

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

СЕРГІЄНКО ОЛЕГ ЮРІЙОВИЧ

УДК 681.5+621.375.826; 656.052.1

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ
СИСТЕМ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ НАЗЕМНИХ РОБОТІВ
У НЕДЕТЕРМІНОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки

Науковий консультант доктор технічних наук, професор КАРТАШОВ Володимир Михайлович, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем Харківського національного університету радіоелектроніки МОН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор ПІЗА Дмитро Макарович, директор Інституту інформатики та радіотехніки Запорізького національного технічного університету МОН України

доктор технічних наук, професор ПОЛЯРУС Олександр Васильович, завідувач кафедри метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету МОН України

доктор технічних наук, старший науковий співробітник БИКОВ Віктор Миколайович, професор кафедри теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна МОН України.

Захист відбудеться «26» січня 2018 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: кімн. №13, пр. Науки, 14, м. Харків, 61166

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки МОН України за адресою: пр. Науки, 14, м. Харків, 61166 та на веб-сайті ХНУРЕ за адресою:

<http://nure.ua/university/structure/science/theses-counsils/d-64-052-03>

Автореферат розісланий «26» грудня 2017р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час різноманітні роботи набули значного поширення та застосування практично у всіх областях людської діяльності. Вони здатні працювати в складних та екстремальних умовах, виконувати небезпечні для людини, а також одноманітні та рутинні операції, успішно працювати в галузях, де велика ціна людської помилки.

Роботів прийнято класифікувати за такими показниками: по області застосування - виробничі (промислові), військові (бойові, що забезпечують), дослідні, медичні; по природному середовищу (експлуатації) - наземні, підземні, надводні, підводні, повітряні, космічні; за ступенем рухливості - стаціонарні, мобільні, тощо.

Умови функціонування роботів, які визначаються типом середовища використання і характером робочого процесу, можна розділити на дві категорії: детерміновані та недетерміновані. До детермінованих відносять середовища, спроектовані та створені людиною. У середовищах другої категорії організація практично відсутня, тому їх називають повністю неорганізованими (недетермінованими). До таких середовищ відносяться, зокрема, природні середовища й середовища, що створюються аварійними ситуаціями, як в природних умовах, так і при руйнуванні середовищ, спроектованих і створених людиною, тобто при руйнуванні будівель і споруд.

Значна увага останнім часом приділяється розвитку мобільних наземних роботів, призначених для виконання дій в природних середовищах в польових умовах: розвідка на місцевості, патрулювання та розмінування, військові дії (в тому числі у випадках радіоактивного, хімічного та бактеріологічного зараження місцевості), виконання завдань на поверхні інших планет. При руйнуванні створених людиною середовищ мобільні наземні роботи здатні здійснювати рятувальні роботи в зруйнованих спорудах, вести розчищення завалів, розвідку та бойові дії в міських умовах.

Мобільний робот (МР) може бути представлений у вигляді сукупності наступних основних систем - транспортної, спеціальної технологічної, навігації та управління. Система навігації й управління мобільного робота забезпечує отримання інформації про навколишнє середовище, управління рухом і роботою спеціального технологічного устаткування, а також адаптивне управління ходовою частиною та енергетичною установкою з урахуванням взаємодії транспортної системи з навколишнім середовищем.

Задача автоматичного керування наземним мобільним роботом, що рухається по нерівній поверхні незалежно від наявності дорожнього покриття у недетермінованому середовищі є досить складною, оскільки його просторова орієнтація найчастіше піддається недетермінованому впливу поверхні, по якій він рухається, а вірогідність зустрічі з хаотично розповсюдженими перешкодами також є найвищою у порівнянні з іншими класами роботів. До такого класу машин відносяться роботи для пересування по поверхні інших планет, для усунення наслідків техногенних (аварії на підприємствах, АЕС) або

природних (землетруси) катаклізмів, тому додатковим ускладненням при проектуванні цих апаратів є висока ймовірність наявності таких впливів як радіація або інші види забруднення. Тобто, завдання автоматичного керування рухом такого робота є складним та важливим теоретичним і практичним завданням, що потребує одночасного вирішення кількох суттєвих аспектів: можливості оглядання навколишнього середовища за допомогою системи машинного зору; необхідності визначення власної просторової орієнтації; оцінки нестабільності частоти бортового еталону часу для можливості більшої узгодженості усіх дій керованого об'єкту; формування траєкторії його переміщення в просторі.

Машинний зір забезпечує можливість машини (за допомогою технічних засобів вимірювань і подальшої комп'ютерної математичної обробки) дистанційно зондувати та отримувати інформацію про навколишнє середовище для подальшої аналітичної обробки. Є кілька істотно різних підходів до побудови таких систем, наприклад: використання прямого контакту сенсорного елемента з наперед заданим напрямом курсу (дискретний магнітний, постійний індукційний або просто візуальний), адаптація CCD- або CMOS- камер для імітації біноклярного зору людини, різноспрямований зір на базі камери з об'єктивом типу "риб'яче око", тощо.

Системи технічного зору (СТЗ) МР, що працюють у недетермінованих середовищах, використовують в даний час, як правило, декілька лазерних або ультразвукових далекомірів, можливості яких з пошуку перешкод та деталізації визначення їх профілю є недостатніми для вирішення завдань, що стоять перед роботами.

Системи визначення просторової орієнтації об'єктів, з яких найбільш визнаними є гіроскопічні та акселерометричні платформи, також мають недоліки, що не дозволили їм набути широкого використання. Гіроскопи є надто енергозатратними сенсорними системами для автономної навігації оскільки для функціонування споживають значну частину енергії бортового джерела живлення, а до того ж є складними та дорогими системами для масового вживання. Акселерометричні системи, за своїми характеристиками є значно більш придатними для масового використання, у динамічному режимі, та особливо при наявності механічних вібрацій, потерпають від перешкод в інформаційному каналі, тому також не набули масового визнання.

Що стосується методів перевірки бортового годинника робота, або взагалі методів вимірювання частоти еталону, то тут взагалі не має визнаної стратегії. Використання коштовних бортових еталонів часу не є економічно обґрунтованим для більшості категорій роботів. Використання поправок шляхом консультації з дорогими супутниковими еталонами часу по спеціальному каналу зв'язку не для всіх категорій роботів є можливим, а до того ж породжує комплекс додаткових теоретичних проблем пов'язаних з часовими затримками у каналі, та стохастичним характером перешкод у ньому. У лабораторних умовах визнаний метод точного вимірювання частоти еталона спирається на спостереження поведінки кривої Аллана протягом тривалого

часу, типово 24 години. Цей метод є достатньо достовірним, але завдяки своїй тривалості він цілком непридатний для завдань навігації. Крім того, він не спроможний адекватно оцінювати короточасові нестабільності частоти, що відбувалися на протязі періоду спостереження. Саме тому завдання автономної навігації робота все ще шукає надійний та ефективний метод для швидкої реєстрації змін частоти, який придатний забезпечити високу точність. А у списку найважливіших недоліків мобільної робототехніки дотепер є наявність значних розходжень між бажаною та реальною траєкторією МР з приводу неточного визначення поточної власної просторової орієнтації за рахунок прослизань у рушіях МР, та значні й здебільшого накопичувані помилки у визначенні часу його знаходження на траєкторії.

Істотний внесок в розвиток автономної навігації МР, як на системно-теоретичному, так і на апаратно-програмному рівнях, внесли такі вчені як Тимофєєв А.В., Юсупов Р.М., Каляєв І.А., Іванов Д. Я., Васильєв І.А., Петухов С.В., Шаманов І.В., Benedetti M., Donelli M., F. Chaumette, S. Hutchinson, P. Forman, I. Parry, Gerald F. Marshall, Ugonna Ibeanusi, M. Ghallab, F.Ingrand, J.H. Rillings.

Жоден з перерахованих вище методів не отримав широкого міжнародного застосування через наявність недоліків і обмежень, що ускладнюють автоматичну навігацію МР.

Таким чином, з аналізу слідує, що актуальною науково-прикладною проблемою є узагальнене та узгоджене вирішення одночасно таких теоретичних завдань, нерозривно пов'язаних з комплексним вирішенням автоматичної навігації МР: розробленням теорії та методів машинного зору для можливості бачити сектор перед МР; розробленням методу перевірки стабільності частоти бортового годинника МР; методу визначення власної орієнтації МР для ефективного функціонування роботу у недетермінованих середовищах за умов наявності забруднюючих факторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з НДР ДЗ/464-2011 «Розроблення та впровадження інформаційно-комунікаційної технології руху наземного транспорту великих міст» (2011-2012 рр.), № державної реєстрації 0111U005942 (Державне агентство з питань науки, інновацій та інформатизації України по розробці найважливіших нових технологій), в якій автор був виконавцем; двостороннім договором НДТП-ХНАДУ про науково-технічне співробітництво зі створення системи автоматичної навігації машино-тракторних агрегатів в Україні; зі внутрішніми грантами Автономного Університету штату Нижня Каліфорнія (Мексика) по проектам №2352 в 2003-2004рр., №2386 в 2005-2006рр., №2434 в 2015-2017рр., з проектом Євросоюзу та Міністерства економіки та інновацій Іспанії ТЕС 2010-17429 «Robust sensors» (2010-2013рр.), зареєстрованому в Політехнічному університеті Мадрида в Іспанії, в яких автор був керівником або співкерівником.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у розвитку теорії та удосконаленні систем автономної навігації мобільних наземних роботів в недетермінованих середовищах.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні теоретичні завдання:

- розвинути положення теорії автономної навігації мобільних наземних роботів в недетермінованих середовищах на основі комплексного використання в єдиній матриці стану роботу інформації про оточуюче його середовище, власну просторову орієнтацію та часову шкалу;
- розробити метод лазерного зондування простору, що оточує робота, на основі методу динамічної тріангуляції, який дає можливість сканування в розширеному просторовому секторі з можливістю картографування поверхні перешкоди дискретизованою координатною сіткою в реальному масштабі часу та в єдиній системі координат;
- розробити метод вимірювання часових інтервалів та частоти сигналів шляхом раціональної апроксимації медіантами, який забезпечує співпадання деякої цілої кількості інтервалів вимірювання з цілою кількістю еталонних інтервалів без залишку;
- запропонувати новий критерій оцінки збігу без залишку деякої цілої кількості еталонних інтервалів з цілою кількістю вимірюваних часових інтервалів, який сприятиме його простій та надійній апаратній реалізації, на основі використання медіанти з чисельником у форматі «ціле число з деякою кількістю нулів»;
- дослідити на практиці залежність запропонованого методу вимірювання часових інтервалів та частоти сигналів від природних факторів що заважають вимірюванню, насамперед джиттеру та нестабільності тривалості імпульсів імпульсних послідовностей;
- дослідити можливість покращення оцінки часового положення імпульсу зі складною формою обвідної в СТЗ роботів, що дозволить в умовах обмеженого часу з достатньою точністю визначати просторове положення центру підсвіченого лазерного п'ятна на поверхні перешкоди, що забезпечить значні переваги у розрізняльній здатності тривимірних координат на краю сектору огляду СТЗ;
- дослідити можливість функціонування лазерного сканера СТЗ зі змінним кроком сканування, що дозволить оптимізувати пошук перешкоди в полі зору робота та прискорити процес сканування без значних втрат інформативності;
- визначити можливості та запропонувати метод формування достовірної зони поля зору робота шляхом фільтрації великих похибок результатів сканування на основі використання алгоритмів тренування нейронних мереж та їх взаємного порівняння, що дозволить підвищити розрізняльну здатність СТЗ;
- запропонувати метод визначення оптимальної траєкторії руху МР в заданому секторі простору за критерієм мінімального шляху та максимальної гладкості траєкторії (зведення до мінімуму впливів

рульовим механізмом), що ґрунтується на використанні даних, отриманих від запропонованої СТЗ, а також даних від системи акселерометричного визначення власної просторової орієнтації МР і бортового годинника робота.

Об'єкт дослідження - процес навігації мобільного наземного робота в автономному режимі руху.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи, що забезпечують автономну навігацію мобільного наземного робота у недетермінованому середовищі.

Методи дослідження. Методологічною основою дисертації є використання системного підходу, аналізу концепцій реалізації автономної навігації з технічної та математичної точок зору. Використовувалися методи теорії радіотехнічних та телевізійних систем, теорії радіоуправління, теорії вимірювань, методи математичної статистики та теорії ймовірностей, а також методи чисельного аналізу, методи комп'ютерного моделювання роботи різних частин системи з використанням програмного забезпечення MatLab, LabView, SolidWorks; методи тренування нейронних мереж Полак-Ріб'єра, квазі-Ньютона, Левенберга-Марквардта; методи програмування управління роботою електричних приводів в C++ та LabView.

Наукова новизна отриманих результатів. Полягає в наступному:

1. Розвинена теорія автономної навігації мобільних наземних роботів в недетермінованих середовищах на основі комплексного використання в єдиній матриці стану робота інформації про оточуюче робота середовище, власну просторову орієнтацію та часову шкалу.

2. Вперше запропонований новий метод лазерного зондування простору, що оточує робота - метод динамічної тріангуляції, який відрізняється від відомих можливістю сканування в об'ємному секторі та можливістю картографування поверхні перешкоди, що сприяє прийманню управлінських рішень в реальному масштабі часу та в єдиній системі координат.

3. Вперше запропоновано новий метод вимірювання часових інтервалів та частоти сигналів – метод раціональної апроксимації наближенням медіантами, який на відміну від відомих не описує ірраціональний залишок від ділення вимірюваного на цілу кількість неподільних еталонних інтервалів, а забезпечує збіг деякої цілої кількості інтервалів вимірювання з цілою кількістю еталонних інтервалів без залишку.

4. Вперше запропоновано новий критерій оцінки збігу без залишку деякої цілої кількості еталонних інтервалів з цілою кількістю вимірюваних часових інтервалів на основі використання медіанти з чисельником у форматі «ціле число з деякою кількістю нулів».

5. Вперше доведено, що запропонований новий метод вимірювання часових інтервалів та частоти сигналів є інваріантним до джиттеру та нестабільності тривалості імпульсів імпульсних послідовностей.

6. Вперше запропонований метод насичення та диференціювання, який відрізняється від відомих тим, що дозволяє в умовах обмеженого часу з

достатньою точністю визначати просторове положення енергетичного центру підсвіченого лазерного п'ятна на поверхні перешкоди, та забезпечує значні переваги на краю сектору огляду СТЗ.

7. Удосконалено метод функціонування лазерного сканера СТЗ зі змінним кроком сканування, який відрізняється від відомих тим, що дозволяє оптимізувати пошук перешкоди в полі зору робота за критеріями мінімальних витрат часу на сканування та максимальної інформативності.

8. Удосконалено метод формування достовірної зони поля зору робота шляхом фільтрації результатів сканування з великими похибками на основі використання алгоритму Левенберга-Марквардта, що дозволяє в реальному масштабі часу підвищити розрізняльну здатність СТЗ.

9. Удосконалено метод визначення оптимальної траєкторії руху МР в заданому секторі простору за критерієм мінімального шляху та максимальної гладкості траєкторії (зведення до мінімуму впливів рульовим механізмом), який відрізняється від відомих тим, що ґрунтується на використанні даних, отриманих від запропонованої СТЗ, а також даних від системи акселерометричного визначення власної просторової орієнтації МР і бортового годиннику робота.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що розвинуті наукові положення та методологічні принципи реалізації автономної навігації мобільного наземного робота у недетермінованому середовищі надають наступні переваги.

Використання методу динамічної тріангуляції у лазерній СТЗ вперше надає можливість збільшити до прийнятної зону сканування простору перед роботом, у якій визначення та локалізація об'єктів набуває детермінованого характеру, вона дозволяє створювати цифрову карту перешкод, яка не тільки спрощує прокладення його траєкторії, а й може бути корисною для навігації групи роботів, та для описання та картографування невідомих просторів вперше пройдених роботом.

Динамічна тріангуляція у недетермінованому середовищі надає можливість у зручній для швидких перетворень декартовій системі координат визначати небезпечні краї перешкод, дозволяючи водночас з цим ранжувати їх ступінь небезпечності виходячи зі знання відстаней до них. Її практичною перевагою також є те, що без додаткових перетворень система керування розташовує усі об'єкти, пов'язані з навігацією, у єдиній глобальній системі координат, чим значно скорочує час керування та виключає можливість похибок при перетворенні.

Можливість застосування змінного кроку сканування робить запропоновану СТЗ адаптивним інструментом збору інформації, що дозволяє простою зміною команди у керівній програмі оптимізувати роботу сканера, пристосовуючи його згідно поточних умов до більш детального огляду, або до максимально швидкого визначення наявності перешкод.

Запропонований метод вимірювання частоти надає можливість швидко реєструвати всі зміни частоти, які трапилися у бортовому еталоні на протязі

деякого часу. Це може бути корисним для визначення зовнішніх причин, які своєю появою спричинили відповідну нестабільність. При практичному застосуванні надає такі переваги: уточнюються результати вимірювань сканера (впливає на точність підрахування кутів динамічної тріангуляції); зменшується накопичування помилок у визначенні усіх параметрів МР, що сумуються протягом перебування МР на траєкторії руху; дозволяє значно уточнити показання усіх бортових сенсорів частотного типу.

Метод придушення вимірювального шуму в акселерометрах на базі алгоритму LMS-фільтрації надає можливість значного покращення у визначенні параметрів поточної власної просторової орієнтації МР.

Метод визначення оптимальної траєкторії руху МР в заданому секторі простору за критерієм мінімального пройденого шляху та максимальної гладкості траєкторії зводить до мінімуму кількість впливів рульовим механізмом, внаслідок чого скорочуються енергетичні витрати МР та знос його механічних частин, а також покращується курсова стійкість та зменшується можливість заносів та прослизань.

Запропоновані методи зондування навколишнього простору для СТЗ, а також визначення частоти та інтервалів часу можуть знайти використання в інших областях, наприклад при статичному моніторинзі важливих інженерних споруд та побудові бортових еталонів інших об'єктів.

Вперше запропоновано концепцію підвищення живучості робота у недетермінованих неконтрастних середовищах, при наявності радіації та інших видів забруднення, яка базується на використанні технічних електронних, електричних, механічних та обчислювальних засобів, стійких до впливу зовнішніх факторів, і раціональному спрощенні систем прийому та обробки оптичних сигналів та обчислювальних алгоритмів, призначених для обробки інформації на борту робота.

Результати дисертаційної роботи використовуються на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування», у Академії внутрішніх військ МВС України, в навчальному процесі студентів рівню: бакалавр і магістр та аспірантів за відповідними спеціальностями в Автономному університеті штату Нижня Каліфорнія (Мехікалі, Мексика) та Харківському національному університеті радіоелектроніки, про що свідчать Акти впровадження.

Особистий внесок здобувача. В монографії [160] під редакцією автора запропонований метод динамічної тріангуляції та розвиток теорії автономної навігації МР. Роботи [14-20, 183] написані самостійно. У роботах [182,184,190] співавтори приймали участь у оформленні матеріалів статей та обговоренні результатів. У роботах [190,195,196, 198-234] автору належить постановка задач, обробка результатів. У роботах [30,41,60,73,74,79,126, 137,143,163,168,175] співавтори приймали участь в проведенні експериментального дослідження та статистичної обробки даних. У багатоавторських монографіях [48,123,143,147,180, 287, 288, 289] автором виконана постановка задач, обробка і аналіз результатів дослідження,

співавтори брали участь у виготовленні та випробуванні дослідного устаткування (експериментальних стендів). У роботах [31-33, 61-68,127-129,144-150,169-172,176-178,276-286] автором поставлені завдання та запропоновано методи їх вирішення.

Апробація результатів дисертації. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися на 30 міжнародних конференціях: XXVII Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica ELECTRO 2005, Vol. XXVI, Octubre 5-7 de 2005, Creel, Chih., México; 3rd International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications CITSA – 2006, Orlando, Florida, USA, July, 20-23, 2006; IEEE Conference CERMA2006, Volume II, Los-Alamitos, California-Washington-Tokyo, 2006; IEEE-LEOS “Multiconference on Electronics and Photonics”(MEP-2006), Guanajuato, Mexico, 7-10 November 2006; "CARS & FOF 07 23rd ISPE International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future", 16-18 August, 2007, Bogota, Colombia; IEEE-IES “International Symposium on Industrial Electronics”(ISIE-2008), Cambridge, United Kingdom, 30 June -2 July of 2008; 16th IMEKO TC₄ Symposium “Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements”, Florence, Italy, 20-22 September, 2008; IEEE-34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON’08), 10-13 November, 2008, Florida, USA; IEEE 52nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (52MWSCAS09), 2-5 August, 2009, Cancun, Mexico; ICCAS-SICE 2009, ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka, Japan, August 18-21, 2009; IEEE-35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON’09), 3-5 November, 2009, Porto, Portugal; Séptimo Congreso Internacional de Cómputo en Optimización y Software (AGECOMP-CICos 2009), 17-20 de noviembre del 2009, Cuernavaca, Morelos, Мексика; IEEE-ICIT International Conference on Industrial Technology (ICIT’10), 14-17 March, 2010, Viña-del-Mar, Valparaiso, Chile; IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2010), Bari, Italy, July 4-7, 2010; 2010 First International Conference on Sensor Devices, Technologies and Applications, July 18-July 25, 2010, Venice, Italy; IEEE-36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2010), Glendale-Phoenix, Arizona, USA, 7-10 November, 2010; Pan American Health Care Exchanges – PAHCE2011 Conference, March, 28 – April, 1, 2011, Rio de Janeiro, Brazil; IEEE-22nd Autumn Conference (ROC&C-2011), Acapulco, Mexico, November, 27- December,3, 2011; 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO-2012), Volume 2, Rome, Italy, 28 - 31 July, 2012; 2012 IEEE Photonics Conference, IPC 2012, September, 23-27, 2012, San Francisco, USA; World Congress on Engineering and Computer Science WCECS 2013, Vol I, 23-25 October, 2013, San Francisco, USA; IEEE-39th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2013), Vienna, Austria, 10-14 November, 2013; IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, June, 1-4, 2014; 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2014), Dallas, Texas, USA, October, 29 - November, 1, 2014; 8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD

2015), Vienna, Austria, February, 18-20, 2015; IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2015), Buzios, Rio de Janeiro, Brazil, June, 3-5, 2015; 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2015, Volume 2, Colmar, Alsace, France, July, 21-23, 2015; 41st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2015), Yokohama, Japan, November, 9 - 12, 2015; IEEE Tech Industry Summit and IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2016), June 8-10, 2016, Santa Clara, CA, USA; 42nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2016), Florence, Italy, October, 24 - 27, 2016; IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2017), Edinburgh, Scotland, UK, June, 19 - 21, 2017.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 1 монографії, 7-ми багатоавторських монографіях, 85 друкованих роботах, у тому числі у 69-ти публікаціях, які входять у міжнародному базу SCOPUS, 25-ти статтях в міжнародних журналах з імпаکت – факторами, в одному патенті Мексики, 30-ти працях міжнародних наукових конференцій. 6 статей опубліковані в виданнях зі списку Переліку фахових видань України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 289 найменувань та додатків на 10 сторінках. У роботі 301 сторінка, в тому числі, 103 рисунка та 26 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність задач, що вирішуються, сформульовано наукову проблему, мету та задачі дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи. Наведені відомості про особистий внесок автора, апробації, публікації, впровадження, зв'язки з науковими програмами.

У першому розділі розглянуто стан теорії та методів автономної навігації та автоматичного управління рухом мобільних наземних роботів в недермінованих середовищах. Визначено рамки дослідження: розглядаються мобільний наземний колісний робот, що працює у автономному режимі; квазістаціонарний характер недетермінованих середовищ; з нерівностями, що можна подолати, з перепадом висот 0,25 радіуса колеса робота; за можливості наявності забруднюючих факторів (радіація, тощо).

Вказана важливість для вирішення стратегічних і тактичних задач, які стоять перед роботом, можливості використання даних СТЗ, систем визначення власної просторової орієнтації та вимірювання частоти бортового годинника.

Наведено аналіз різноманітних принципів і методів побудови вказаних систем МР, проаналізовано їх недоліки та на основі результатів аналізу сформульовані технічні вимоги до параметрів комплексної системи автономної навігації мобільного наземного робота. Визначено, що для здійснення автономної навігації МР необхідно: отримувати детальну інформацію про усі об'єкти в заданому широкому просторовому секторі у формі координатної

сітки їх поверхонь; отримувати достовірну інформацію про поточну просторову орієнтацію робота; визначати стабільність частоти бортового годинника робота; мати змогу паралельно зводити усю цю інформацію у матрицях прямої та зворотної кінематики МР, що надає можливість прокладання оптимальної траєкторії переміщення робота у недетермінованих середовищах.

Аналіз стану теоретичних аспектів цього комплексного питання показав, що використовуваний при аналізі та синтезі алгоритмів функціонування мобільних наземних роботів науково-методичний апарат є недосконалим і не дозволяє на досить якісному рівні вирішити актуальні наукові та прикладні завдання. Це породжує протиріччя між рівнем розвитку науково-методичного апарату даної предметної області та вимог, які пред'являє практика.

У відповідності до цього сформульована науково-прикладна проблема дисертаційних досліджень і вказані напрямки подальшого розвитку науково-методичного апарату даної предметної області.

У **другому розділі** розглянуто запропоновані метод та скануюча система технічного зору для автономної навігації мобільного наземного робота, яка використовує принцип динамічної триангуляції.

Лазерний промінь за допомогою двох крокових електроприводів покроково пересувається по визначеній траєкторії у горизонтальному та вертикальному напрямках. На кожному кроці він зупиняється, формуючі на дуже короткий час трикутник (рис. 1). За допомогою скануючої апертури (СА), що знаходиться на відстані a від лазерного передавача, фіксується тимчасове положення вершини цього трикутника, та за формулами (2-5) визначаються миттєві координати точки розсіювання x , y та z на кожному i -му горизонтальному та j -му вертикальному кроках сканування. Обчислення координат можливо завдяки тому, що протягом існування трикутника стають відомими три його елементи: кут позиціонування променя лазера C_{ij} , кут повернення дифузно розсіяного променя B_{ij} , та базову відстань a між оптичними центрами СА та системи позиціонування лазера (ПЛ). Таким чином, вершина такого динамічного трикутника ковзає по поверхні усіх об'єктів у заданому секторі, покриваючи їх сіткою з дискретних точок (рис.2).

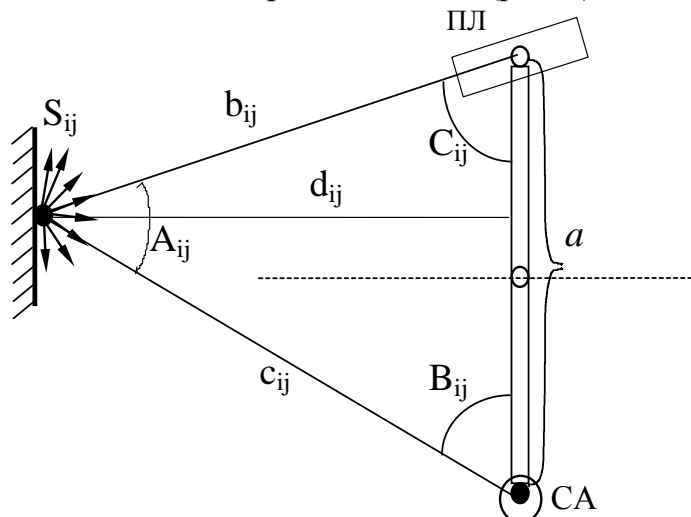


Рис.1 – Схема вимірювання координат триангуляційним методом

Розроблено методологію перетворення безпервної поверхні перешкоди в сітку з покриваючих її дискретних точок з певними координатами.

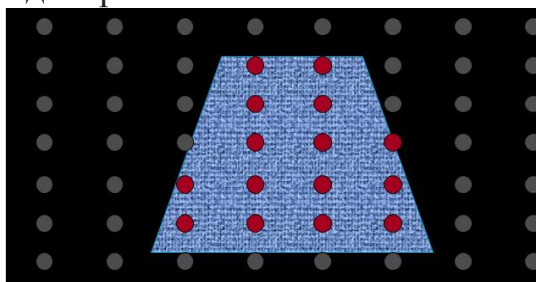


Рис. 2 – Схема покрокового сканування сектору поля зору робота та знаходження перешкоди лазерним променем

На рис.3 показані основні елементи СТЗ і її розміщення на МР. СТЗ розташовано у верхній передній частині МР, містить потужний лазер з коліматором, які встановлені безпосередньо у системі позиціонування лазера (ПЛ), фотоприймальну скануючу апертуру (СА) та систему керування її елементами.

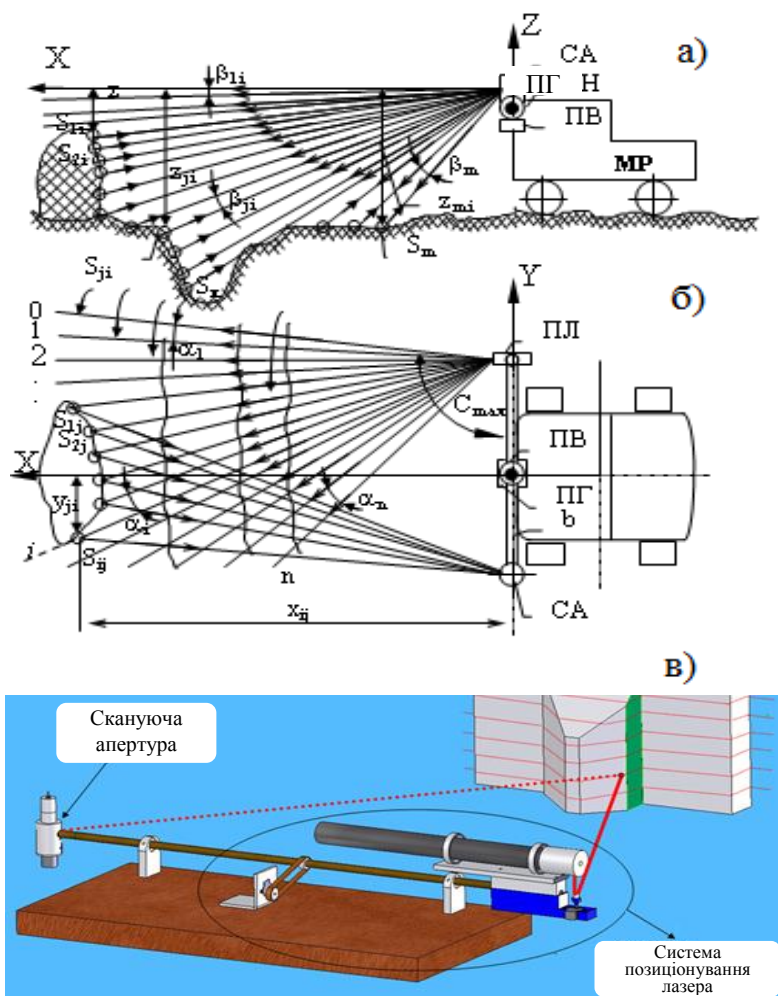


Рис.3 – Принцип роботи СТЗ на основі динамічної триангуляції (а – вид збоку; б – вид зверху; в - прототип лазерного сканера)

Нахильна відстань d_{ij} від основи до точок, підсвічених лазером, визначається за формулою

$$d_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \sin C_{ij}}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (1)$$

де a – відстань між віссю обертання ПЛ і СА – база сканування. При значенні $a = 1$ м значно спрощуються обчислювання та вкорочується час сканування.

Використовуючи значення кутів $B_{ij}, C_{ij}, \sum_{j=1}^j \beta_j$, і основи a , можна обчислити координати кожної виділеної лазером на поверхні перешкоди точки (рис. 3 і 1) в прямокутній системі координат $OXYZ$ СТЗ:

$$x_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \sin C_{ij} \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (2)$$

$$y_{ij} = a \times \left(\frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cos C_{ij}}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right), \text{ при } B_{ij} \leq 90^\circ, \text{ (обертання праворуч)}, \quad (3)$$

$$y_{ij} = -a \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cos C_{ij}}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right), \text{ при } B_{ij} > 90^\circ, \text{ (обертання ліворуч)}, \quad (4)$$

$$z_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \sin \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}. \quad (5)$$

Основні характеристики запропонованого триангуляційного методу досліджувалися теоретичним та експериментальним шляхами з використанням розробленого експериментального зразка СТЗ, який наведено на рис.4. Дослідження проводились на різних за матеріалом, розміром та формою перешкодах, з різними поглинаючими та відбиваючими властивостями поверхонь, які розміщувались у різних точках поля зору СТЗ.

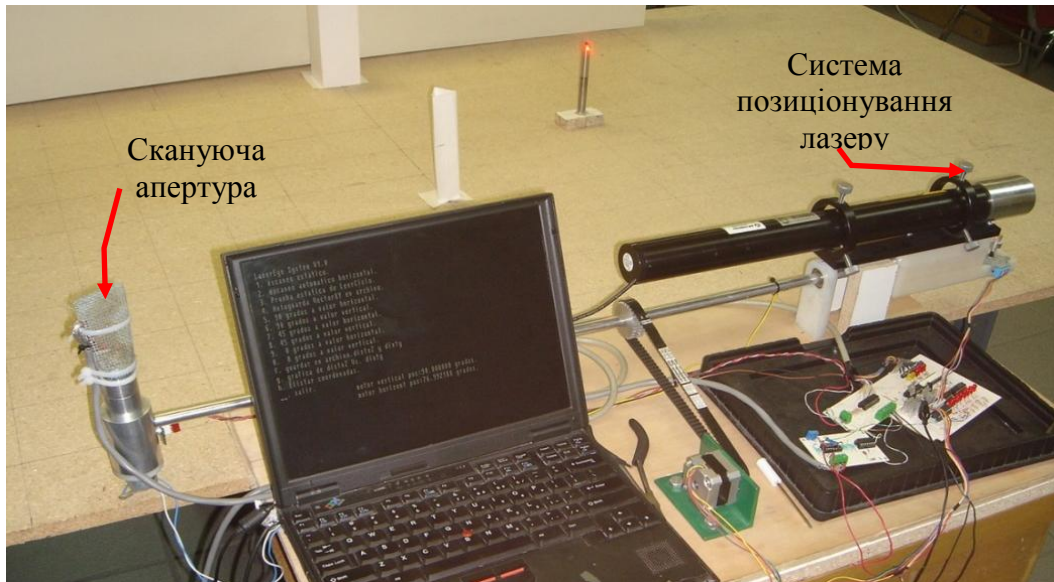


Рис. 4 – Експериментальна установка у ході лабораторних досліджень

Експериментальні дослідження точностних характеристик системи виконувались на спеціальному оптичному столі. Різноманітні відбиваючі та поглинаючі об'єкти розміщувались в вузлах високоточної координатної сітки. Аналіз результатів вимірювань координат об'єктів дозволив виявити в полі зору СТЗ такі зони: достовірна (відносна помилка вимірювання координат $\delta \leq 1\%$), прийнятна ($\delta \leq 5\%$) та периферійна ($\delta > 5\%$) (рис. 5).

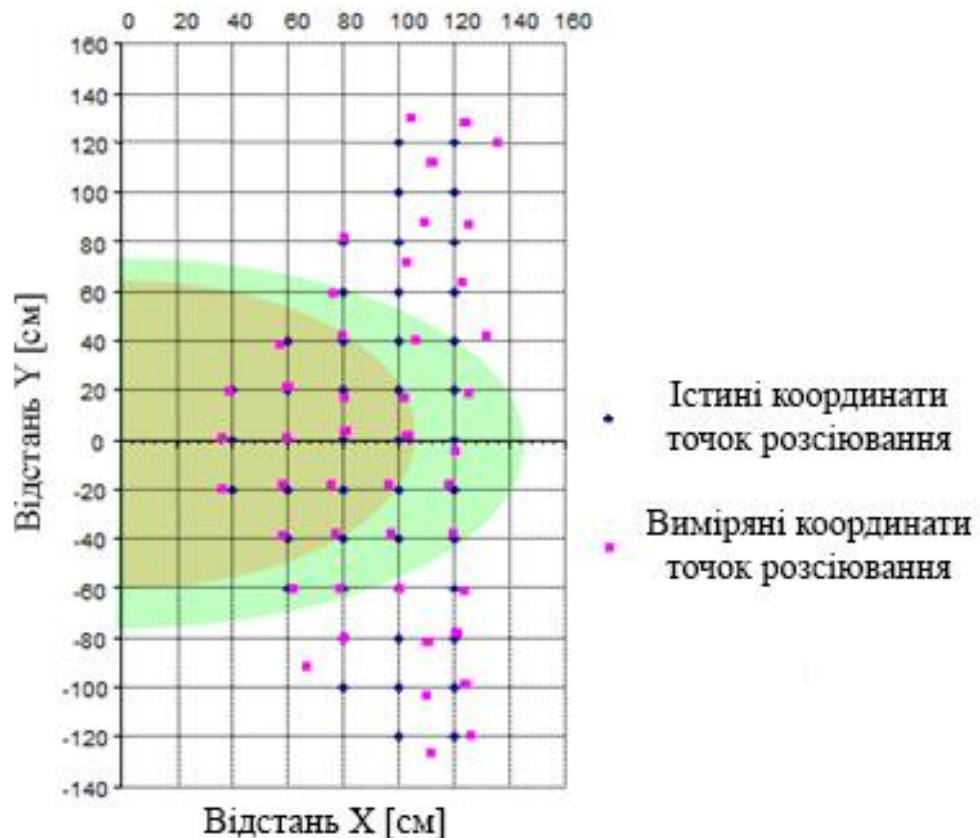


Рис. 5 – Три зони точності СТЗ виявлені у ході лабораторних досліджень

Методом математичного комп'ютерного моделювання було виконано аналіз відомих методів оцінювання енергетичного центра п'ятна лазерного сигналу, розсіяного на перешкодах: метод геометричної центроїди, метод центроїди спектра потужності, метод насичення та інтегрування, метод переднього фронту, метод виявлення піку (рис.6).

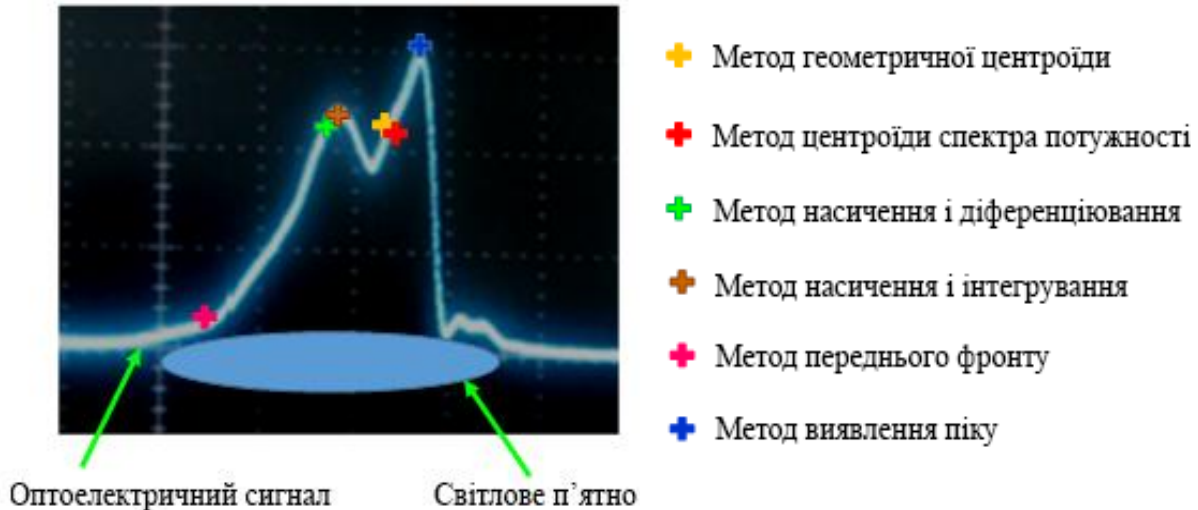


Рис.6 – Порівняння методів оцінювання локалізації енергетичного центру лазерного п'ятна

Аналіз показав, що розглянуті методи не забезпечують в умовах обмеженого часу достатньої точності визначення просторового положення енергетичного центру підсвіченого лазерного п'ятна на поверхні перешкоди. Запропоновано новий метод насичення та диференціювання для оцінювання часового положення центру імпульсу зі складною формою обвідної, який задовольняє умовам, що ставляться. Це сприяє підвищенню розрізняльної здатності запропонованої СТЗ шляхом визначення енергетичного центру лазерного п'ятна. Визначено технічні параметри СТЗ: точність вимірювання координат, швидкодія (на отримання координат однієї точки потрібно 0,2 мс), дальність дії (для дальності 20 м значення необхідної потужності лазера складає 1,26 Вт, для дальності 100 м значення необхідної потужності лазера 31,5 Вт).

У третьому розділі описаний новий метод для оперативного визначення частоти сигналу (бортового еталонного годинника робота). Метод заснований на теорії збігів імпульсних послідовностей пакетами, з виявленням «найкращих» збігів за допомогою застосування математичного апарату дробів Фарея або раціональних наближень невідомого значення медіантами.

Суть методу ілюструється рис. 7 при вимірюванні частоти: $S_x(t)$ – послідовність імпульсів, що підлягає вимірюванню; $S_0(t)$ – послідовність імпульсів еталонної частоти. Кінцевому інтервалу вимірювання T_{x0} відповідає повне співпадіння імпульсів послідовностей. Протягом часу вимірювання, як

видно, мають місце неповні часткові співпадіння імпульсів послідовностей, котрі не призводять до закінчення процесу вимірювання.

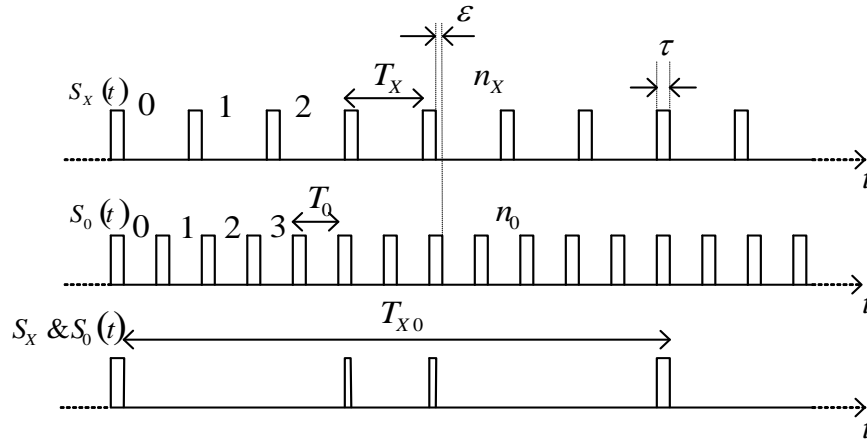


Рис. 7 – Принцип збігу імпульсів

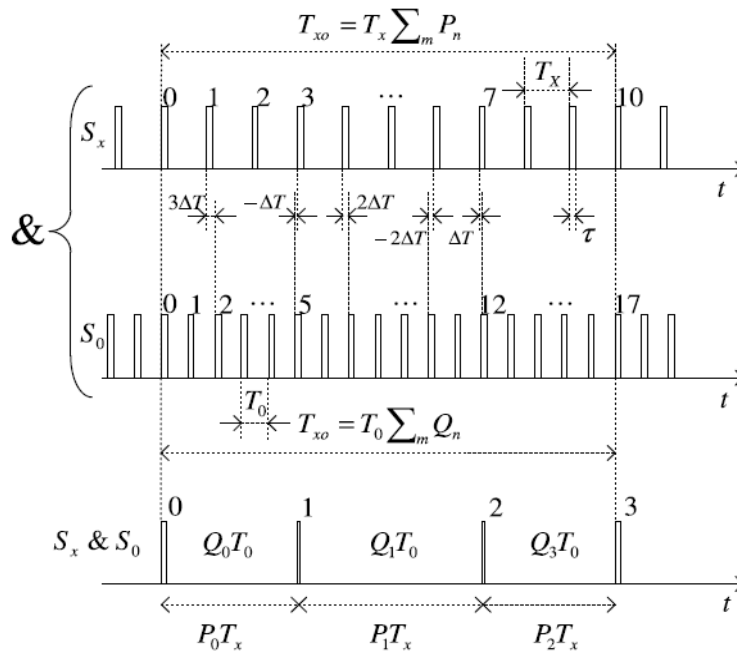


Рис. 8 – Геометрична схема збігу імпульсів

Збіг імпульсів відбувається коли виконується нерівність:

$$|n_x T_x - n_0 T_0| \leq \varepsilon, \tag{6}$$

де ε - припустима похибка (різницеве значення між інтервалами часу $n_0 T_0$ та $n_x T_x$ (рис. 7, 8). При найгіршому частковому збігу, коли імпульси перекриваються неповністю, максимальна похибка вимірювання сягає 2τ .

Лівий бік рівняння (6) показує, що наближення T_x/T_0 використовує раціональні числа $f_x = 1/T_x$ що дозволяє записати

$$\left| f_x - \frac{n_0}{n_x} f_0 \right| \leq \frac{\varepsilon f_x f_0}{n_0}. \tag{7}$$

В (7) f_x - гіпотетична дійсна оцінка невідомої частоти, а $f_0 n_0 / n_x$ - частота, отримана вимірюванням. Відносна похибка вимірювання

$$\beta = \left| f_x - \frac{n_0}{n_x} \right| / f_x \leq \frac{\varepsilon}{n_0 T_0}. \quad (8)$$

При повному збігу імпульсів (коли $\varepsilon=0$, рис. 8), у момент T_{X0}

$$|n_x T_x - n_0 T_0| = 0 \quad (9)$$

і кожен часовий інтервал $n_0 T_0$ і $n_x T_x$ дорівнює часу вимірювання T_{X0}

$$n_0 T_0 = P_n Q_n \Delta t_{n-1}, \quad (10)$$

$$n_x T_x = P_n Q_n \Delta t_{n-1}, \quad (11)$$

де Q_n і P_n показники лічильників еталонної та вимірюваної частот, які підраховують n_0 та n_x на n -му збігові; Δt_{n-1} - показчик відмінності двох цілочисельних інтервалів $n_0 T_0$ та $n_x T_x$, він має той же порядок величини, що і очікувана відносна похибка вимірювання β .

Доречно щоб припустима похибка в (6) була $\varepsilon = \Delta t_{n-1}$. У теорії чисел (в алгоритмі Евкліда, що застосовується для пошуку найбільшого спільного дільника) цей параметр Δt_{n-1} відомий як найбільший спільний дільник. За умови десятичного числення для обох періодів T_x і T_0 , $T_x < 1$ і $T_0 < 1$, вираз для найбільшого спільного дільника Δt_{n-1} має вигляд

$$\Delta t_{n-1} = (T_x, T_0) = \frac{1}{10^r} (A, 10^{r-s}), \quad (12)$$

де A , r , s - цілі числа та $r > s$, r є показником ступеня для очікуваного порядку величини β ; $r-s$ - різниця між відносною похибкою β і порядком величини періоду еталонної імпульсної послідовності.

Якщо числа A і 10^{r-s} в рівнянні (12) є взаємно простими, тоді $\Delta t_{n-1} = 10^{r-s}$ ($a=1$), а якщо вони не є взаємно простими, тоді $\Delta t_{n-1} = a/10^r$, де a - ціле число, та

$$Q_n = 10^{r-s} / a. \quad (13)$$

Оскільки коди підрахунку лічильниками імпульсів невідомої та відомої частот дорівнюють цілій кількості імпульсів, підрахованих на n -му збігові (рис.8), кількість періодів вимірюваної імпульсної послідовності складає

$$n_x = A \cdot 10^{r-s}. \quad (14)$$

Вираз (14) є числовою умовою, яка пропонується для зупинки процесу вимірювання. Критерій закінчення вимірювання формулюється так: найкраще наближення вимірюваної величини на даному відрізку часу вимірювання має місце в той момент, коли при реєстрації збігів імпульсів вимірюваної і еталонної імпульсної послідовностей лічильник числа імпульсів вимірюваної послідовності показує «ціле число з нулями».

Пошук найкращого наближення вимірюваної частоти проілюстрований рисунком 9.

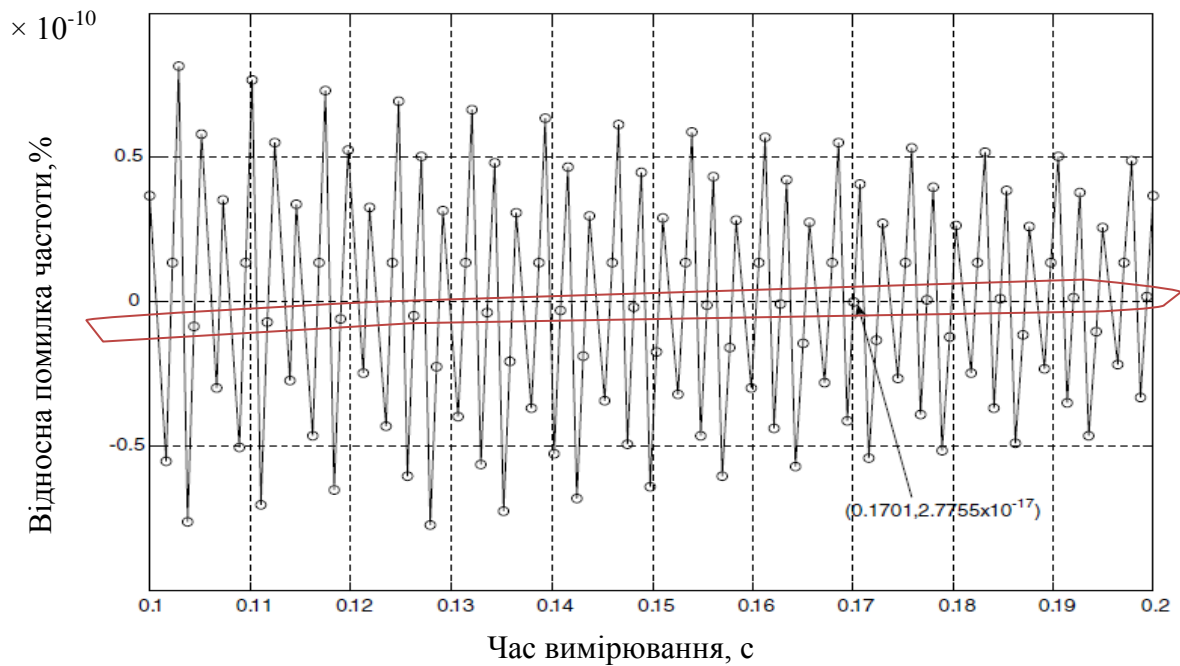


Рис.9 – Пошук найкращого наближення вимірюваної частоти з нульовою помилкою

Як видно з рис.9, кожне коло відповідає знайденій при збігу імпульсів апроксиманті частоти. Серед їх множини вочевидь визначається група конвергент (обведених на рисунку), які значно швидше ніж інші наближаються до нульової похибки. У тій з них, у якій через 0,1701 с виконується означений вище критерій, помилка дорівнює нулю.

Дослідження запропонованого метода вимірювання частоти виконувалось методом математичного комп'ютерного моделювання та експериментально (рис.10).

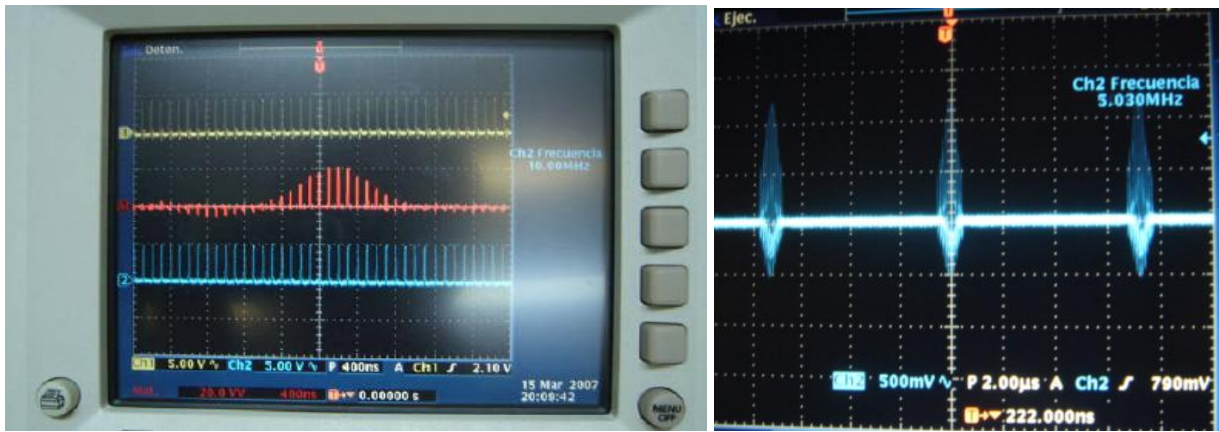


Рис.10 – Вид збігів імпульсів в експерименті (ліворуч).
Джиттер пакетів збігів (праворуч)

Результати досліджень показали, що даний метод досить швидко дозволяє реєструвати зміни поточного значення частоти.

Наведено аналіз впливу на точність даного методу випадкових фазових зсувів імпульсів сигналу (jitter). Як видно з рис.11. вплив на процес збігу різних комбінацій 4-х типових видів джиттеру (випадкові коливання (RJ), періодичні коливання (PJ), спотворення коефіцієнта заповнення (DCD), початкові залежні коливання (DDJ)) деформує вид конвергентних груп ідеального випадку, але місце найкращого збігу лишається незмінним для усіх випадків. Це свідчить про інваріантність пропонованого методу вимірювань до джиттеру.

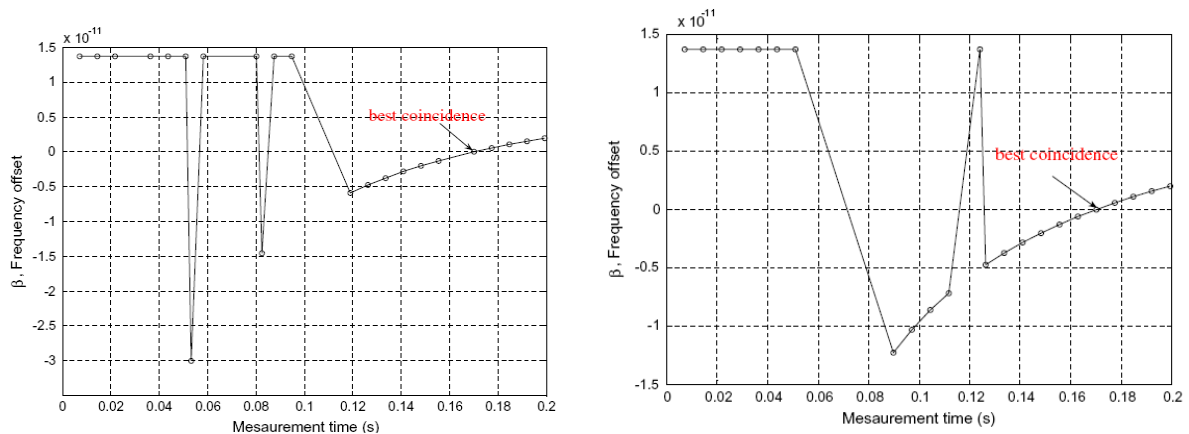


Рис.11 – Пошук найкращого наближення вимірюваної частоти з нульовою помилкою за наявності джиттеру

В четвертому розділі розглянуті методи обробки інформації у СТЗ, що дозволяють поліпшити роботу системи в цілому за показниками розрізняльної здатності, швидкодії і перешкодозахищеності.

Запропоновано метод розширення достовірної зони поля зору робота шляхом фільтрації грубих помилок результатів сканування і складання

цифрової карти видимої поверхні виявлених перешкод з використанням алгоритму Левенберга-Марквардта. Цей алгоритм реалізовано в цифровому фільтрі для обробки результатів вимірювань, який дозволяє підвищити точність первинних результатів сканування і відбракує аномальні похибки.

Проводився його порівняльний аналіз з іншими найбільш визнаними у світовій літературі методами, такими як методи Полак-Рібьєра і квазі-Ньютона, які використовуються по черзі на нейронній мережі з двома кроками навчання. Крок зворотного зв'язку в нейронній мережі обчислює помилку в спуску градієнта і поширює цей результат назад до кожного нейрона у вхідному шарі, а потім в прихований шар.

На другому кроці вагові коефіцієнти та відхилення повторно перераховуються, і вихід від активізованих нейронів передається вперед від прихованого шару до вихідного прошарку. Мережа була калібрована з випадковими вагами і відхиленнями, а потім навчалася, використовуючи всі три алгоритму, згадані вище. Навчальний пакет складався з 60 зразків даних, вибраних з 80 реальних результатів практичних вимірювань; кожен зразок взято за формою взаємної ратифікації.

Таким чином мережа навчалася передбачити абсолютну помилку вимірювань координат x , y , z для всіх умов відразу. Довжина навчальних даних становила 60 точок. Мережа містила 5 нейронів, 3 шари і навчалася до тих пір, поки прийнятний відсоток помилки не було досягнуто. Дані випробувань склалися з залишку в 20 зразків (результатів вимірювань координат x , y , z) від кожного випробування (рис.6).

Навчання (один за іншим для одного і того ж пакету $60 + 20 = 80$ даних) виконано відповідно до методів Полак-Рібьєра, квазі-Ньютона та Левенберга-Марквардта, щоб порівняти їх ефективність для даної задачі.

Результати порівняння наведені на рис. 12 і 13.

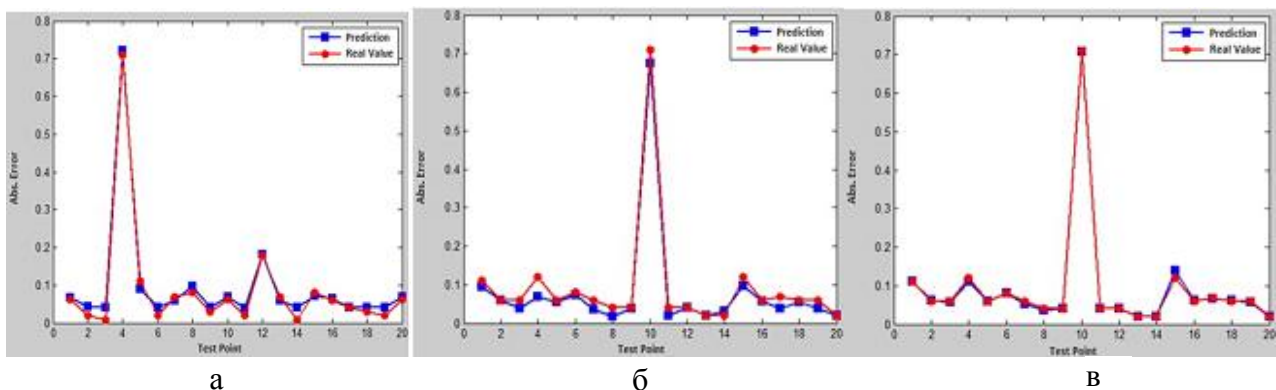


Рис. 12 – Передбачення помилки нейронною мережею, тренованою за методами: а) Полак-Рібьєра, б) квазі-Ньютона, в) Левенберг-Марквардта, для кожної тестової точки сканера в порівнянні з її реальною помилкою

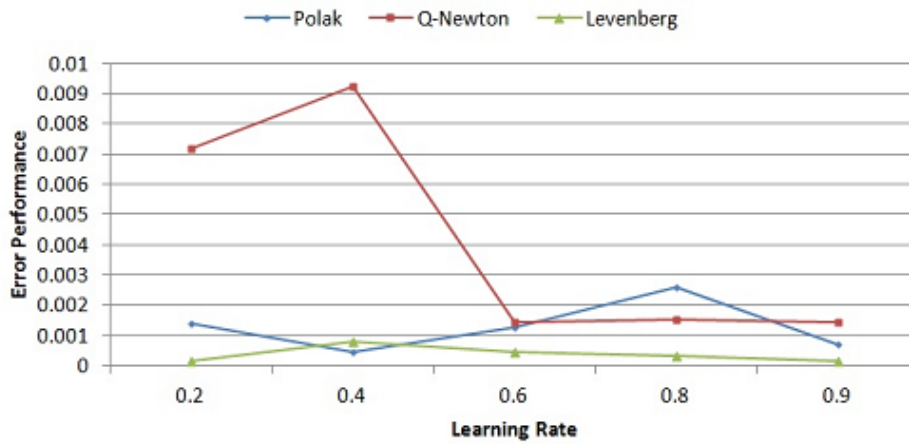


Рис. 13 – Порівняння помилки передбачення трьох методів при різних показниках коефіцієнта навчання

Запропоновано метод функціонування лазерного сканеру СТЗ зі змінним кроком сканування, який дозволяє скоротити час пошуку перешкоди і цифрового опису її небезпечного краю. Для визначення оптимальних значень кутів кроку сканування розроблено математичну модель поля зору робота, яка включає 1067 сценаріїв: використовуються перешкоди з різними формами, розмірами та кількістю, а також різноманітним їх розташуванням у секторах ПЗ та варіантами угруповання. Оцінка ефективності сканування виконувалась за параметром $Z = P/t$, де P – кількість точок, виявлених на перешкоді; t - час на сканування.

Для усіх сценаріїв моделі побудовано графіки інформативності, наведені на рис. 14. Шляхом попарного порівняння та виключення гірших визначено три найбільш інформативних кути кроку сканування: малий, середній та великий (вказані на графіку рисунку 15). Як вказують результати моделювання, комбінуючи кути кроків сканування, можливо значно прискорити пошук перешкод у ПЗ робота.

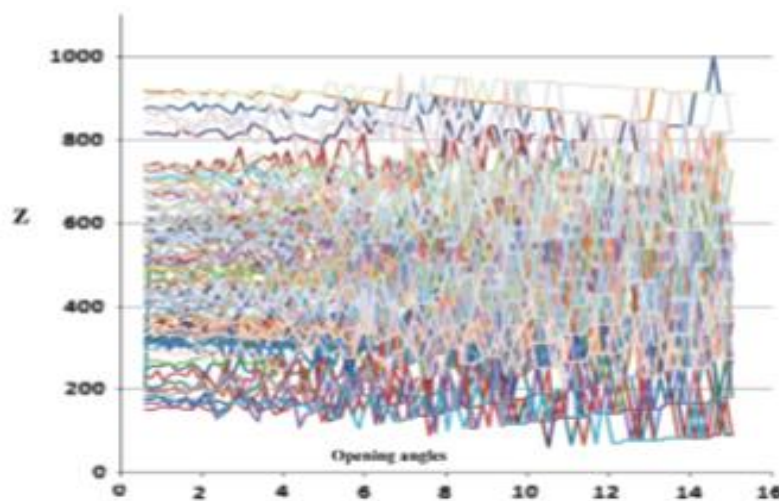


Рис. 14 – Порівняння інформативності СТЗ для різних кутів кроку сканування

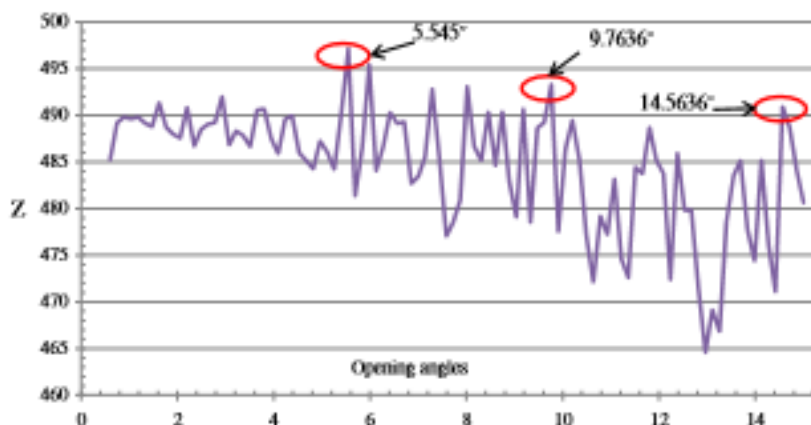


Рис. 15 – Обрання найінформативніших кутів кроку сканування СТЗ

Запропоновано алгоритми фільтрації корисного сигналу у підсистемі акселерометричного визначення власної просторової орієнтації робота, та корисного сигналу фотоприймача, на який мають вплив шуми внаслідок механічних вібрацій у скануючій апертурі. Шляхом порівняльного аналізу різних типів відомих з літератури фільтрів, рекомендовано к використанню LMS-фільтр, який забезпечує найкращі показники. Результати фізичного моделювання показали, що використання фільтру суттєво підвищує якість визначення власної просторової орієнтації робота (до $0,2^\circ$ по кожній з координат).

У п'ятому розділі показано використання результатів, отриманих в розділах 2-4, для визначення траєкторії руху МР і його автономної навігації.

Стан робота описується матричною математичною моделлю, яка використовує дані, надходячи від СТЗ, позиціонуючих акселерометрів і бортового годинника.

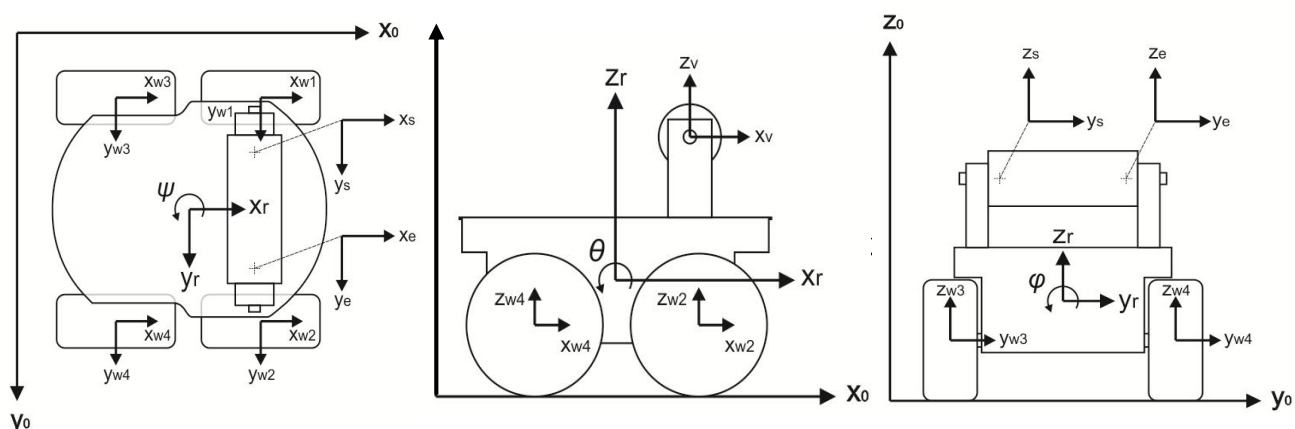


Рис. 16 – Прив'язка систем координат мобільного робота

Наступні рівняння визначені для управління станом і орієнтацією мобільного робота в тривимірному просторі (рис.16) щодо фіксованої базової системи координат

$${}^0T_r = \text{Trans}(x, y, z) \times \text{RPY}(\varphi, \theta, \psi), \quad (27)$$

$${}^0T_r = \text{Trans}(x, y, z) \times \text{Rot}(\vec{a}, \varphi) \times \text{Rot}(\vec{o}, \theta) \times \text{Rot}(\vec{n}, \psi), \quad (28)$$

$${}^0T_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c\varphi & -s\varphi & 0 & 0 \\ s\varphi & c\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi & 0 \\ 0 & s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$${}^0T_r = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & x \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & y \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

де перші три стовпця в рівнянні (30) є одиничними векторами для орієнтації мобільних вісей робота ($\vec{a}, \vec{o}, \vec{n}$); останній стовбець є вектором положення центру мас робота у декартових координатах (x, y, z); 0T_r це перетворення матриці з системи координат r (зв'язаної з роботом) до системи координат 0 (базової системи координат); $c\varphi$ и $s\varphi$ – позначення функцій $\cos\varphi$ і $\sin\varphi$ (аналогічні позначення використовуються для функцій кутів θ і ψ).

Послідовність кутів КТР (RPY) визначає власну просторову орієнтацію робота: φ - поворот навколо вісі \vec{a} робота (крін К); θ - поворот навколо вісі \vec{o} робота (тангаж Т); ψ - поворот навколо вісі \vec{n} (рискання Р).

Вважаючи бажані положення та орієнтацію у декартових координатах і кути КТР відомими, з прямої кінематичної моделі

$${}^0T_r = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & px \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & py \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & a \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & b \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

знаходиться зворотня кінематична модель при прирощенні координат px, py, pz у процесі руху роботу:

$$\varphi = \text{ATAN2}(r_{21}, r_{11}), \quad (33)$$

$$\theta = \text{ATAN2}(-r_{31}, r_{11}c\phi + r_{21}s\phi), \quad (34)$$

$$\psi = \text{ATAN2}(-r_{23}c\phi + r_{13}s\phi, r_{22}c\phi - r_{12}s\phi), \quad (35)$$

де φ , θ , ψ – невідомі КТР кути. Зворотня кінематична модель мобільного робота використовуються для керування положенням МР і надає можливість визначати значення кожного кута для того, щоб придати мобільному роботу бажане положення і орієнтацію.

Розроблено метод визначення траєкторії руху МР в заданому секторі простору за критерієм мінімального шляху і максимальної гладкості траєкторії (зведення до мінімуму впливів рульовим механізмом). Перший підхід полягав у використанні мінімальної кількості точок, необхідних для формування кривої. На рис.17а показана крива, яка отримана по трьох точках; вона успішно обминає перешкоди і досягає мети, але пройдена відстань по дузі має занадто довжину (рис. 17а).

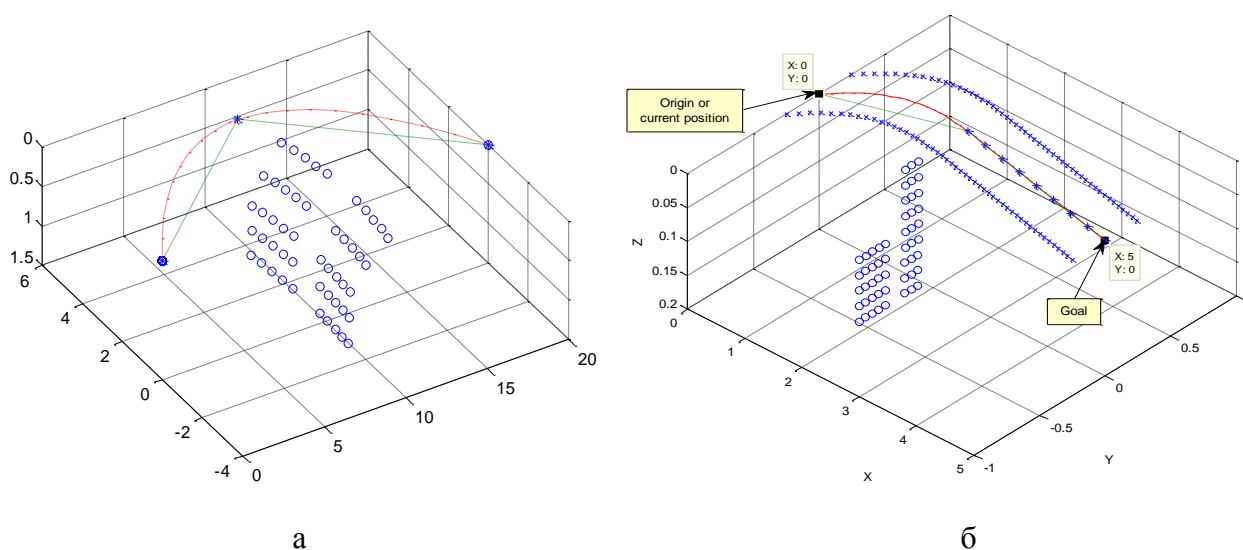


Рис. 17 – Моделювання траєкторії мобільного робота в Matlab з використанням: а) 3 точок (масштаб у метрах); б) 10 точок (масштаб у метрах)

Інший підхід використовує більше число точок для побудови траєкторії і формування кривої. Результати моделювання, при якому для побудови траєкторії використовувалось 10 точок, показані на рис. 17 б. Як бачимо, крива не тільки обходить перешкоди і досягає мети, але і скорочує довжину шляху на 12-15%, при тому що час, витрачений на обчислення, збільшився всього на 1,2 мс. Цей компроміс дозволяє істотно заощадити ресурси робота, а час роботи системи керування збільшується незначно.



Рис. 18 – Модель дослідницького робота Pioneer 3-AT

Результати досліджень показали, що для безпечного обминання перешкод по найкоротшому шляху з максимальною гладкістю (що забезпечує мінімальну енерговитратність рульового управління і мінімальний знос його механізму при будь-якій схемі реалізації) збільшення кількості точок для побудови бажаної траєкторії не є доцільним: подальший зріст часу на обчислювання траєкторії не призводить до енергетичних переваг.

При проведенні фізичних експериментів дисертаційної роботи використовувалися техніко-геометричні характеристики моделі дослідницького робота Pioneer 3-AT (рис. 18).

ВИСНОВКИ

Дисертація містить теоретичне узагальнення і вирішення актуальної науково - прикладної проблеми створення науково-методичного апарату для комплексного вирішення теоретичних і практичних завдань, пов'язаних з автономною навігацією МР, зокрема, теорії та методів машинного зору для можливості бачити сектор перед МР; методу перевірки стабільності частоти бортового годинника МР; методів визначення власної орієнтації МР для ефективного функціонування роботу у недетермінованих середовищах за умов наявності факторів, що заважають нормальному функціонуванню МР. Запропоноване в дисертації вирішення науково - прикладної проблеми сприяє підвищенню живучості робота у недетермінованих неконтрастних середовищах при наявності радіації та інших видів заважаючих факторів шляхом використання технічних електронних, електричних, механічних та обчислювальних засобів, стійких до впливу зовнішніх факторів, і раціональному спрощенні систем прийому та обробки оптичних сигналів та обчислювальних алгоритмів.

Основні отримані результати роботи полягають в наступному:

1. Розвинена теорія автономної навігації мобільних наземних роботів в недетермінованих середовищах на основі комплексного використання в єдиній матриці стану роботу інформації про оточуюче робота середовище, власну просторову орієнтацію та часову шкалу.

2. Запропоновано новий метод лазерного зондування простору навколо робота - метод динамічної тріангуляції, що надає можливість збільшити до прийнятної зону сканування простору перед роботом, у якій визначення та локалізація об'єктів набуває детермінованого характеру. Метод дозволяє створювати цифрову карту перешкод, яка спрощує прокладення його траєкторії. Вона надає можливість у зручній для швидких перетворень декартовій системі координат визначати небезпечні краї перешкод, ранжувати їх ступінь небезпечності за відстанню до них, без додаткових перетворень розташовувати усі об'єкти у єдиній глобальній системі координат, чим значно скорочується час керування та виключається можливість похибок при перетворенні. Створена цифрова карта може бути корисною для навігації групи роботів і для описання і картографування невідомих просторів вперше пройдених роботом.

Вказано, що поле зору тріангуляційної СТЗ має три зони, кожна з яких характеризується визначеними показниками точності вимірювання координат об'єктів: достовірні (відносна помилка вимірювань $\delta \leq 1\%$), прийнятні ($\delta \leq 5\%$) та периферійні ($\delta > 5\%$).

3. Розроблено новий метод вимірювання часових інтервалів та частоти сигналів - метод раціональної апроксимації наближенням медіантами, який засновано на збігу деякої цілої кількості інтервалів вимірювання з цілою кількістю еталонних інтервалів без залишку. Метод надає можливість швидко реєструвати всі зміни частоти, які трапилися у бортовому еталоні робота протягом певного часу, і забезпечує такі переваги: уточнення результатів вимірювань сканера (точності підрахування кутів динамічної тріангуляції); зменшення накопичування помилок у визначенні усіх параметрів МР, що сумуються протягом перебування МР на траєкторії руху; уточнення показань усіх бортових сенсорів частотного типу.

4. Запропоновано новий критерій оцінки співпадання (збігу) без залишку деякої цілої кількості еталонних інтервалів з цілою кількістю вимірюваних часових інтервалів на основі використання медіанти з чисельником у форматі «ціле число з деякою кількістю нулів». Він дозволяє у достатньо простий спосіб на апаратно-технічному або програмному рівнях реалізовувати вимірювання частоти.

5. Доведено, що запропонований новий метод вимірювання часових інтервалів та частоти сигналів є інваріантним до джиттеру та нестабільності тривалості імпульсів імпульсних послідовностей.

6. Запропоновано метод оцінювання енергетичного центру імпульсного сигналу - метод насичення та диференціювання, який дозволяє в умовах обмеженого часу з достатньою точністю визначати просторове положення енергетичного центру підсвіченого лазерного п'ятна на поверхні

перешкоди, та забезпечує значні переваги розрізняльної здатності на краю сектору огляду СТЗ.

7. Удосконалено метод функціонування лазерного сканера СТЗ зі змінним кроком сканування, який дозволяє оптимізувати пошук перешкоди в полі зору робота за критеріями мінімальних витрат часу на сканування та максимальної інформативності. Можливість застосування змінного кроку сканування робить запропоновану СТЗ адаптивним інструментом збору інформації, який простою зміною команд у керівній програмі оптимізує роботу сканера, пристосовуючи його згідно поточних умов до більш детального огляду, або до максимально швидкого визначення перешкод.

8. Запропоновано метод розширення достовірної зони поля зору робота шляхом застосування методів тренування нейронних мереж для фільтрації результатів сканування з великими похибками на основі використання алгоритму Левенберга-Марквардта, який дозволяє в реальному масштабі часу підвищити розрізняльну здатність СТЗ. Метод придушення вимірального шуму в акселерометрах на базі алгоритму LMS-фільтрації надає можливість значного покращення у визначенні параметрів поточної власної просторової орієнтації МР.

9. Запропоновано метод визначення оптимальної траєкторії руху МР в заданому секторі простору за критерієм мінімального шляху і максимальної гладкості траєкторії, якій ґрунтується на використанні даних, отриманих від запропонованої СТЗ, а також даних від системи акселерометричного визначення власної просторової орієнтації МР і бортового годиннику робота. Його застосування зводить до мінімуму кількість впливів рульовим механізмом, внаслідок чого скорочуються енергетичні витрати МР та знос його механічних частин, а також покращується курсова стійкість та зменшується можливість заносів та прослизань.

СПИСОК НАЙВАЖЛИВІШИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Oleg Sergiyenko. Optoelectronic Devices and Properties/ Edited by Oleg Sergiyenko, - Editorial: IN-TECH, Vienna, Austria, 2011. - 660 p.

2. Oleg Sergiyenko. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / Edited by Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez. Editorial: IGI Global, Hershey, Pennsylvania, USA. August, 2016. - 341 p.

3. Rivas-Lopez M. Structural Health Monitoring - Measurement Methods and Practical Applications / Edited by Moises Rivas-Lopez, Wendy Flores-Fuentes, and Oleg Sergiyenko, Editorial: IN-TECH, 21 June 2017. - 138 p.

4. Oleg Sergiyenko. Methods to Improve resolution of 3D Laser Scanning / Authors: Oleg Sergiyenko, Wendy Flores-Fuentes, and Vera Tyrsa, Editorial: LAP LAMBERT Academic Publishing, 31/ 07/ 2017. - 132 p.

5. Сергиенко О.Ю. Оптоэлектронная система для навигации мобильного робота / О.Ю. Сергиенко // Автометрия. – 2010. - № 46 (5). – С. 18 – 36.

6.Сергиенко О.Ю. Оценка ускорения автомобиля при эксплуатационных испытаниях с использованием оптимального наблюдателя / О.Ю. Сергиенко // Вестник ХНАДУ. – 2011. - Вып. 55. - С. 58-65.

7.Сергиенко О.Ю. Повышение разрешающей способности метода динамической триангуляции в 3D сканерах для задачи навигации робота / О.Ю. Сергиенко // Автомобильный транспорт. – 2011. - Вып. 28. - С.141-148.

8.Сергиенко О.Ю. Система технического зрения для навигации мобильных транспортных средств/ О.Ю. Сергиенко // Автомобильный транспорт. – 2012. - Вып. 30. - С. 75-83.

9.Сергиенко О.Ю. Применение лазера для навигации мобильного транспортного средства. / О.Ю. Сергиенко, В.В. Тырса, В.Н. Кондратенко // Автомобильный транспорт. – 1998. - Вып. 1. - С. 86-91.

10. Сергиенко О.Ю. Фазово-импульсный лазерный дальномер / О.Ю. Сергиенко, В.В. Тырса. // «Вестник ХГАДТУ». – 2000. - Вып. 27. - С. 20-24.

11. Сергиенко О.Ю. Метод измерения частоты для задач мехатроники / О.Ю. Сергиенко // Вестник ХНАДУ. – 2011. - Вып. 53. - С. 122-129.

12. Sergiyenko O.Yu. Optoelectronic System for Mobile Robot Navigation. Springer // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2010. - Vol. 46, N. 5. - P.414-428

13. Sergiyenko O. Signal frequency measurement by rational approximations / D. Hernandez Balbuena, V. Tyrsa, L. Burtseva, M. Rivas Lopez // Measurement, Elsevier, vol. 42, no. 1, 2009, P. 136–144.

14. Básaca-Preciado L. C. Optical 3D Laser Measurement System for Navigation of Autonomous Mobile Robot / Luis C. Básaca-Preciado, Oleg Yu. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quinonez, X. García, V. V. Tyrsa, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, P. Mercorelli, M. Podrygalo, A. Gurko, I. Tabakova, O. Starostenko // Optics and Lasers in Engineering, Elsevier, 2014, № 54, P. 159–169.

15. Murrieta-Rico F.N. Pulse width influence in fast frequency measurements using rational approximations. / F.N. Murrieta-Rico, O.Y. Sergiyenko, V. Petranovskii, D. Hernandez-Balbuena, L. Lindner, V. Tyrsa, M. Rivas-Lopez, J.I. Nieto-Hipolito, V.M. Karthashov // Measurement, Elsevier, № 86, 2016, pp. 67-78.

16. Flores-Fuentes W. Combined Application of Power Spectrum Centroid and Support Vector Machines for Measurement Improvement in Optical Scanning Systems. / W. Flores-Fuentes, M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, Rivera-Castillo, D. Hernandez-Balbuena. // Signal Processing, Elsevier, 2014, № 98, pp. 37–51.

17. Sergiyenko O. Optoelectronic method for structural health monitoring. / M. Rivas López, V. Tyrsa, W. Hernandez Perdomo, D. Hernández Balbuena, L. Devia Cruz, L. Burtseva, J.I. Nieto Hipólito // SAGE Publications, “International Journal of Structural Health Monitoring”, Vol.9, No.2, March, 2010, pp. 105-120.

18. Rodriguez-Quiñonez J.C. Improve 3D Laser scanner measurements accuracy using a FFBP neural network with Widrow-Hoff weight/bias learning function. / J.C. Rodriguez-Quiñonez, O. Sergiyenko, D. Hernandez-Balbuena, Rivas-Lopez, M., W. Flores-Fuentes, L. C. Basaca Preciado. // Opto-Electronic Review, Springer, 2014, № 22(4), pp. 224-235.

- 19.** Garcia-Cruz X.M. Optimization of 3D laser scanning speed by use of combined variable step. / X.M. Garcia-Cruz, O. Yu. Sergiyenko, V. Tyrsa, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, J.C. Rodriguez-Quiñonez, L.C. Basaca-Preciado, P. Mercorelli. // *Optics and Lasers in Engineering* by Elsevier, 2014, №54, pp. 141–151.
- 20.** Flores-Fuentes W. Energy Centre Detection in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement. / W. Flores-Fuentes, Rivas-Lopez, M.; Sergiyenko, O.; Rodriguez-Quiñonez, J.; Hernandez-Balbuena, D.; Rivera-Castillo, J. // *IEEE Sensors Journal*, 2014, № 14(7), pp. 2355-2361.
- 21.** Cañas N. Controladores multivariables para un vehiculo autonomo terrestre: Comparación basada en la fiabilidad de software / Norberto Cañas, Wilmar Hernández, Gabriel González, Oleg Sergiyenko // *RIAI-Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Elsevier Doyma, 2014, № 11(2), pp. 179-190.
- 22.** Rodríguez-Quiñones J.C. Optical Monitoring of Scoliosis by 3D Medical Laser Scanner. / Julio C. Rodríguez-Quiñones, Oleg Sergiyenko, Luis C. Basaca Preciado, Vera V. Tyrsa, Alexander G. Gurko, Mikhail A. Podrygalo, Moises Rivas Lopez, Daniel Hernandez Balbuena // *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, 2014, № 54, pp. 175–186.
- 23.** Lindner L. Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application / L. Lindner, O. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quiñonez, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, W. Flores-Fuentes, F. Natanael Murrieta-Rico , V. Tyrsa // *Industrial Robot: An International Journal*, Emerald, Vol. 43 Issue: 4, 2016, pp. 360 – 369.
- 24.** Sergiyenko O. Improving the response of accelerometers for automotive applications by using LMS adaptive filters / O.Sergiyenko, W. Hernandez, E. Vicente, J. Fernández // *Sensors*. MDPI, Switzerland – 2010. –N. 10. P. 313–329.
- 25.** W. Hernandez Improving the Response of Accelerometers for Automotive Applications by Using LMS Adaptive Filters: Part II. / J. de Vicente, O. Sergiyenko, and E. Fernández// *MDPI, Sensors*, 2010, 10(1), Basel, Switzerland, P. 952-962.
- 26.** Sergiyenko O. Automotive FDS resolution improvement by using the principle of rational approximation / D.Hernandez-Balbuena, V.Tyrsa et al // *IEEE Sensors Journal*. – 2012. - Vol.12, Issue 5. - P. 1112 - 1121.
- 27.** Sergiyenko O. Remote Sensor for Spatial Measurements by Using Optical Scanning. / W. Hernandez, V. Tyrsa, L. Devia Cruz, O. Starostenko, M.Pena-Cabrera // *MDPI, Sensors*, Basel, Switzerland. – 2009. -№ 9(7). – P. 5477-5492.
- 28.** O. Sergiyenko Analysis of jitter influence in fast frequency measurements. / D. Hernandez Balbuena, V. Tyrsa, P.L.A. Rosas Méndez, M. Rivas Lopez, W. Hernandez, M. Podrygalo, A. Gurko // Elsevier, “Measurement”, Volume 44, Issue 7, August 2011, P. 1229-1242.
- 29.** J.C. Rodríguez-Quiñones Surface recognition improvement in 3D medical laser scanner using Levenberg–Marquardt method/ O. Sergiyenko, F. González-Navarro, L. Basaca-Preciado, V. Tyrsa // *Signal Processing* by Elsevier, Vol. 93, issue 2, February 2013, P. 378–386.

30. Murrieta-Rico F.N. Frequency domain sensors and Frequency measurement techniques /Petranovskii, V.; Sergiyenko O.; Hernandez-Balbuena, D.; Pestryakov, A.; and Tyrsa, V.// Trans Tech Publications, Switzerland. Applied Mechanics and Materials, Vol.756, 2015. P.575-584.

31. O. Sergiyenko The mediant-method for fast mass/concentration detection for nanotechnologies. / O. Sergiyenko// Inderscience, International Journal of Nanotechnology, Vol. 13, No. 1-3, 2016, P. 236-246.

32. Murrieta-Rico F.N. Pulse width influence in fast frequency measurements using rational approximations. /Sergiyenko O.; Petranovskii, V.; Hernandez-Balbuena, D.; L. Lindner; V. Tyrsa; M. Rivas-Lopez; J. Nieto-Hipolito; and V.M.Karthashov // Elsevier, "Measurement", Volume 86, May 2016, P. 67-78.

33. Sergiyenko O.Yu. Data transferring model determination in robotic group/ M.V. Ivanov, V.V. Tyrsa, V.M. Kartashov, M. Rivas-López, D. Hernández-Balbuena, W. Flores-Fuentes, J.C. Rodríguez-Quiñonez, J.I. Nieto- Hipólito, W. Hernandez, A. Tchernykh// Robotics and Autonomous Systems by Elsevier, vol. 83, September 2016, P. 251-260.

34. Wendy Flores-Fuentes. Multivariate Outlier Mining and Regression Feedback for 3D Measurement Improvement in Opto-Mechanical System/ O. Sergiyenko, F. Gonzalez-Navarro, M. Rivas-Lopez, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernandez-Balbuena, V. Tyrsa and L. Lindner//Optical and Quantum Electronics by Springer, vol.48, N8, August 2016, P. 1-21.

35. W. Flores-Fuentes. Optoelectronic instrumentation enhancement using data mining feedback for a 3D measurement system. / O. Sergiyenko, F. Gonzalez-Navarro, M. Rivas-López, D. Hernandez-Balbuena, J. C. Rodríguez-Quiñonez, V. Tyrsa, L. Lindner// Optical Review (a publication of the Optical Society of Japan), Springer, August, 2016, P.1-6.

36. W. Flores-Fuentes. Optoelectronic scanning system upgrade by energy center localization methods / O. Sergiyenko, J.C. Rodríguez-Quiñonez, M. Rivas-López, D. Hernández-Balbuena, L.C. Básaca-Preciado, L. Lindner, F.F. González-Navarro. // Springer /Allerton Press, Inc., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Volume 52, Issue 6, 1 November 2016, P.592-600.

37. J. Rivera-Castillo Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection/ W. Flores-Fuentes, M. Rivas-López, O. Sergiyenko, F. Gonzalez-Navarro, J. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernández-Balbuena, L. Lindner, L. Básaca-Preciado// Structural Control and Health Monitoring, Wiley&Sons, December 2016, P.1-17.

38. W. Hernández. Bootstrap-based frequency estimation method/ C. Calderón-Córdova, V. González-Posada, Á. Parra-Cerrada, J. L. Jiménez, J. E. González-García, J.G. Zato, O. Yu. Sergiyenko//Measurement by Elsevier, Volume 95, January 2017, P. 193–200.

39. Murrieta-Rico F.N. A new approach for frequency shifts measurement using the principle of rational approximations / Sergiyenko O.; Petranovskii, V.; Hernandez-Balbuena, D.; L. Lindner// Metrology and Measurement Systems, journal of Polish Academy of sciences, De Gruyter, vol.24, issue 1, March 2017, P.45-56.

40. J.C. Rodríguez-Quiñonez Improve a 3D distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods' approach/ O. Sergiyenko, W. Flores-Fuentes, M. Rivas-lopez, D. Hernandez-Balbuena, R. Rascón, P. Mercorelli// *Opto-Electronics Review* by Elsevier, Volume 25, Issue 1, May 2017, P. 24–32.

41. L. Lindner. Exact laser beam positioning for measurement of vegetation vitality / O. Sergiyenko, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, W. Flores-Fuentes, J.C. Rodríguez-Quiñonez, F.N. Murrieta-Rico, M. Ivanov, V. Tyrsa, L. C. Basaca// *Industrial Robot: An International Journal*, by Emerald, Vol. 44 Issue: 4, 2017, doi: 10.1108/IR-11-2016-0297.

42. Computer vision. Chapter 22. Machine vision: approaches and limitations / [M. Rivas Lopez, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa]. - Editorial: IN-TECH, Vienna, Austria, 2008. - pp. 395-428.

43. Optoelectronic Devices and Properties. Chapter 15. 3D Body & Medical Scanners' Technologies: Methodology and Spatial discriminations / [Julio Cesar Rodriguez Quinonez, Oleg Sergiyenko, Vira Tyrsa et al.]; edited by Oleg Sergiyenko. - Editorial: IN-TECH, Vienna, Austria, 2011. - p. 307-322.

44. Optoelectronic Devices and Properties. Chapter 25. Electromechanical 3D optoelectronic scanners: resolution constraints and possible ways of its improvement / [Sergiyenko Oleg, Vira Tyrsa, Luis Carlos Basaca Preciado, et al.]; edited by Oleg Sergiyenko. - Editorial: IN-TECH, Vienna, Austria, 2011. - p. 549-582.

45. Sergiyenko O. Fast Method for Frequency Measurement by Rational Approximations with Application in Mechatronics / [O. Sergiyenko, D. Hernandez-Balbuena, P.L.A. Rosas-Méndez, V. Tyrsa and M. Rivas-Lopez] // *Modern Metrology Concerns*. Edited by Luigi Cocco – InTech, 2012. – P. 201-220.

46. Rivas M. A Method and Electronic Device to Detect the Optoelectronic Scanning Signal Energy Centre. / M. Rivas, W. Flores, J. Rivera, O. Sergiyenko, D. Hernández-Balbuena and A. Sánchez-Bueno // in book "Optoelectronics - Advanced Materials and Devices" Edited by Sergei L. Pyshkin and John M. Ballato, IN-TECH, 2013, pp. 391-419.

47. Sergiyenko O. Possible practical applications of precise optical scanning./ O. Sergiyenko, M. Rivas López, I. Rendón López, V. Tyrsa, L. Burtseva, D. Hernández Balbuena// *Proceedings of "CARS & FOF 07 23rd ISPE International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future"*, Bogota. Colombia. - 2007. - P. 440-444.

48. Rivas M. Spatial data acquisition by laser scanning for robot or shm task / M. Rivas López, O.Sergiyenko, V. Tyrsa, M.Aguire, I. Rendón López, L. Devia Cruz // *IEEE-IES Proceedings "International Symposium on Industrial Electronics"*(ISIE-2008), Cambridge, United Kingdom, 2008, P. 1458–1463.

49. Sergiyenko O. Precise Optical Scanning for practical multiapplications / O.Sergiyenko, V. Tyrsa, D. Hernandez-Balbuena, M. Rivas López, I. Rendón López, L. Devia Cruz // *Proceedings of IEEE-34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON'08)*, 10-13 November, 2008, Orlando, Florida, USA. – 2008. – P. 1656-1661.

50. Sergiyenko O., D.Hernandez Balbuena, V. Tyrsa, L. Burtseva. Frequency measurement method for Mechatronic and Telecommunication applications. IEEE-IES Proceedings “International Symposium on Industrial Electronics”(ISIE-2008), Cambridge, United Kingdom, 30 june -2 july of 2008, p.1452-1458.

51. Sergiyenko O. Method for fast and accurate frequency measurement / Oleg Sergiyenko, Daniel Hernandez Balbuena, Vera Tyrsa, Larisa Burtseva // Proceedings of 16th IMEKO TC₄ Symposium “Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements”, Florence, Italy. - 2008. - P. 367-373.

52. Sergiyenko O.Yu. Precise Optical Scanning for multiuse / W. Hernandez, V.V. Tyrsa, D. Hernández-Balbuena // Proceedings of IEEE-35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON’09), 3-5 November, 2009, Porto, Portugal. – 2009. - P. 3399-3404.

53. Sergiyenko O. CBIR for Image-Based Language Learning within Mobile Environment / O. Starostenko, R. Contreras Gómez, V. Alarcon-Aquino // Proceedings of IEEE 52nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (52MWSCAS09), Cancun, Mexico. – 2009. - P. 734-738.

54. Sergiyenko O. Y. Dynamic Laser Scanning method for Mobile Robot Navigation. / V. Tyrsa, L.F. Devia, W. Hernandez, O. Starostenko, M. Rivas Lopez // Proceedings of ICCAS-SICE 2009, ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka, Japan, August 18-21, 2009, P. 4884-4889.

55. Sergiyenko O. Estimation of the acceleration of a car under performance tests by using an optimal observer / O. Sergiyenko, W. Hernández, Jesús de Vicente, V.Tyrsa // Proceedings of IEEE-36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2010), Glendale-Phoenix, Arizona, USA. – 2010. - pp. 2828-2832.

56. Sergiyenko O. Resolution improvement of Dynamic Triangulation method for 3D Vision System in Robot Navigation task / Sergiyenko Oleg, Luis C. Básaca, Julio C. Rodríguez, Vera V. Tyrsa, Wilmar Hernández, Juan I. Nieto Hipólito, Oleg Starostenko.// Proceedings of IEEE-36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2010), Glendale-Phoenix, Arizona, USA, 7-10 November, 2010, pp. 2880-2885.

57. Sergiyenko O. Improving the Performance of an Accelerometer by Using a BLMS Adaptive Filter / W. Hernandez, J. de Vicente, E. Fernández// Proceedings of 2010 First International Conference on Sensor Devices, Technologies and Applications, July 18-July 25, 2010, Venice, Italy, pp.221-225.

58. Sergiyenko O.Yu. Optimization of laser TVS for robot navigation using combined scanning with variable step / O.Yu. Sergiyenko, X.M. Garcia Cruz, D. Balbuena, M. Rivas Lopez et al // Proceedings of IEEE-22nd Autumn Conference (ROC&C-2011), Acapulco, Mexico. – 2011. - 6p. (CD ROM).

59. Basaca-Preciado, L.C. Optoelectronic 3D laser scanning technical vision system based on dynamic triangulation. / Basaca-Preciado, L.C., Sergiyenko, O.Y.,

Rodriguez-Quinonez, J.C., Rivas-Lopez, M. // 2012 IEEE Photonics Conference (IPC 2012), San Francisco, USA, September, 23-27, 2012, pp.648-649.

60. Sergiyenko O. Robust Control of Excavation Mobile Robot with Dynamic Triangulation Vision / O. Sergiyenko, A. Gurko, W. Hernandez, V. Tyrsa, J. I. Nieto Hipólito, D. Hernandez Balbuena and P. Mercorelli. // Proceedings of the 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO-2012), Rome, Italy, 28 - 31 July, 2012. – 2012. - Volume 2. - P. 481-485.

61. Flores-Fuentes W. Analog Signal Processing in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement. / W. Flores-Fuentes, M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, Rivera-Castillo, D. Hernandez-Balbuena. // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2013), San Francisco, USA, 23-25 October, 2013, Vol I, P. 655-661.

62. Rodriguez-Quinonez, J.C. Analysis of laser light reflectance on the human skin for optoelectronic devices. / Rodriguez-Quinonez, J.C., Sergiyenko, O., Basaca-Preciado, L.C., Rivas-Lopez, M. // 2012 IEEE Photonics Conference (IPC 2012), San Francisco, USA, September, 23-27, 2012, P.80-81.

63. Basaca-Preciado L.C. Accuracy Improvement of Vision System for Mobile Robot Navigation by Finding the Energetic Center of Laser Signal. / Luis C. Basaca-Preciado, Julio C. Rodriguez-Quinonez, Oleg Segiyenko, Wendy Flores-Fuentes, Paolo Mercorelli, Fabian N. Murrieta-Rico. // Proceedings of 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2014), Dallas, Texas, USA, October, 29 - November, 1, 2014, P. 2406-2411.

64. Murrieta-Rico, F.N. Acceleration measurement improvement by application of novel frequency measurement technique for FDS based INS. / Murrieta-Rico, F.N.; Hernandez-Balbuena, D.; Petranovskii, V.; Nieto Hipolito, J.I.; Pestryakov, A.; Sergiyenko, Oleg ; Molina, M. ; Tyrsa, V. // Proceedings of IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, June, 1-4, 2014. P. 1920 – 1925.

65. Flores-Fuentes, W. Outlier Mining of a Vision Sensing Database for SVM Regression Improvement. / Flores-Fuentes, W.; Hernandez-Balbuena, D.; Rodriguez-Quinonez, J.C.; Daniel Olivas-Ugalde; Félix F. González-Navarro; Sergiyenko, Oleg; Rivas-Lopez, M.; Murrieta-Rico, F.N.; V. M. Kartashov. // Proceedings of 41st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2015), Yokohama, Japan, November, 9 - 12, 2015, pp. 208-213.

66. Murrieta-Rico, F.N. Instability measurement in time-frequency references used on autonomous navigation systems. / Murrieta-Rico, F.N.; Petranovskii, V.; O. Raymond-Herrera; Sergiyenko, Oleg; Lindner, L.; Hernandez-Balbuena, D.; Rodriguez-Quinonez, J. C.; Nieto-Hipolito, J.I.; Tyrsa, V; Melnyk, V.I. // Proceedings of IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2015), Rio de Janeiro, Brazil, June, 3-5, 2015. P. 1020 – 1025.

67. Lindner, L. Continuous 3D scanning mode using servomotors instead of stepping motors in dynamic laser triangulation. / Lindner L.; Sergiyenko O.; Rodriguez-Quinonez J. C.; Tyrsa V.; Mercorelli P.; Flores-Fuentes W.; Murrieta-

Rico F.N.; Nieto-Hipolito J.I. // Proceedings of IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2015), Buzios, Rio de Janeiro, Brazil, June, 3-5, 2015. P. 1008 – 1013.

68. Murrieta-Rico, F.N. Rational Approximations Principle for Frequency Shifts Measurement in Frequency Domain Sensors. / Murrieta-Rico, F.N.; A. Tchernykh; V. Petranovskii; O. Raymond-Herrera; Sergiyenko, O.; Flores-Fuentes, W.; Rodriguez-Quiñonez, J.C.; Hernandez-Balbuena, D.; Nieto-Hipolito, J.I.; V.Tyrsa; and V. M. Kartashov. // Proceedings of 41st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON-2015), Yokohama, Japan, November, 9 - 12, 2015, pp. 226-231.

69. Lindner L. Issues of exact laser ray positioning using servomotors for vision-based target detection / L. Lindner, O. Sergiyenko, M. Rivas-Lopez, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernandez-Balbuena, W. Flores-Fuentes, F. N. Murrieta-Rico, V. Kartashov, V. Tyrsa, J.I. Nieto-Hipólito // Proceedings of IEEE Tech Industry Summit and IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2016), June 8-10, 2016, Santa Clara, CA, USA.

70. Патент Мексики: Sistema óptico de triangulación dinámica para la medición de ángulos y coordenadas en un espacio tridimensional. Autores: Oleg Sergiyenko, V. Tyrsa, M. Rivas López, D. Hernandez Balbuena, L. Básaca Preciado, J. Rodríguez Quiñonez, W. Flores Fuentes. Patente numero 344504 (MX201400647), Fecha de aplicación: 17/12/2013, Fecha de publicación: 17/06/2015, Fecha de expedición: 24/10/2016, Fecha de vencimiento: 17/12/2033, Tipo: A, Int.Cl.8: IPC: G01C1/00 ; G01C3/10

АНОТАЦІЯ

Сергієнко О.Ю. Розвиток теорії та удосконалення систем автономної навігації мобільних наземних роботів в недетермінованих середовищах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2018.

Дисертація містить теоретичне узагальнення і вирішення актуальної науково - прикладної проблеми створення науково-методичного апарату для комплексного вирішення теоретичних і практичних завдань, пов'язаних з автономною навігацією МР, зокрема, теорії та методів машинного зору для можливості бачити сектор перед МР; методу перевірки стабільності частоти бортового годинника МР; методів визначення власної орієнтації МР для ефективного функціонування роботу у недетермінованих середовищах за умов наявності факторів, що заважають нормальному функціонуванню МР. Запропоновано новий метод лазерного зондування простору, що оточує робота - метод динамічної триангуляції, який надає можливість сканування в об'ємному секторі і можливість картографування поверхні перешкоди. Розроблено метод вимірювання часових інтервалів та частоти сигналів – метод

раціональної апроксимації наближенням медіантами, який забезпечує при реєстрації співпадання деякої цілої кількості інтервалів вимірювання з цілою кількістю еталонних інтервалів без залишку вимірювання частоти сигналу з великою точністю за дуже короткі інтервали часу. Цей метод можливий завдяки використанню вперше запропонованого критерію медіанти з чисельником у форматі «ціле число з деякою кількістю нулів». Метод є інваріантним до джиттеру та нестабільності тривалості імпульсів імпульсних послідовностей. Розроблено метод пошуку енергетичного центру для оцінки часового положення імпульсу зі складною формою обвідної для підвищення точності визначення просторового положення енергетичного центру лазерного п'ятна на поверхні, що підвищує розрізняльну здатність СТЗ. Запропоновано метод функціонування лазерного сканера СТЗ зі змінним кроком сканування, що дозволяє оптимізувати пошук перешкоди в полі зору робота за критеріями мінімальних витрат часу на сканування та максимальної інформативності. Удосконалено формування достовірної зони поля зору робота шляхом фільтрації результатів сканування з великими похибками на основі використання алгоритму Левенберга-Марквардта для підвищення розрізняльної здатності СТЗ. Розроблено метод визначення оптимальної траєкторії руху МР в заданому секторі простору за критерієм мінімального шляху і максимальної гладкості траєкторії.

Ключові слова: автономна навігація; мобільний робот; динамічна триангуляція; частота бортового еталону; наближення медіантами.

АННОТАЦІЯ

Сергиенко О.Ю. Развитие теории и усовершенствование систем автономной навигации мобильных наземных роботов в недетерминированных средах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.17 - радиотехнические и телевизионные системы - Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2018.

Диссертация содержит теоретическое обобщение и решение актуальной научно - прикладной проблемы создания научно-методического аппарата для комплексного решения теоретических и практических задач, связанных с автономной навигацией МР, в частности, теории и методов машинного зрения для возможности видеть сектор перед МР; метода проверки стабильности частоты бортовых часов МР; методов определения собственной ориентации МР для эффективного функционирования робота в недетерминированных средах при наличии факторов, мешающих нормальному функционированию МР. Предложен новый метод лазерного зондирования пространства, окружающего робота, - метод динамической триангуляции, который позволяет сканировать в объемном секторе с возможностью картографирования поверхности препятствия, что способствует принятию управленческих решений в реальном масштабе времени и в единой системе координат. Разработан метод измерения

временных интервалов и частоты сигналов - метод рациональной аппроксимации приближением медиантами, который позволяет при регистрации совпадения некоторого целого числа измеряемых интервалов с целым количеством эталонных интервалов без остатка определять частоту сигнала с большой точностью за очень короткие промежутки времени. Этот метод оценки совпадения без остатка становится возможным благодаря использованию впервые предложенного критерия медиант с числителем в формате «целое число с некоторым количеством нулей». Впервые показано, что новый метод является инвариантным к джиттеру и нестабильности длительности импульсов импульсных последовательностей. Разработан метод поиска энергетического центра для оценки временного положения импульса со сложной формой огибающей, которой позволяет в условиях ограниченного времени с достаточной точностью определять пространственное положение энергетического центра подсвеченного лазерного пятна на поверхности препятствия, и обеспечивает значительные преимущества в разрешающей способности СТЗ на краю сектора обзора. Предложен метод функционирования лазерного сканера СТЗ с переменным шагом сканирования, позволяющий оптимизировать поиск препятствия в поле зрения работа по критериям минимальных затрат времени на сканирование и максимальной информативности. Усовершенствован метод формирования достоверной зоны поля зрения робота путем фильтрации результатов сканирования с большими погрешностями на основе использования алгоритма Левенберг-Марквардта для повышения разрешающей способности СТЗ. Разработан метод определения оптимальной траектории движения МР в заданном секторе пространства по критерию минимального пути и максимальной гладкости траектории, основанный на использовании данных, полученных от предложенной СТЗ, а также данных от системы акселерометричного определения собственной пространственной ориентации МР и бортовых часов робота.

Ключевые слова: автономная навигация; мобильный робот; динамическая триангуляция; частота бортового эталона; приближения медиантами.

ABSTRACT

Sergienko O.Yu. Development of the theory and improvement of autonomous navigation systems of mobile terrestrial robots in non-deterministic environments. - Manuscript.

Thesis for a degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.12.17 - Radio engineering and television systems and - Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2018.

The actual scientific problem of the development of the theory of autonomous navigation of mobile terrestrial robots in non-deterministic environments has been solved. It is based on the integrated use in a single matrix of the robot state the information about the environment of the robot, its own spatial orientation and the refined time scale. The new method of dynamic laser triangulation, which provides

the possibility of scanning in the bulk sector and the possibility of mapping the surface of the obstacle, is proposed. It facilitates the control decisions in real time and in the same coordinate system. The developed method of time intervals and frequency measurement is a method of rational approximation by mediants, which provides by registering the coincidence of a certain number of measurand intervals with a number of reference intervals without a residual, to measure the signal frequency with great accuracy during very short interval of time. This method of the coincidence without remainder becomes possible due to the use of the firstly proposed criterion of medians with a numerator in the format of "integer with a certain number of zeros". It has been shown that the new method is invariant to the jitter and the instability of the pulse width. The method of the power center search for the temporal position estimation of a pulse with a complex shape is developed. It allows, in conditions of limited time, with sufficient accuracy to determine the spatial position of the energy center of the illuminated laser spot on the obstacle surface, and provides significant advantages in the TVS resolution. The method of the laser scanner functioning with a variable scanning step is proposed. It allows optimizing the search of the obstacle in the field of view under the criteria of minimum time for scanning and maximum informativity. The method of forming a robot's reliable field of view is improved by filtration of scan results with large errors based on the use of Levenberg-Marquardt algorithm for increasing the TVS resolution. The method for the optimal trajectory determination of MR motion in a given spatial sector based on the criterion of the minimum path and maximum trajectory smoothness is developed.

Keywords: autonomous navigation; mobile robot; dynamic triangulation; frequency of on-board reference; approximation by mediants.