий кожен скан і розсилає всім клієнтам. У процесі виконання роботи є можливість змінити параметри роботи далекоміра (наприклад, дальність роботи далекоміра з 8 до 80 метрів);

- модуль оцінки положення мобільного «s-bot». Реалізує алгоритм розподілу оцінок кутової та лінійної швидкостей «s-bot» та їх інтегрування за допомогою фільтра Калмана для отримання оцінок координат положення мобільного «s-bot» та матриці коваріації помилок оцінок;

- модуль побудови карти. Здійснює суміщення далекометричних даних згідно з отриманими оцінками положення мобільного «s-bot» в єдину карту робочої зони «s-bot»;

- модулі автоматичного руху мобільного «s-bot». Реалізує алгоритми автоматичного керування рухом «s-bot» вздовж тротуару та на перехресті. Контролює далекометричне зображення з метою запобігання можливого

зіткненню «s-bot» з об'єктами робочої зони та реалізує алгоритм управління рухом «s-bot» під час об'їзду перешкоди;

- модуль журналу подій. Основне завдання даного модуля є зберігання та пересилання повідомлень журналу. Журнальне повідомлення включає опис даних далекоміра і координати «s-bot», для подальшого перегляду та аналізу. Для запису журнального повідомлення протікаючого процесу, модулю журналювання подій надсилаються дані з описом події.

Система управління мобільним «s-bot» має ієрархічну архітектуру. Нижній рівень представлений модулями взаємодії з віртуальним обладнанням та датчиками «s-bot», проміжний рівень формують модулі обробки інформації та автоматичного управління, а рівень взаємодії з користувачем представлений графічним інтерфейсом. Інформація далекоміра надходить у вхідні черги даних модулів оцінки положення «s-bot», автоматичного руху «s-bot» та інтерфейсу користувача. Модуль оцінки положення «s-bot» розсилає інформацію про поточний стан «s-bot», суміщену з далекометричними зображеннями, для яких визначені параметри руху. На підставі цієї інформації модуль побудови карти створює план перерізу рельєфу, який, у свою чергу, доставляється у вигляді повідомлень у модуль автоматичного руху «s-bot», а також модуль користувальницького інтерфейсу. Команди користувача розсилаються в модулі, у разі ручного керування, від джойстика безпосередньо в модуль керування приводами віртуальних шасі. З модулем керування приводом віртуальних шасі також взаємодіють модулі керування автоматичним рухом «s-bot».

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження логічного рівня системи управління рухом мобільного «s-bot» у міських умовах, заснований на зміні стратегій поведінки залежно від ситуації. Інформація від далекоміра та зовнішня карта з цільовими точками надходять як вхідна інформація про дорогу. Цільові точки можуть бути задані двома способами:

- оператором;
- системою управління поведінкою.

Система може працювати у наступних режимах:

- рух мобільного «s-bot» уздовж тротуару;
- рух мобільного «s-bot» уздовж безперервного тротуару;
- рух мобільного «s-bot» уздовж розривного тротуару;
- рух мобільного «s-bot» на перехресті;
- рух «прямо» на перехресті;
- поворот наліво на перехресті;
- поворот праворуч на перехресті;
- рух мобільного «s-bot» при об'їзді перешкод, які з'являються перед «s-bot» під час руху.

Проведені дослідження алгоритмів показали, що «s-bot» здатний виконувати автоматичний рух уздовж тротуару і на перехресті в міських умовах. Експерименти щодо реалізації таких алгоритмів управління теж були проведені в середовищі MatLab. У розробленій системі керування користувач може призначати цільові точки до початку моделювання. Рух «s-bot» уздовж тротуару і на перехресті здійснювався відповідно до алгоритму завдання кутових швидкостей «s-bot». Модулі автоматичного руху «s-bot» реалізують алгоритми автоматичного управління рухом «s-bot» вздовж тротуару і на перехресті, контролюють далекометричне зображення з метою попередження можливого зіткнення «s-bot» з об'єктами робочої зони і реалізують алгоритм управління руху «s-bot» при об'їзді перешкоди. Експерименти з руху «s-bot» у міських умовах у середовищі моделювання MRDS підтвердили працездатність алгоритму. Аналіз отриманих результатів підтверджує достовірність проведених досліджень та розрахунків щодо створення алгоритму управління рухом та критеріїв щодо налаштування його параметрів.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було досліджено модель управління рухом мобільного «s-bot» в міських умовах.

Мобільний «s-bot» рухався в міських умовах уздовж тротуару, через перехрестя, для досягнення цільової точки з перешкодами. Як сенсорну систему використовувався 3D-лазерний скануючий далекомір, що постачає в систему управління мобільного «s-bot» інформацію про дальність до об'єктів зовнішнього середовища, що знаходяться в передній півсфері. У кваліфікаційній роботі розглянуто методи вибору параметрів закону управління, що забезпечують аперіодичний характер перехідного процесу під час руху мобільного «s-bot» уздовж тротуару. Враховуються динамічні властивості об'єкта керування та параметри приводів.

Виділено три області значення параметрів, при яких траєкторія руху вздовж тротуару нестійка, має аперіодичний або коливальний характер. Отримані результати дозволяють визначити перші наближення значень параметра закону управління. Наведено алгоритм управління рухом мобільного «s-bot» уздовж тротуару і через перехрестя.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедев В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер- сенсорна мережа» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. Радченко В.О., Руденко Д.А., Ткачов В.Н., Токарев В.В. Мобильная подсистема «Мультикоптер-сенсорная сеть» в компьютерной системе хранения BIG DATA / В.О. Радченко, Д.А. Руденко, В.Н. Ткачов, В.В. Токарев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №4(44). - С.102-105.
3. Пат. 118921 Україна, МПК H04W 64/00. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією / В.М. Ткачов, В.В. Токарев - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
4. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Мобильная система передачи данных на базе динамически реконфигурируемых мультикоптерных устройств / В.А. Радченко, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
5. Рубан И.В., Чурюмов Г.И., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Функциональная стойкость универсальной мобильной реконфигурируемой системы при воздействии электромагнитного излучения высокой мощности / И.В. Рубан, Г.И. Чурюмов, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Информационные технологии и безопасность: (ИТБ-2017), материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции, 30 нояб. 2017г. - Киев, 2017. - С.205 - 210.
6. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ випромінювання: звіт про НДР (заключ.) № держреєстрації

0117U003916.: Ф76/109-2017 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник Г. И. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.

7. Ruban I.V., Churyumov G.I., Tokarev V.V., Tkachov V.M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / I.V. Ruban, G.I. Churyumov, V.V. Tokarev, V.M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security: (ITS 2017). CEUR Workshop Processing., 30 nov. 2017 y. - Kyiv, 2017. - P. 105-111.

8. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev, W. Nannan // The 10h IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)., 5-7 june, 2019 y. - Leeds, 2019. - P.26 - 29.

9. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токарев В. В., Наннан Ванг. Надширокосмугові технології в системах управління мобільними об'єктами. / О. А. Серков, П. Є. Пустовойтов, І. В. Яковенко, Б. О. Лазуренко, Г. І. Чурюмов, В. В. Токарев, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.

10. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів / О.А. Серков, В.В. Князев, Б.О. Лазуренко, І.В. Яковенко, Г.І. Чурюмов, В.В. Токарев // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (EMC-2019):збірник наукових робіт четвертої міжн. наук.-техн. конф., 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - С. 55-57.

11. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Щербак В.К. Моделирование компьютеризированных систем управления с использованием интеллектуальных средств / Г.Ф. Кривуля, В.В. Токарев, В.К. Щербак // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповідей 32-ї міжн. наук.-практ. конф., 24-25 жовт. 2019р. - Харків, 2019. - С. 90 - 91.

12. Krivoulya G., Tokariiev V., Iina I, Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic / G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Iina, V. Shcherbak // IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - P.197 - 201.

13. Лебедев О.Г., Ткачев В.Н., Токарев В.В., Чурюмов Г.И. Темпоральная модель адаптации интегрированной информационной системы путем реконфигурации логической структуры / О.Г. Лебедев, В.Н. Ткачев, В.В. Токарев, Г.И. Чурюмов // Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: тези доповідей другої міжн. наук. - техн. конф., 18 - 19 квітн. 2018 р. - Харків, 2018. - С.6-7.

14. Думчиков А.П. Модель управління рухом мобільного «s-bot» в міських умовах / А.П. Думчиков // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 22 вересн. 2022р. - Тернопіль, Україна – Переворськ, Польща: 2022. - випуск 70. - С.23 - 24.