

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ТРИВИМІРНА ЛАЗЕРНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,

групи ЛОЕТм-24-1

Денис КАТАСОНОВ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і

оптоелектронна техніка»

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ

(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____

(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва)

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

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Катасонову Денису Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Тривимірна лазерна візуалізація

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1024 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи фізико-математичні основи тривимірного лазерного сканування

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Дослідити фізико-математичні процеси 3D-лазерного сканування. 2 Проаналізувати основні частини та типи 3D-лазерного сканування. 3 Виконати аналіз експериментально використаних систем тривимірного лазерного сканування в безпілотному автомобілі.

4 Проаналізувати вплив атмосферних факторів на роботу систем 3D-лазерного сканування.

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

Демонстраційний матеріал – 15 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний огляд фізико-математичних процесів 3D-лазерного сканування	02.09.25–20.09.25	Виконано
2	Аналіз основних частин та типів 3D-лазерного сканування	25.09.25–05.10.25	Виконано
3	Аналіз експериментально використаних систем тривимірного лазерного сканування в безпілотному автомобілі	10.10.25–18.10.25	Виконано
4	Аналіз вплив атмосферних факторів на роботу систем 3D-лазерного сканування	22.10.25–25.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	30.10.25–11.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	14.11.25–20.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КвР на унікальність	26.11.25–08.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	10.12.25–13.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–17.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 66 с., 24 рис., 2 таблиці, 1 додаток, 25 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ, АНАЛІЗ, ВПЛИВ, ДАТЧИК, СКАНУВАННЯ, ТРИВИМІРНИЙ ЛАЗЕРНИЙ СКАНЕР.

Об'єкт дослідження: технології тривимірного лазерного сканування.

Метою роботи є дослідження і аналіз принципів та можливостей тривимірного лазерного сканування, перспективних областей його застосування.

Метод дослідження: дослідження проведено шляхом аналізу науково-технічної літератури, вивчення технічних характеристик сучасних лазерних сканерів, а також застосування практичних прикладів з тривірного моделювання.

Робота буде складатися з вступу, де буде обґрунтована актуальність вибраної теми, основної частини, що включатиме розділи про об'єкт дослідження, мету роботи, методи дослідження і детальний аналіз технології тривірного лазерного сканування. Заключний розділ включатиме висновки щодо результатів дослідження та можливих перспектив розвитку цієї технології.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 66 p., 24 figures, 2 tables, 25 sources.

ANALYSIS, AUTOMATED CONTROL, INFLUENCE, SENSOR, SCANNING, THREE-DIMENSIONAL LASER SCANNER.

Object of study: three-dimensional laser scanning technologies.

The purpose of the work is to study and analyze the principles and capabilities of three-dimensional laser scanning, as well as the prospective areas of its application.

Research method: the study was conducted through the analysis of scientific and technical literature, examination of the technical characteristics of modern laser scanners, as well as the use of practical examples from three-dimensional modeling.

The work will consist of an introduction, which will justify the relevance of the chosen topic, a main part, which will include sections on the research object, the purpose of the work, research methods, and a detailed analysis of the three-tier laser scanning technology. The final section will include conclusions regarding the results of the research and possible prospects for the development of this technology.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Види та принципи роботи 3d сканерів.....	9
1.1 Лазерне 3D-сканування.....	10
1.2 3D-сканування та його класифікація	11
1.3 Типи сканерів	12
1.4 Фізичні принципи	14
1.5 Time-of-Flight (TOF) і фазове вимірювання.....	17
1.6 Робота LIDAR.....	18
1.7 Програми для LIDAR	20
1.8 Функціонування LIDAR у реальному середовищі.....	22
1.9 Ефективність 3D-лазерного сканування при моніторингу вологовмісту матеріалів	23
1.10 Моделювання використання 3D сканера в реальних умовах	27
1.11 Проблеми з LIDAR	31
2 3D-лазерне сканування в навігації.....	34
2.1 Обертний 3D-лазерний сканер	35
2.2 Специфікація програмного забезпечення обертового 3D-лазера.....	37
2.3 Бездротовий доступ обертового 3D-лазера	39
2.4 Аналіз перетинів обертового 3D-лазера	41
2.5 3D-датчики в автомобілях — шлях до автоматизованого керування.....	43
2.6 3D-лазерний датчик швидкості (LVS).....	45
2.7 Принцип роботи LVS	46
2.8 Конфігурація лазерного датчика швидкості	47
2.9 Навігація GNSS з 3D-лазерним датчиком швидкості (LVS).....	48
2.10 Чотиришаровий лазерний сенсор	51
2.11 Класифікація помилок в даних наземного лазерного сканування	54
2.12 Інструментальні помилки наземних лазерних сканерів.....	55
2.13 Технічні характеристики Leica RTC360.....	60
Висновки	62
Перелік джерел посилання	64
Додаток А Демонстраційний матеріал	67

ВСТУП

Сучасний етап розвитку науки та техніки характеризується стрімким удосконаленням методів отримання, обробки та аналізу інформації про навколишній світ. Одним із найбільш інноваційних напрямів є технології тривимірної (3D) візуалізації, що дозволяють з високою точністю відтворювати геометричні параметри фізичних об'єктів у цифровому вигляді. Серед них особливе місце займають методи лазерного сканування, які забезпечують можливість швидкого та точного отримання просторових даних про об'єкти різної природи і масштабів.

3D-сканування, засноване на вимірюванні відстані до точки поверхні об'єкта та формуванні хмари точок, активно використовується у промисловості, архітектурі, геодезії, медицині, зворотному інжинірингу, культурології, машинобудуванні та багатьох інших галузях. Завдяки застосуванню сучасних сенсорів, обчислювальних потужностей і математичних алгоритмів ці системи дозволяють з високою точністю реконструювати форму об'єкта, аналізувати його параметри та виконувати подальшу цифрову обробку.

Найбільш поширеними технологіями просторового сканування є триангуляційні лазерні сканери, системи на основі вимірювання часу проходження імпульсу (Time-of-Flight), фазові вимірювальні системи та LiDAR-комплекси. Вони відрізняються за принципом роботи, точністю, дальністю дії, сферою застосування та вартістю. Зокрема, LiDAR-системи дедалі частіше використовуються в задачах картографування, дистанційного зондування земної поверхні, екологічного моніторингу, а також при створенні систем автономного транспорту завдяки можливості формування тривимірної моделі оточення в реальному часі.

Актуальність розвитку технологій 3D-візуалізації зумовлена необхідністю підвищення точності вимірювань, автоматизації процесів отримання просторової інформації, а також розширення можливостей аналізу

та моделювання складних об'єктів. Особливу увагу привертає застосування лазерного сканування для контролю фізичних характеристик матеріалів, зокрема визначення їхньої геометрії, деформацій та параметрів поверхні. Важливою задачею є також дослідження можливості використання інтенсивності лазерного відбиття для оцінки стану об'єктів, наприклад, контролю вмісту вологи в пористих матеріалах та породах.

1 ВИДИ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ 3D-СКАНЕРІВ

3D-сканування – це нова техніка для зображення фізичного об'єкта через його три виміри. У цій технології класична камера робить 3D-картину і створює повний цифровий файл фізичного об'єкта. Системи 3D-сканування відрізняються своєю роздільною здатністю, відстанню між точками, записаними на певній відстані сканування. Це вказує на те, що скановані елементи, менші за роздільну здатність сканера, не записуються. Зворотна інженерія вимагає кращої роздільної здатності для сканування поверхонь; лазерні та структуровані 3D світло сканери дають хорошу точність. Точність портативних 3D-сканерів залежить від відстані між ними та якості реконструкції сканування. Структуроване світлове сканування, як правило, забезпечує найбільшу роздільну здатність і точність, як правило, більше, ніж технології лазерного сканування.

Ручні 3D-сканери можна переміщати вручну та мають менші обмеження розміру. Ці сканери можуть знімати зображення таких великих предметів, як ціла кімната та невеликі промислові вироби. Ручні високоякісні системи сканування пропонують ще ширший діапазон і заповнюють прогалину для всіх речей, які потребують точного вимірювання. Ручні 3D-сканери також можуть миттєво записувати дані про продукт, що робить їх придатними для ергономічний і медичне використання для вимірювань на людях. 3D-сканування робить дуже бажаним надання архітектурних послуг через здатність сканувати та аналізувати конструкції дуже детально. За допомогою 3D-сканування користувач може повністю використовувати, бачити та змінювати дані автоматизованого проектування (САПР) і давати точні вимірювання. Швидкий збір інформації з великою точністю означає величезну продуктивність і економію часу, що має вирішальне значення для результатів клієнтів.

Зворотне проектування має вирішальне значення для створення нових компонентів і включає попередні проекти, які не можуть отримати доступ до

оригінального дизайну САПР. Наприклад, можна створювати нові деталі, які відповідають оригінальній концепції компонентів, або методи зворотного проектування можуть поєднувати складні поверхні з існуючих елементів у 3D-друковані пристосування, які корисні для масової модифікації вироблених і ремісничих товарів. За допомогою суцільної САПР розмір однієї функції можна змінити, а всю модель можна оновити відповідно до змін. Точність 3D-сканування сильно відрізняється від технології до технології. Він може використовувати допуски, необхідні для кінцевих продуктів, щоб визначити точні потреби в 3D-сканері. Структуровані та лазерні 3D-сканери використовують проектоване світло та офсетну камеру для сканованого об'єкта для тріангуляції точок. Лазерний 3D-сканер виробляє лінії на предметі, тоді як структуроване світло проектує концентровану сітку цифрового проєктора.

3D-сканування – це фантастичний метод зворотного проектування та опитування причин, будь то зовнішня конструкція чи деякі внутрішні меблі. У виготовлених замісних покриттях використовувалися найсучасніші матеріали, що імітують існуючий зовнішній вигляд і профілі старіння. 3D-сканування серед художників та істориків мистецтва все частіше використовується. Одним із найважливіших застосувань у цьому секторі є сканування артефактів, створення відтворюваних 3D-друкованих копій або архівування та їх збереження. 3D-сканування дозволяє класифікувати, вимірювати, аналізувати та навіть обмінюватися культурним матеріалом у дослідницькому співтоваристві. Художники можуть включати реальні предмети та зображення у свою роботу за допомогою 3D-сканування.

1.1 Лазерне 3D-сканування

Лазерне 3D-сканування – це процес захоплення точної 3D-інформації з будь-якого об'єкта чи середовища за допомогою лазера як джерела світла. Технологія базується на лазерних променях для вимірювання відстані до

поверхні та створення ультрареалістичних 3D-моделей об'єктів, місць і величезних ландшафтів. 3D-лазерне сканування – це популярний інженерний, будівельний та архітектурний інструмент, який часто використовується для документування та оцінки стану різних споруд.

3D-лазерні сканери використовують LiDAR (виявлення світла та визначення відстані), проєктуючи лазерне світло на об'єкт для фіксації та вимірювання точних локацій і відстаней [1]. Створюючи файл у вигляді хмари точкових, сканери надають цифрові дані, які є безцінними у численних застосуваннях – від зворотного інжинирингу та інспекції якості до збереження спадщини та судової експертизи. Що робить технологію ще популярнішою, так це те, що сучасні лазерні сканери портативні, безпечні, прості у використанні та точні до міліметрів.

1.2 3D-сканування та його класифікація

3D-сканування цифровим способом відтворює об'єкт, фіксуючи його координати (x, y, z) . У багатьох галузях промисловості використовується зворотне проектування, щоб скоротити витрати та час на розробку продукту, проектування та виробництво. Збір наявних даних з фізичних об'єктів може прискоритись за допомогою 3D-сканера. 3D-сканування - це метод, який може швидко генерувати цифровий дублікат реальності. Це відмінна техніка для створення користувальницьких предметів, які точно підходять людині. Заповнений розділ сканується за допомогою хмарного сканера в 3D точках. Потім він поступово створюється та реінтегрується в іншу сітчасту структуру на кресленні САПР. Його можна змінити для обробки та допуску, і зрештою новий дизайн готовий до створення та час від часу об'єднується з ним САМ софт. Ця технологія стає більш досконалою та точною для вирішення проблем проектування. Різні типи областей процесу 3D сканування:

- структуроване світло 3D сканування;
- лазерна тріангуляція 3D сканування;

- структуроване світло 3D сканування;
- координатно-вимірвальна машина (СММ) (3D-сканування на основі контактів).

1.3 Типи сканерів

3D-лазерні сканери представлені вражаючим різноманіттям, пристосованими для різних застосувань. Вони варіюються від автономних пристроїв – ручних або стаціонарних і на штативах – до складних промислових рішень, таких як мобільні або бортові лазерні сканувальні системи чи роботизовані руки. Лазерні сканери використовують три типи технологій: час польоту, фазовий зсув і триангуляцію. Давайте розглянемо кожен з них уважніше.

Системи вимірювання часу польоту, або системи вимірювання імпульсу працюють шляхом випромінювання одного імпульсу лазерного світла та визначення відстані до кінцевої точки шляхом вимірювання часу, необхідного для відбиття світла назад до сенсора сканера (рис. 1.1).

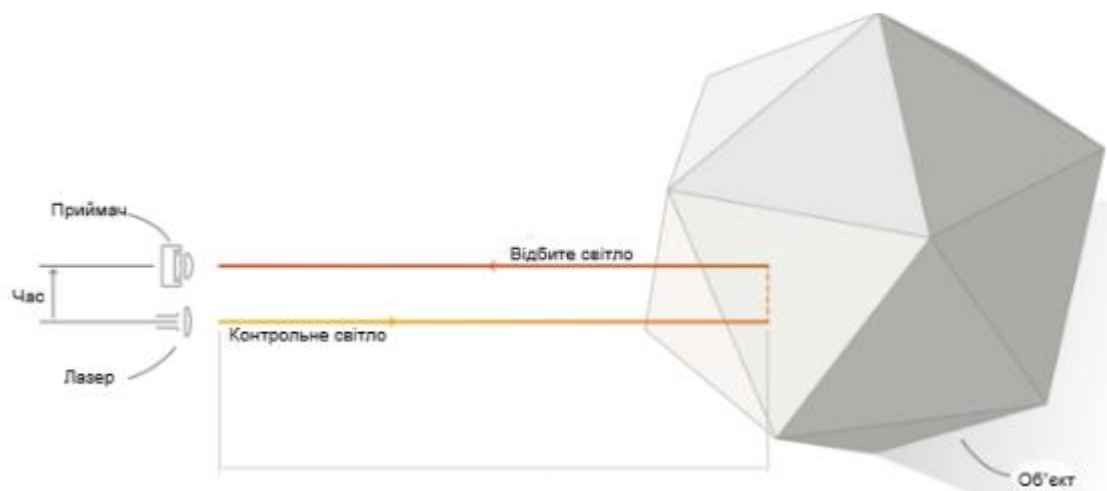


Рисунок 1.1 – Система вимірювання часу польоту

Системи з фазовим зсувом також використовують випромінюване лазерне світло, але інтенсивність світла модулюється певними формами хвиль. Відбиття інтенсивних візерунків зміщується ударом об поверхню об'єкта. Вимірювання зміщення між сигналом лазера, що відправляється, і отриманим сигналом забезпечує точний розрахунок відстані (рис. 1.2).

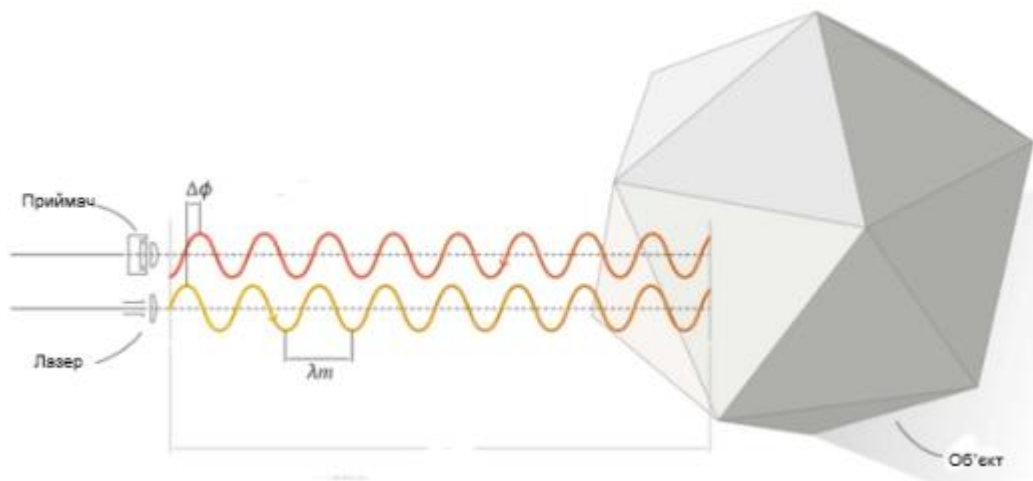


Рисунок 1.2 – Системи з фазовим зсувом

Лазерні сканери на основі триангуляції працюють шляхом випромінювання лазерного світла на об'єкт і фіксації відбитого світла за допомогою вбудованого сенсора камери [2]. Система розраховує відстань до об'єкта за допомогою тригонометричної триангуляції, утворюючи трикутник між джерелом лазера, сенсором і відбитою ціллю на поверхні об'єкта. Зазвичай триангуляційні сканери використовуються для коротких відстаней (менше 5 м), і відмінно фіксують малі та середні об'єкти діаметром від 1 см до приблизно 2–3 м (рис. 1.3).

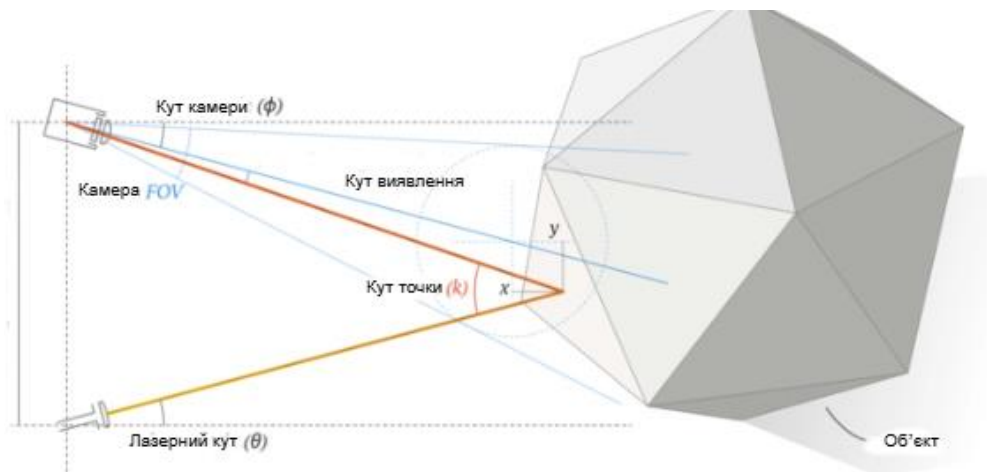


Рисунок 1.3 – Лазерний сканер на основі триангуляції

Два чудові приклади лазерних сканерів, призначених для фіксації різних типів об'єктів і роботи на різних відстанях, – це Artec Point і Artec Ray II. Перший – це портативний лазерний 3D-сканер метрологічного класу з точністю до 0,02 мм прямо на долоні, а другий – це далекобійний LiDAR-сканер, який забезпечує виняткову точність 3D-точок 1,9 мм на відстані 10 м.

1.4 Фізичні принципи

Триангуляційні лазерні 3D-сканери використовують лазерний промінь для того, щоб прозондировать об'єкт. Камера фіксує розташування точки, куди потрапив лазер. Теодоліт являє собою телескоп, встановлений на двох осях обертання. Кут на об'єкт відстежується точно. Вимірюючи кутові вимірювання з різних положень, можна отримати відстань до об'єкта. Сучасні теодоліти керуються комп'ютером для автоматичного відстеження вимірюваного об'єкта при його переміщенні (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Теоделіт

Тріангуляційний метод контролю заснований на розрахунку шуканої відстані через співвідношення трикутника з використанням відомих параметрів системи. Технологія називається тріангуляцією тому, що камера, лазерний випромінювач і сама лазерна точка на поверхні об'єкта утворюють своєрідний трикутник. У цій системі відома довжина однієї зі сторін трикутника – це відстань між лазерним випромінювачем і камерою. Також відомий кут лазерного випромінювача, а кут камери визначається за розташуванням лазерної точки в полі огляду камери [3]. Ці три характеристики повністю формують розмір трикутника і вказують на розташування кута лазерної точки.

Лазерна тріангуляція здійснюється шляхом проектування лазерної лінії або точки на об'єкт, а потім реєстрації її відбиття за допомогою датчиків, розташованих на відомій відстані від лазерного джерела. В результаті кут відбиття може бути інтерпретований як інформація про рельєф (рис. 1.5).

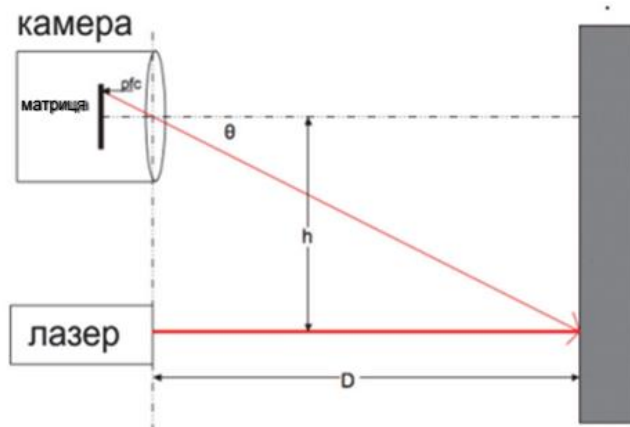


Рисунок 1.5 – Принцип роботи триангуляційного лазерного далекоміра

Лазерний промінь проєктується на об'єкт у полі зору камери. Цей промінь повинен бути ідеально паралельним оптичній осі камери. Лазерна точка захоплюється разом з рештою сцени. Необхідно знайти на зображенні яскрава пляма. Передбачається, що точка лазера є яскравішою на тлі темнішого об'єкта. Потім нам потрібно розрахувати дальність до об'єкта. Як ми бачимо з (рис. 1.5), відстань D може бути розрахована за формулою:

$$D = \frac{h}{\operatorname{tg} \theta},$$

де h – фіксована відстань.

Кут θ можна визначити як:

$$\theta = P_{fc} R_{pc} r_0,$$

де p, f, c – номер пікселя центру світлої точки від центру зображення;

r_p – радіан на піксель;

r_o – компенсація.

Кількість пікселів від центру площини зображення до лазерної точки може бути знайдена простим підрахунком. Для отримання інших параметрів необхідно виконати калібрування.

Для калібрування системи можна використовувати серію вимірювань, де відомі дальність до цілі, а також кількість пікселів центру зображення до точки лазера:

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{h}{D} \right).$$

Тепер можна вивести розрахункові співвідношення або просто використовувати лінійну залежність кута від номера пікселя.

На такому принципі побудована і робота промислових триангуляційних вимірювачів відстані. Одним із конкретних поліпшень, які можуть бути внесені в роботу цього далекоміра, є проєкція горизонтальної лазерної лінії замість точки. Таким чином, можна обчислювати відстань до мети для кожного ряду пікселів на зображенні.

1.5 Часопрольотне фазове вимірювання

Time-of-Flight (ToF) — це технологія вимірювання відстані, яка визначає час, за який об'єкт, частинка або хвиля долає певну відстань. Ця інформація використовується для створення 3D-зображень, визначення швидкості об'єктів, їхнього розміру та форми. Випромінюють короткий світловий імпульс (лазер), вимірюють час t до повернення. Відстань дорівнює:

$$d = \frac{ct}{2}.$$

де c — швидкість світла.

Точність потребує надзвичайно точних таймерів (псевдонаносекунди для сантиметрової точності).

Фазове (phase-shift) вимірювання. Джерело модуляції випромінює синусоїдний сигнал частоти f_m . Після прийому обчислюють фазове зміщення ϕ , і відстань:

$$d = \frac{c}{4\pi f_m} \phi.$$

Фазові методи забезпечують вищу дискретизацію для середніх відстаней, але мають неоднозначність через періодичність фази (вирішують шляхом багаточастотного вимірювання або поєднання з грубим TOF). TOF краще підходить для великих відстаней (археологія, картографія) [4], фазові – для високоточних портативних сканерів.

1.6 Робота LIDAR

LiDAR – це оптична технологія, яку часто називають ключовим методом вимірювання відстані автономні транспортні засоби. Багато виробників працюють над розробкою економічно ефективних, компактних систем LiDAR. Практично всі виробники, які займаються автономним керуванням, вважають LiDAR ключовою технологією, і деякі системи LiDAR вже доступні для розширення системи допомоги водієві (ADAS) [5].

По суті, LiDAR – це пристрій визначення дальності, який вимірює відстань до цілі. Відстань вимірюється шляхом надсилання короткого лазерного імпульсу та запису проміжку часу між вихідним світловим імпульсом і виявленням відбитого (зворотно розсіяного) світлового імпульсу (рис. 1.6).

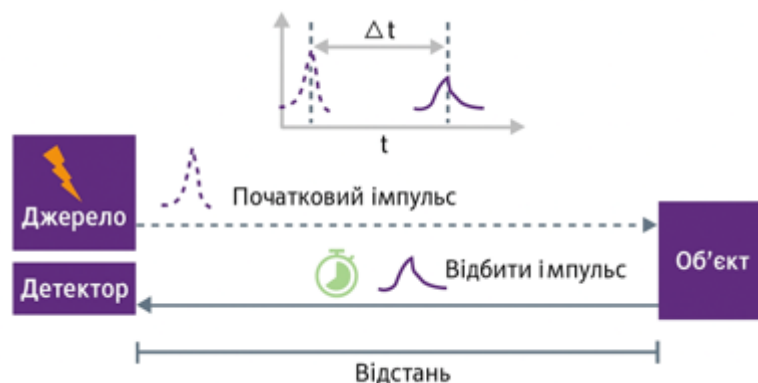


Рисунок 1.6 – Вимірювання відстані за допомогою LIDAR

Система LiDAR може використовувати дзеркало сканування, кілька лазерних променів або інші засоби для «сканування» простору об'єкта. З можливістю забезпечення точного вимірювання відстаней, LiDAR може бути використаний для вирішення багатьох різних задач.

У дистанційному зондуванні системи LiDAR використовуються для вимірювання розсіювання, поглинання або повторного випромінювання частинок або молекул в атмосфері. Для цих цілей системи можуть мати особливі вимоги до довжини хвилі лазерних променів. Концентрацію певного молекулярного виду в атмосфері, наприклад метану та аерозольне навантаження, можна виміряти. Краплі дощу в атмосфері можна виміряти, щоб оцінити відстань шторму та швидкість дощу [6].

Інші системи LiDAR забезпечують профілі тривимірних поверхонь в об'єктному просторі. У цих системах зондуючі лазерні промені не прив'язані до певних спектральних особливостей. Натомість довжину хвилі лазерних променів можна вибрати, щоб забезпечити безпеку очей або уникнути атмосферних спектральних особливостей. Зондуючий промінь стикається і відбивається «жорсткою ціллю» назад до приймача LiDAR.

LiDAR також можна використовувати для визначення швидкості цілі. Це можна зробити або за допомогою доплерівської техніки, або шляхом швидкого вимірювання відстані до цілі. Наприклад, швидкість атмосферного вітру та швидкість автомобіля можна виміряти за допомогою системи LiDAR.

Крім того, системи LiDAR можна використовувати для створення тривимірної моделі динамічної сцени, наприклад, того, з чим може зіткнутися автомобіль з автономним керуванням. Це можна зробити різними способами, зазвичай використовуючи техніку сканування.

1.7 Програми для LIDAR

Області застосування LiDAR глибокі та різноманітні. В атмосферних науках LiDAR використовувався для виявлення багатьох типів атмосферних компонентів. Він використовувався для характеристики аерозолів в атмосфері, дослідження верхніх атмосферних вітрів, профілювання хмар, допомоги в зборі даних про погоду та багатьох інших застосувань [7]. В астрономії LiDAR використовувався для вимірювання відстаней як для віддалених об'єктів, таких як Місяць, так і для дуже близьких об'єктів. Насправді LiDAR є важливим пристроєм для покращення вимірювання відстані до Місяця з точністю до міліметра. LIDAR також використовувався для створення напрямних зірок для астрономічних застосувань.

Дані LiDAR часто збираються повітрям, наприклад, за допомогою цього оглядового літака NOAA (праворуч) над мостом Біксбі в Біг-Сурі, Каліфорнія (рис. 1.7). Тут дані LiDAR розкривають вид зверху вниз (зверху ліворуч) і профіль мосту Біксбі. Вчені NOAA використовують продукти, створені LiDAR, для дослідження як природного, так і створеного людиною середовища. Дані LiDAR підтримують такі дії, як моделювання затоплення та штормових нагонів, гідродинамічне моделювання, картографування берегової лінії, реагування на надзвичайні ситуації, гідрографічна зйомка та аналіз вразливості узбережжя (рис.1.8).



Рисунок 1.7 – Дані LIDAR з оглядового літака NOAA

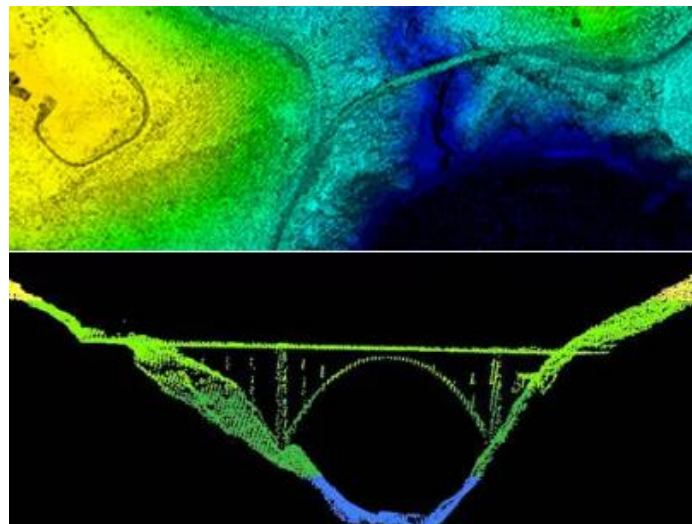


Рисунок 1.8 – Профіль мосту LIDAR

Крім того, топографічний LiDAR використовує лазер ближнього інфрачервоного діапазону для картографування землі та будівель, а батиметричний LiDAR використовує водопроникне зелене світло для картографування морського дна та русла річки [8]. У сільському господарстві LiDAR можна використовувати для картографування топології та росту сільськогосподарських культур, що може надати інформацію про потреби в добривах і потреби в зрошенні. В археології LiDAR використовувався для картографування стародавніх транспортних систем під густим пологом лісу.

Сьогодні LiDAR часто використовується для створення тривимірної моделі світу навколо датчика LiDAR. Автономна навігація - це одна програма, яка використовує хмару точок, створену системою LiDAR. Мініатюрні системи LiDAR можна знайти навіть у таких маленьких пристроях, як мобільні телефони.

1.8 Функціонування LIDAR у реальному середовищі

Одним із захоплюючих додатків для LiDAR є системи контролю ситуації необхідні для автономної навігації. Система ситуаційної обізнаності для будь-якого транспортного засобу, що рухається, повинна знати як нерухомі, так і рухомі об'єкти навколо нього [9]. Наприклад, радар довгий час використовувався при виявленні літаків. LiDAR було визнано дуже корисним для наземних транспортних засобів, оскільки він може визначити відстань до об'єктів і є дуже точним з точки зору спрямованості. Зондуючі промені можна спрямувати на точні кути та швидко сканувати, щоб створити хмару точок для тривимірної моделі. Можливість швидкого сканування є ключовою для цієї програми, оскільки ситуація навколо автомобіля дуже динамічна. (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Автономний автомобіль використовує датчики LIDAR для виявлення навколишніх будівель і автомобілів

1.9 Ефективність 3D-лазерного сканування при моніторингу вологовмісту матеріалів

У гірничій безпеці та інших галузях подібне моделювання матеріалів є основним методом дослідження для вивчення руху та деформації гірської породи та поверхні ґрунту. Однак можна отримати неточні закони опускання, оскільки на міцність композиційних матеріалів, таких як гіпс і вапно, легко впливає волога. Тому вкрай важливо контролювати вміст вологи під час проведення імітаційних експериментів. У цій статті обговорювалася доцільність непрямого вимірювання вмісту вологи в подібних моделях матеріалів за допомогою інтенсивності відбиття тривимірного (3D) лазерного сканування за допомогою трьох експериментів на подібних зразках матеріалів. Результати показали, що інтенсивність відбиття лазера була чутливою до вмісту вологи, кута падіння, а відстань із трьома різними зв'язками та вплив двох факторів може бути послаблена за допомогою встановлених моделей корекції. Однак було рекомендовано обмежити кут падіння до менш ніж 20° і встановити відстань від 4 м до 10 м, щоб зменшити складність корекції. Точність цього методу досягала 1,1 % за умови моніторингу 4 м і нормального падіння, що могло відповідати вимогам моніторингу вологості аналогічних моделей матеріалів. Результати дослідження роботи забезпечують новий метод моніторингу вмісту вологи в аналогічних моделях матеріалів. Точність цього методу досягала 1,1 % за умови моніторингу 4 м і нормального падіння, що могло відповідати вимогам моніторингу вологості аналогічних моделей матеріалів. Результати дослідження роботи забезпечують новий метод моніторингу вмісту вологи в аналогічних моделях матеріалів. Точність цього методу досягала 1,1 % за умови моніторингу 4 м і нормального падіння, що могло відповідати вимогам моніторингу вологості аналогічних моделей матеріалів. Результати дослідження роботи забезпечують новий метод моніторингу вмісту вологи в аналогічних моделях матеріалів [10].

Підземний видобуток вугілля може призвести до переміщення та руйнування порід, що лежать вище, що призведе до великої площі осідання та деформації поверхні, що призведе до низки екологічних та геологічних проблем. Таким чином, осідання, спричинене видобутком корисних копалин, і його закони слід точно передбачити та ретельно вивчити для полегшення екологічних і геологічних проблем. Як правило, фізичне моделювання та чисельне моделювання є основними методами дослідження в галузі руху гірських порід і осідання поверхні. І фізичне моделювання широко використовується в цій галузі на основі прямого спостереження за внутрішнім рухом і деформацією гірської маси в різних безперервних і розривних моделюваннях. Метод подібного моделювання матеріалів, поширений метод фізичного моделювання, зазвичай використовує пісок, гіпс, вапно та деякі інші матеріали для побудови моделей. Під час виїмки моделі контролюється рух і деформація в породі та поверхні землі моделі. На основі встановленої теорії подібності між моделлю та прототипом рух і деформацію прототипу можна оцінити за результатами моніторингу. Цей метод дослідження моделювання застосовувався в багатьох галузях, таких як видобуток вугільних заправок, оцінка руйнування розкривних порід, тиск у купі, стабільність виробки тощо. Однак слід зазначити, що гіпс і вапно, які зазвичай використовуються як цемент моделей, є матеріалами, що зміцнюють повітря, на міцність яких впливає вміст вологи в повітрі. Отже, міцність моделі, що складається з гіпсу, вапна та піску, неминуче може змінитися через зміну вмісту вологи. У природних умовах вода в моделі поступово випаровувалася б, що могло б змусити міцність поступово збільшуватися і навіть значною мірою відхилитися від запроектованої міцності [11]. На даний момент кореляція між моделлю та прототипом не узгоджується зі встановленою теорією подібності, що призведе до неправильних результатів, якщо невідповідна модель буде використана для проведення імітаційного дослідження утворення гірських порід.

Дані дослідження припустили, що міцність суміші піску, вапна, гіпсу безпосередньо пов'язана з його вологістю. Коли вміст вологи контролювався в

певному діапазоні, міцність суміші була стабільною. Тому необхідно контролювати вміст вологи при проведенні модельних експериментів. З одного боку, вміст вологи має бути обмежений відповідним діапазоном; з іншого боку, потрібне попереднє попередження, щоб повідомити експериментаторам, що міцність моделі відхилилася від міцності початково розробленої моделі, коли вміст вологи в моделі перевищує діапазон.

Методи контролю вологості сумішей, які складаються з піску, гіпсу та вапна, загалом можна розділити на контактні методи вимірювання та безконтактні методи вимірювання. Методи вимірювання контакту в основному включають метод сушіння, нейтронний метод, метод рефлектометрії у часовій області (TDR), метод частотно-доменної рефлектометрії (FDR), метод технології розподіленого оптичного волоконного зондування, тощо; безконтактні методи вимірювання в основному включають метод ближнього інфрачервоного діапазону і метод вимірювання мікрохвильової печі, та інші. Однак контактне вимірювання здебільшого належить до точкового вимірювання з невеликим діапазоном вимірювань і може завдати певної шкоди моделям, тоді як безконтактне вимірювання має значні переваги при вимірюванні всіх моделей з невеликими порушеннями самих моделей.

Метод тривимірного (3D) лазерного сканування, безконтактний метод вимірювання з використанням ближнього інфрачервоного світла, має значні переваги в моніторингу вмісту вологи в моделі. Наприклад, 3D лазерний сканер може одночасно вимірювати поле зміщення моделі після видобутку і вологість моделі. Основним принципом методу вимірювання вмісту вологи є використання фізичного механізму, згідно з яким інтенсивність відбиття лазера значно нижча, ніж інтенсивність випромінювання лазера, оскільки енергія лазера поглинається вологою в моделі. Зокрема, матеріал з вищим вмістом вологи має набагато сильніше поглинання енергії лазера, що може спричинити нижчу інтенсивність відбиття лазера і навпаки. Метод контролю вологості за допомогою 3D лазерного сканера в даний час використовується при моніторингу вологості стародавніх будівель, рослинності, джерела енергії.

Крім того, отримали вміст вологи в установках, використовуючи інтенсивність лазерного відбиття, за допомогою відповідної моделі, створеної інтенсивністю лазерного відбиття та вмістом вологи. Однак перед отриманням все ще необхідно виправити значення інтенсивності відбиття лазера, щоб послабити вплив кута падіння та відстані. Хоча точність значення інтенсивності пов'язана з багатьма факторами, такими як склад матеріалу, колір, текстура поверхні та шорсткість, кут падіння, відстань, а деякі інші, кут падіння та відстань є основними факторами впливу, що стосується конкретного відбиваючого середовища [12].

Таким чином, все ще існує багато невизначеностей щодо застосування цього методу для моніторингу вмісту вологи в подібних моделях матеріалів, які включають:

- 1) чи існує значна кореляція між інтенсивністю відбиття лазера та вмістом вологи в подібній моделі матеріалу;
- 2) чи мають кути падіння та відстані порушення чутливості інтенсивності відбиття лазера до вмісту вологи;
- 3) чи можна скоригувати інтенсивність відбиття лазера до того самого стандарту для порівняння, оскільки кут падіння та відстань лазерного променя, що відповідають кожній точці сканування, відрізняються у фактично періодичному спостереженні;
- 4) чи може точність методу відповідати вимогам моніторингу вмісту вологи в подібних моделях матеріалів.

Щоб з'ясувати вищезазначені проблеми, подібні зразки матеріалу досліджуються за допомогою трьох експериментів:

- 1) дослідити зв'язок між інтенсивністю лазера та вмістом вологи для визначення того, чи чутлива інтенсивність лазера до зміни вмісту вологи;
- 2) вивчити вплив кута падіння і відстані на інтенсивність лазера, щоб знайти метод корекції і дати деякі пропозиції щодо відповідного положення моніторингу при використанні 3D лазерного сканування;
- 3) обговорити точність цього методу.

На основі отриманих результатів обговорюємо доцільність використання 3D-лазерного сканера для моніторингу вологості подібних моделей матеріалів.

1.10 Моделювання використання 3D сканера в реальних умовах

З урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалів та їхньої доступності було обрано оптимальний склад для виготовлення тестових зразків, необхідних для проведення подальших вимірювань. В реальних умовах Гіпс і карбонат кальцію були обрані як цемент, а пісок використовувався як заповнювач для виготовлення зразків. Всього за співвідношенням було виготовлено 10 екземплярів з довжиною сторони 12 см і товщиною 3 см. Деякі зразки були показані на (рис. 1.10). Під час експериментів температуру навколишнього середовища та вологість відповідно підтримували на рівні 4 °C та 70 %, щоб запобігти надто швидкому випаровуванню вмісту вологи. Для контролю вмісту вологи в цих експериментах використовувався 3D лазерний сканер REIGL VZ1000 [13].

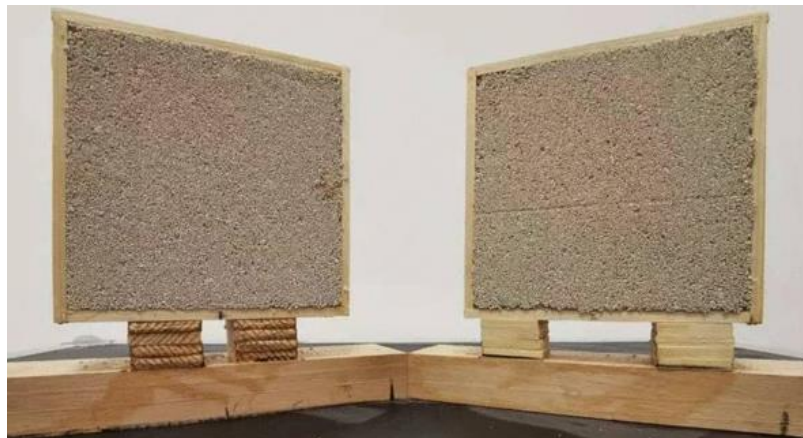


Рисунок 1.10 – Два виставлені екземпляри

Процедура та обробка даних трьох експериментів були розроблені для:

- оцінки чутливості за співвідношеннями між інтенсивністю лазерного відбиття та вмістом вологи у зразках;

б) дослідити складену кореляцію інтенсивності відбиття лазера та двох факторів і способів її виправлення;

в) вивчити точність цього методу шляхом порівняння отриманого вмісту вологи з результатами.

Експеримент чутливості. Для початку цього процесу зразок сканували при 4 м і нормальному падінні з інтервалом вимірювання 24 год і згодом сканували при кутах падіння від 20° до 80° з кроком 20° з інтервалом 48 год при 6 м, тоді як інші три зразки сканували при нормальному падінні з інтервалом вимірювання 48 год при 4, 6, 8 і 10 м відповідно.

Кожен зразок негайно зважували та відповідно записували після кожного сканування. Після всього сканування всі зразки висушували, а вміст вологи під час кожного сканування розраховували методом сушіння.

Оригінальна інтенсивність лазерного відбиття отриманої хмари точок, що належить до області подібних зразків матеріалу, була вилучена та виведена за допомогою допоміжного програмного забезпечення Riscan.

Початкова інтенсивність лазерного відбиття - це відношення, яке здебільшого нижче нуля, амплітуди відлуння відсканованої цілі до амплітуди ламбертівської білої площини на тій самій відстані та нормальному куті падіння в умовах розширеної цілі. Щоб спростити розрахунок, отриману початкову інтенсивність відбиття лазера нормалізували відповідно до:

$$y = 10^{x/10},$$

де x – оригінальний вихід інтенсивності лазерного відбиття програмним забезпеченням Riscan;

y – нормалізована інтенсивність відбиття лазера.

Після перетворення середню нормалізовану інтенсивність розглядали як інтенсивність лазерного відбиття кожного сканування, а модель підгонки між інтенсивністю лазерного відбиття та вмістом вологи у зразках була побудована та проаналізована.

Експеримент з кутом падіння та відстанню. Другий експеримент в основному вивчав закони інтенсивності лазерного відбиття, що реагують на кут падіння та зміну відстані зразків при двох вмістах вологи, які були розраховані як процес у першому експерименті. Для очевидного порівняння вміст вологи в двох було менше 2 % і вище 4 % відповідно. Зразки розміщувалися на вимірювальних відстанях 2, 4, 6, 8, 10 м відповідно. На кожній відстані їх обертали з кроком 10° згідно з документом (рис. 1.11) від 0° до 80° під час моніторингу.

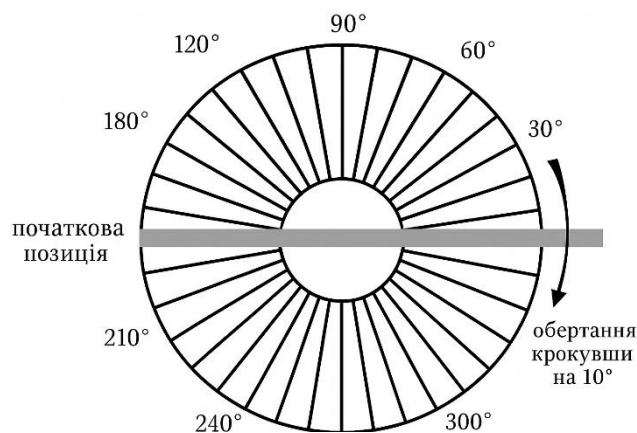


Рисунок 1.11 – Принципова схема обертання

Процес прийому повернутого лазерного імпульсу відповідає рівнянню радіолокаційної дальності, яке показує співвідношення між отриманою потужністю, кутом падіння та відстанню, наступним чином [14]:

$$P_r = \frac{C p \cos \theta}{R^2},$$

$$C = \frac{P_t D_r^2 \eta_{sys}}{4},$$

де P_p – отримана потужність лазера;

P_m – передається лазерна потужність;

D_p – діаметр отвору приймача;

η_{sys} – коефіцієнт передачі оптичної системи радіолокаційної системи;
 ρ – середній коефіцієнт відбиття розширеної цілі;
 R – відстань;
 θ – кут падіння.

Оскільки метод прийому лазерного імпульсу 3D-лазерного сканера подібний до методу радіолокаційної системи, рівняння можна використовувати для опису процесу прийому лазерного імпульсу 3D-лазерного сканера. В середині приймача отримана потужність лазера перетворюється на інтенсивність лазера, тому можна вважати, що між ними існує функціональний зв'язок:

$$I = f(P_r) = f(\theta R).$$

Але цей зв'язок різний у різних системах прийому. Припускаючи, що модель перетворення є поліноміальною моделлю, композитні співвідношення були встановлені між інтенсивністю лазерного відбиття та кутом падіння, а також відстанню зразків при двох різних вмістах вологи, вони були виражені як:

$$I = \lambda_1 + \lambda_2 R + \lambda_3 \theta + \lambda_4 R^2 + \lambda_5 \theta^2.$$

Потім, на основі вибраного стандарту нормалізації, також були встановлені моделі корекції для корекції даних інтенсивності лазера. Їх основними формами були:

$$I/I_0 = f(\theta R),$$

$$I_{cor} = \frac{I}{C},$$

де θ – радіани кутів падіння,

I – інтенсивність відбиття лазера при різних кутах падіння та відстанях до корекції;

I_0 – вибрана стандартна інтенсивність стандартного кута падіння та відстані,

$I_{кор}$ – скоригована інтенсивність лазера різних кутів падіння та відстаней,

$f(\theta, P)$ – встановлена функція корекції,

C – поправочним коефіцієнтом, отриманим з $f(\theta, P)$.

експеримент точності.

Щоб вивчити точність методу, вміст вологи, отриманий за допомогою лазерного сканування, порівнювали з фактичним вмістом вологи в кожному зразку. Кут падіння та відстань були встановлені на 0° та 4 м. Після кожного сканування зразок також зважували, і подальший процес був таким же, як і в першому експерименті.

Температура навколишнього середовища та вологість трьох експериментів були однаковими, тоді як метод сканування був іншим (рис. 1.12).

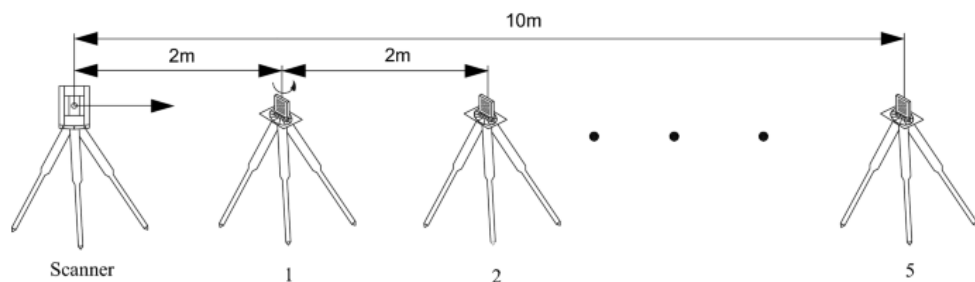


Рисунок 1.12 – Принципова схема моніторингу

1.11 Проблеми з LIDAR

По суті, LiDAR – це пристрій визначення дальності, який вимірює відстань до цілі. Відстань вимірюється шляхом надсилання короткого лазерного імпульсу та запису проміжку часу між вихідним світловим імпульсом і виявленням відбитого (зворотно розсіяного) світлового імпульсу.

Операційні системи LiDAR стикаються з кількома добре відомими проблемами, які можуть відрізнятися залежно від конкретного типу системи [15]. Деякі поширені приклади включають:

- ізоляція сигналу та відхилення: випромінюваний зондуючий промінь зазвичай набагато міцніший за зворотний промінь. Важливо запобігти відбиттю або розсіюванню зондуючого променя назад у приймач, оскільки це може наситити детектор і запобігти його ідентифікації зовнішніх ціле;

- фальшиве повернення з атмосферного сміття: частинки або уламки в атмосфері між передавачем і передбачуваними цілями можуть виробляти сильні небажані сигнали. Ці помилкові повернення можуть заважати надійному виявленню фактичної цілі;

- оптичні обмеження потужності: більша потужність променя підвищує точність, але збільшує експлуатаційні витрати. Балансування потужності та вартості є ключовим фактором для розробників систем LiDAR;

- швидкість і безпека сканування: швидке сканування може викликати занепокоєння щодо безпеки, якщо лазер працює на частотах, шкідливих для людських очей. Такі рішення, як спалах LiDAR, який освітлює велику площу одночасно та використовує безпечні для очей довжини хвиль, допомагають вирішити ці проблеми безпеки;

- перехресні перешкоди пристрою: сигнали від сусідніх пристроїв LiDAR можуть заважати один одному, що ускладнює розрізнення різних джерел. Для подолання цієї проблеми розробляються такі методи, як цвірінкання сигналу та покращена ізоляція;

- вартість та обслуговування: системи LiDAR, як правило, дорожчі, ніж деякі інші сенсорні технології. Однак поточна розробка спрямована на зниження витрат і підвищення доступності LiDAR для більш широкого використання;

- відхилення повернень від ненавмисних об'єктів: небажані сигнали також можуть виникати в чистому повітрі, а не лише за наявності атмосферного сміття. Вирішення цього часто передбачає мінімізацію розміру

променя на різних цільових відстанях і оптимізацію поля зору приймача для кращого відфільтрування нерелевантних сигналів.

2 3D-ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ В НАВІГАЦІЇ

Подорожі автомобілем наразі є однією з найнебезпечніших форм транспорту, навіть незважаючи на те, що системи пасивної та активної безпеки зменшили кількість смертельних аварій у останні роки. Автономне водіння спрямоване на значне скорочення цього показника, особливо для аварій, спричинених помилками водія. Потік руху також виграє від того, що автономні транспортні засоби дотримуються спільної поведінки на дорозі (ситуації «стоп та вперед» у щільному русі переважно спричинені індивідуальною поведінкою водіїв).

Для вищезгаданих завдань необхідним є 3D-представлення навколишнього середовища. З технічної точки зору визначення 3D-інформації здійснюється за допомогою різноманітних сенсорів. Найінтуїтивнішими сенсорами є стереокамери, оскільки вони пов'язані з людським зором. Однак необхідно розв'язати три проблеми. По-перше, обчислення потребує великої потужності, оскільки потрібно визначати кореляції на двох зображеннях з різних перспектив. По-друге, неможливо виміряти відстані до безструктурних поверхонь, якщо проєкція об'єкта більша за поле зору камери. Ця проблема виникає через неоднозначність при зіставленні елементів шаблону, що спостерігається через апертуру. Нарешті, пасивний візуальний сенсор має справлятися з ефектами тіней та змінами освітлення з часом.

Цих проблем можна уникнути, використовуючи активні 3D-сенсори. Хоча існують інші компроміси, з якими доводиться миритися, такі як більша витрата енергії або менша дальність, для багатьох завдань в автономній робототехніці переваги активних сенсорів перевищують недоліки, особливо в даному випадку, коли автомобіль є великою роботизованою платформою.

2.1 Обертовий 3D-лазерний сканер

Розглянемо безперервно обертовий 3D-лазерний сканер, який може застосований для систем автономного керування автомобілем як сенсор для систем автономного керування автомобіля (рис. 2.1). До сканера входять два промислові лазерні далекоміри, які обертаються навколо вертикальної осі системи, 360 градусів отримуючи інформацію про глибину та інтенсивність у полі зору. Якщо систему встановити на даху автомобіля, її можна використовувати для виявлення доріг, перехресть та перешкод. Цей процес виявлення є надійнішим, об'єднуючи інформацію про відстань та інтенсивність, отриману відбитим випромінюванням [16].



Рисунок 2.1 – 3D-сканер Arplanix LV220

Така система була обробована, компанією EMC для використання в системах дистанційного керування автомобілем по електропроводці. Автомобіль оснащений набором датчиків, починаючи з GPS-навігаційної системи з інерційним блоком, здатним забезпечити точність позиціонування понад 1 м. Обрана система – це GPS-навігатор Arplanix LV220.

Окрім системи позиціонування, використовує відеокамери для ідентифікації дорожніх смуг та лазерні сканери для виявлення перешкод. Одним із таких лазерних сканерів для виявлення перешкод є Ibeo Alasca XT, встановлений на передньому бампері. Для отримання ширшого поля зору, особливо на перехрестях, використовується 3D-лазерний сканер від Fraunhofer. Fraunhofer 3DLS-K складається з двох промислових лазерних далекомірів, що обертаються навколо вертикальної осі системи та отримують інформацію про глибину та інтенсивність для поля зору 360° градусів. Роздільна здатність сканування залежить від швидкості обертання та кутового регулювання сканерів. При кутовому регулюванні 60° та частоті обертання 0,45 Гц отримуємо вертикальну роздільну здатність $0,5^\circ$ та горизонтальну роздільну здатність $1,7^\circ$, а з частотою оновлення 0,9 Гц. Максимальна дальність становить 80 м. Для постобробки даних лазерного сканера використовується окремий керуючий ПК. Це ПК Intel з двоядерним процесором, інтерфейсом RS232 та двома USB для зв'язку з 3DLS. Вхідний інтерфейс Ethernet використовується для зв'язку із системою керування автомобілем. Що стосується лазерного сканера Velodyne, описана система надає набагато менше інформації про навколишнє середовище, а її швидкість оновлення, безумовно, повільніша. Однак є деякі аспекти, які дозволяють вважати цей лазерний сканер гарним вибором. Поле зору може бути легко налаштовано користувачем (від сфери до тора), що дає можливість зосередитися на обмеженій області. У Velodyne значна частина поблизу транспортного засобу обрізається через фіксоване поле зору, починаючи з $-24,8^\circ$ відносно горизонту. Калібрування дуже просте, оскільки вимагає лише одного разу встановити загальні параметри (такі як відстань/орієнтація відносно центру), і вони дійсні доти, доки лазерний сканер не рухається. Такі програми, як аналіз перехресть, не потребують дуже швидкої швидкості оновлення, оскільки транспортні засоби рухаються відносно повільно поблизу перехресть, коли не стоять на місці. Останній аспект не є суто технічним, але все ж дуже важливий: система,

описана в цій статті, є доступною не лише для найбагатших команд, демонструючи дуже конкурентне співвідношення ціни та якості.

2.2 Специфікація програмного забезпечення обертового 3D-лазера

FAIRlib, Бібліотека Автономної Інтелектуальної Робототехніки Fraunhofer, є новим репозиторієм програмного забезпечення для роботів, розробленим Fraunhofer IAIS. Основна мета – мати спільну, незалежну від платформи програмну бібліотеку для використання в різних проектах. Це забезпечує можливість використання одного й того ж коду в різних ситуаціях та на різних платформах. Створення цієї бібліотеки дозволило використовувати ті самі класи та алгоритми для вирішення однакових задач у різних сценаріях, що сприяє повторному використанню компонентів та швидшій розробці робототехнічних застосунків за рахунок використання існуючих функцій.

1) 3D-відтворення: два обертові сканери безперервно збирають масиви даних і передають їх до програмного забезпечення. Дані зі сканера представлені в полярних координатах. Значення в масиві даних представляє відстань, а індекс у масиві представляє кут у градусах. Перше перетворення відбувається з полярних координат (d, θ) у декартові координати (x, y) , з додаванням зсуву λ , визначеного положенням центру всієї системи, як детально описано в рівнянні:

$$\begin{aligned}x &= d\sin(\alpha) + \lambda, \\y &= d\cos(\alpha).\end{aligned}$$

Через кутовий нахил двох сканерів виникає потреба перетворити 2D-точки в площині сканування у 3D-точки в світових координатах. Це здійснюється у два етапи. Спершу точки обертаються навколо осі x на кут 60° (у нашій системі), як виражено у рівнянні:

$$\begin{aligned}x' &= x = d \sin(\alpha) + \lambda, \\y' &= -y \sin(\theta) = -d \cos(\alpha) \sin(\theta), \\z' &= y \cos(\theta) = d \cos(\alpha) \cos(\theta).\end{aligned}$$

Наступним кроком є розгляд повороту сканера з нульового положення навколо осі z на кут β , як детально описано в рівнянні:

$$\begin{aligned}x'' &= x' \cos(\beta) - y' \sin(\beta) = (d \sin(\alpha) + \lambda) \cos(\beta) + d \cos(\alpha) \sin(\theta) \sin(\beta), \\y'' &= x' \sin(\beta) + y' \cos(\beta) = (d \sin(\alpha) + \lambda) \sin(\beta) - d \cos(\alpha) \sin(\theta) \cos(\beta), \\z'' &= z' = d \cos(\alpha) \cos(\theta).\end{aligned}$$

Важливо враховувати, що кут не є сталим протягом часу, необхідного для отримання одного сканування, оскільки сканери постійно обертаються. Тому для кожного індексу в масиві вимірювань було враховано зсув, спричинений обертанням системи.

Зазначені формули можна застосовувати безпосередньо, якщо система не рухається. Якщо система рухається, ми розраховуємо додаткові корекції траєкторії для відображення хмари точок у світових координатах, використовуючи інформацію про положення, надану системою Arplanix. Надана інформація представляє позицію та орієнтацію автомобіля. Ці дані вводяться в матрицю, яка відображає переміщення по трьох осях (T) та обертання за трьома кутами (тангаж, крен, курс) (R), яка множиться на декартові координати кожної точки:

$$P_{new} = \begin{bmatrix} R & \vec{t} \\ \vec{0} & 1 \end{bmatrix} P,$$

де t – це вектор трансляції;

R – матриця обертання 3×3 .

Основною проблемою була калібрування системи, тобто як зафіксувати нульовий градус орієнтації сканера та як розрахувати його обертання для кожного сканування [17]. Було оцінено різні підходи. Найточнішим виявилось додати індуктивний датчик наближення, позитивний сигнал від якого скидає орієнтацію до нуля. Швидкість обертання відома з певною похибкою, і тому можливо оцінити окремі орієнтації системи для кожного сканування. Хоча постобробка дала б більш точні результати у хмарі точок, оскільки ефективний час для завершення обертання вже відомий, запропонована система здатна успішно виконувати онлайн-завдання.

2.3 Бездротовий доступ обертового 3D-лазера

Наша система, як описано в підрозділі 2.2, є досить інноваційною. Сканер надає два типи даних: значення дальності та значення відбиття. Мета полягала у поєднанні обох типів інформації для створення кращої моделі дороги, підвищення надійності, дальності та типів виявлених доріг у порівнянні зі стандартними методами.

Значення дальності важливі для побудови 3D-моделі оточення, і вони дозволяють розуміти різні об'єкти та різні геометричні фігури в ньому. Вони вважаються основними значеннями для лазерних сканерів, часто їх називають лазерними далекомірами.

Значення відбиття важливі для кращого розуміння взаємозв'язків між 3D-точками, полегшення кластеризації точок та допомагають у розпізнаванні різних поверхонь, матеріалів і об'єктів.

Використання значень відбиття для сегментації доріг є досить корисним, оскільки кінець доріг не завжди легко визначити лише за значеннями дальності. Межі доріг не завжди позначені бар'єрами безпеки або будівлями (або іншими помітними геометричними перешкодами). Іноді, наприклад, існує лише біла лінія, що означає межу дороги, або інколи там трава, на тому ж рівні, що й дорога. Цілком очевидно, що використання лише значень дальності не

допомагає досягненню цілі сегментації дороги і може призвести до абсолютно неправильних результатів.

На основі аналізу окремої площини сканування та індексів сканування в тому ж хмарі було розроблено перший алгоритм для сегментації доріг.

Спочатку розглядаємо кожну площину сканування окремо. У вікні з n точок сканування (тобто $n = 4$) обчислюємо найкраще лінійне наближення та максимальну різницю між інтенсивністю всіх точок у вікні. Це формула для обчислення двох параметрів прямої $y = mx + q$, виражена в рівнянні:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_j \sum_{j=1}^n y_i y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i}{(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - n \sum_{j=1}^n (x_i)^2},$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{j=1}^n (x_i)^2 \sum_{i=1}^n y_i}{(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - n \sum_{i=1}^n (x_i)^2}.$$

Разом із найкращим лінійним наближенням помилка, таким чином, виражається одиночна площина сканування (рис. 2.2, а), площина сканування в системі координат (рисю 2.2, б), геометрія лазерного сканера, встановленого на кутовій пластині (рис. 2.2, в).

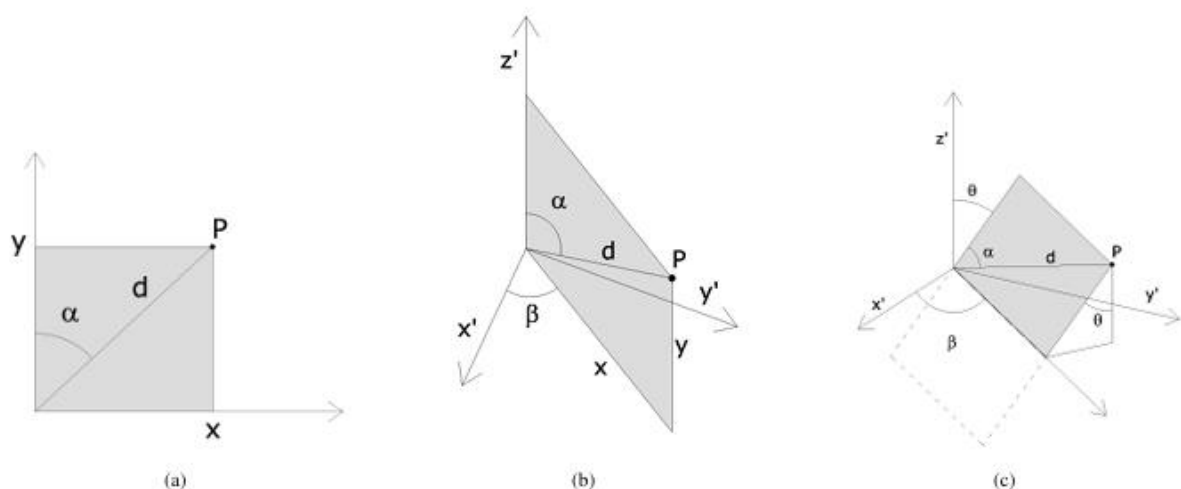


Рисунок 2.2 – Площина сканування

$$\Sigma = \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_j))^2 = (y_1 - (mx_1 + q))^2 + \dots + (mx_n + q)^2 .$$

Точки не належать до дороги, якщо:

- лінійна апроксимація має велику помилку: $E > T$;
- лінійна апроксимація має великий нахил або відстань відносно площини землі: $m > Tm$;
- значення інтенсивності дуже різняться: $I_{max} - I_{min} > Ti$.

Переміщаємо вікно, збільшуючи індекс сканування для кожної сканувальної площини.

Навпаки, якщо помилка лінійної апроксимації та зміна інтенсивності нижчі за обрані пороги, аналізований сегмент, ймовірно, є дорогою. Значення між мінімальним та максимальним порогоми свідчать про можливе закінчення дороги. Значення, що перевищують максимальний поріг, вважаються сильним сигналом про можливе закінчення дороги.

Після цього був розроблений новий алгоритм на основі індексу сканування, а не скануючих площин. Результати були не дуже задовільними, але корисними для внесення деяких незначних змін та оптимізацій у попередньому алгоритмі. Після отримання сегментації для кожного скану вирішили, що інформація про сусідство буде корисною, і застосували аналіз сусідства, використовуючи індекси сканування на точках дороги, щоб відновити поверхню дороги та зменшити шум.

2.4 Аналіз перетинів обертового 3D-лазера

Проблема перехресть є однією з найскладніших проблем для людей. Також для автономних автомобілів це нетривіальна проблема, оскільки алгоритм має почати аналіз у правильний час, а його виконання не повинно перевищувати час, необхідний для отримання нових даних з датчиків (рис. 2.3). Ця проблема також є однією з найважливіших питань щодо безпеки [18].

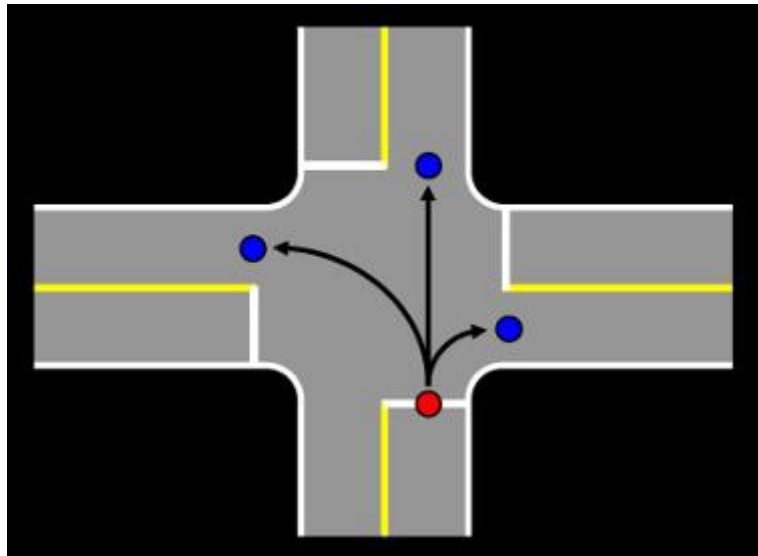


Рисунок 2.3 – Асоціації виходу (червоний) та входу (синій) на перехресті з чотирьохстороннім стопом

Для цієї установки був змонтований 3DLS на звичайному автомобілі, випробовуючи обидві конфігурації — з кутовим регулювальним диском і без нього. Було протестовано як алгоритм сегментації дороги, так і аналіз перехресть. На рис. 2.4 можна побачити приклад результатів нашої сегментації дороги. У 3D-хмарі точок виявлена дорога пофарбована в червоний колір. Система показала загалом хорошу продуктивність, ефективно розпізнаючи точки, що належать вулиці.

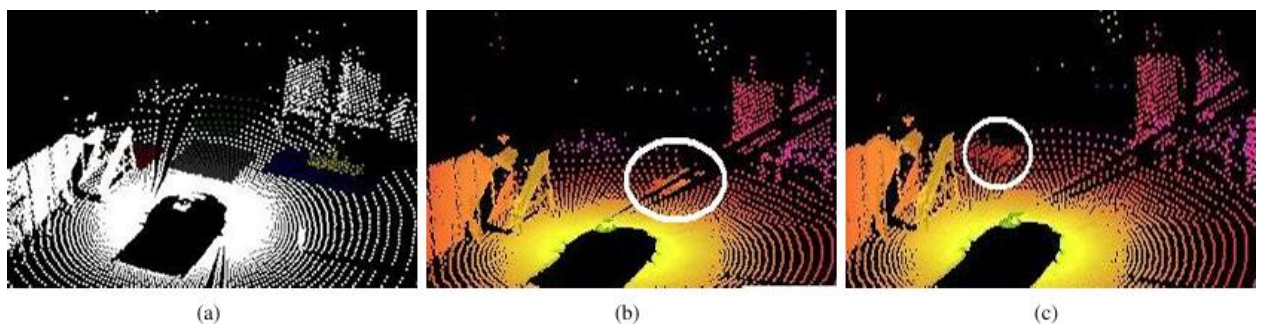


Рисунок 2.4 – Сегментація дороги у 3D-хмарі

Проблема виникла на кінці підйому, з істотною різницею профілю у скануванні разом із різними значеннями інтенсивності. Остання різниця була спричинена неоднорідним асфальтом на кінці схилу. У такій ситуації система розпізнає дві різні проїзні зони, між якими немає перешкод, що перекривають рух, що є цілком обґрунтованою сегментацією. Для аналізу перехрестя ми реалізували та записали двадцять різних базових ситуацій. Після аналізу ми також комбінували різні скани з різних хмар точок, щоб штучно створити інші ситуації для тестування алгоритму. У всіх випадках алгоритм зміг визначити правильний час для в'їзду на перехрестя.

2.5 3D-датчики в автомобілях — шлях до автоматизованого керування

Можливість створити комплексну 3D-карту навколишнього середовища та об'єктів у ньому передбачає захоплення широкого спектра даних — від того, що відбувається за сотні метрів від дороги, до того, наскільки уважний водій. Однією з ключових технологій для далекого та короткого сканування є LiDAR (світловиявлення та визначення дальності), (рис. 2.5) який фактично фіксує більш детальну інформацію та забезпечує більшу точність порівняно з традиційними сканувальними сенсорами, такими як радар і камера. За даними Національної адміністрації безпеки дорожнього руху (NHTSA), автоматизована система водіння повинна мати змогу контролювати середовище водіння на рівнях 3-5 автономного водіння з мінімальним або відсутнім участю людини. Для сканування в салоні нещодавній обов'язок Euro NCAP (Європейська програма оцінки нових автомобілів) для систем моніторингу водія (DMS) вже на шляху до того, щоб стати стандартом безпеки в Європі для автомобілів наступного покоління [19].



Рисунок 2.5 – Автомобільні 3D-сенсори

Діодні лазери є економічно вигідним способом впровадження передових систем допомоги водієві (ADAS), включно з лідаром на великі та короткі відстані, а також датчики на близькій відстані в салоні.

1. Далекобійний LiDAR (200 м): використовує вузький конус світла для виявлення об'єктів попереду апарата, з дальністю до 200 м. Він надає дані, що використовуються для виявлення пішоходів, уникнення зіткнень та екстреного гальмування.

2. Короткодіапазонний LiDAR (від 10 м до 50 м): використовується для сканування території навколо бамперів. Він використовується не лише для виявлення об'єктів, а й для їх ідентифікації. Наприклад, це може допомогти транспортному засобу розрізнити пожежний гідрант і дитину, що стоїть біля бордюру.

3. Датчики в салоні: збираючи дані про водія та пасажирів, датчики в салоні дозволяють контролювати водія; тобто, чи водій свідомо стежить за дорогою, чи відволікається чи сонний. Датчики в салоні також дозволяють підтримувати розпізнавання жестів для навігації, зв'язку та інформаційно-розважальних систем у салоні.

2.6 3D-лазерний датчик швидкості (LVS)

LVS — це наземна адаптація LUNA (Laser Unit for Navigation Aid), космічної навігаційної технології, спочатку розробленої для автономних посадок на Місяць. LUNA забезпечує надійну навігацію в суворих умовах космосу, надаючи точну тривимірну інформацію про швидкість і висоту відносно поверхні Місяця. Результат кількох років досліджень і розробок, Luna буде продемонстрована на посадковому модулі Nova-C компанії Intuitive Machines у рамках програми NASA Commercial Lunar Payload Services (CLPS). Використовуючи інженерні знання, отримані з LUNA, LVS перетворює космічні технології на наземне рішення для навігації, відмовленої GNSS.

Окрім ролі засобу швидкості, LVS також підвищує стійкість навігації, виявляючи підробку GNSS. Порівнюючи незалежні вимірювання швидкості з швидкістю, отриманою за допомогою GNSS, LVS додає додатковий рівень безпеки до стратегій гарантованого позиціонування, навігації та таймінгу (APNT). При інтеграції з інерціальною навігаційною системою (INS), такою як висококласний комерційний волоконно-оптичний гіроскоп Advanced Navigation — Boreas D90, LVS значно покращує навігаційні характеристики. Демонстрації з передсерійним LVS-пристроєм, інтегрованим з Boreas D90 — з навігаційним фільтром наступного покоління Advanced Navigation — показали гідропродуктивність навігації, відмовлену GNSS, з похибкою приблизно 0,05 % відносно загальної пройденої відстані.

LVS здійснює вимірювання швидкості в корпусі сенсора. Для використання в навігації ці значення мають бути перетворені у глобальну систему відліку. Для цього потрібні знання про такі характеристики:

- а) положення (курс, тангаж і крен);
- б) початкове положення (широта та довгота).

Точне узгодження між системами відліку LVS та INS є критично важливим. Неправильне вирівнювання може призвести до помилок у трансляції швидкості від корпусної системи до глобальної системи.

Автоматичне вирівнювання можливе, коли доступна високоточна опорна позиція, наприклад, GNSS з RTK або PPK корекціями [20]. Щільна інтеграція між LVS і INS із використанням точних напрямних для кріплення також може використовуватися для вирівнювання двох датчиків, якщо автоматичне вирівнювання за допомогою GNSS непрактичне.

Подібно до інших навігаційних датчиків, продуктивність LVS може залежати від помилок масштабного коефіцієнта (наприклад, через невизначеність у орієнтації лазерів або робочій частоті лазера). На щастя, точні методи калібрування та компенсації гарантують, що похибки коефіцієнта масштабу залишаються нижче 100 ppm (0,01 %).

2.7 Принцип роботи LVS

LVS використовує релятивістський ефект Доплера для надзвичайної точності швидкості. Принцип простий: коли лазерний промінь відбивається від поверхні, його частота змінюється пропорційно швидкості датчика відносно цієї поверхні. Величина цього зсуву частоти, Δf , задається формулою:

$$\Delta f = \frac{2\Delta v}{\lambda}.$$

де Δf – зміна частоти, спричинена ефектом Доплера;

Δv – відносна швидкість між випромінювачем і мішенню;

λ – довжина хвилі;

Множник 2 у формулі зумовлений тим, що лазерна хвиля зазнає доплерівського зсуву частоти при відбитті, а потім знову при виявленні.

Формула підкреслює ключову перевагу LVS над доплерівським радаром: використання лазерів, які працюють на значно коротших довжинах хвиль (вищих частотах). Для порівняння, лазери С-діапазону з несучою частотою 200 ТГц у 10 000 разів чутливіші за радар К-діапазону, який працює приблизно на 20 ГГц. З точністю швидкості близько 10 мм/с і точністю міліметрів за секунду,

LVS значно перевершує звичайні датчики швидкості. Хоча всі вимірювання швидкості за своєю суттю містять певний шум, LVS суттєво зменшує дрейф, який обмежує продуктивність традиційних інерціальних навігаційних рішень.

2.8 Конфігурація лазерного датчика швидкості

Усі випробування наземних транспортних засобів проводилися на Tesla Model Y. Boreas D90 INS був закріплений у «фрунку» (передньому багажнику) автомобіля поруч із «сенсорним корпусом» LVS. Одна антена GNSS була встановлена на верхній частині апарата за допомогою всмоктувального кріплення як орієнтир [21]. «Сенсорна головка» LVS була встановлена спереду автомобіля за допомогою спеціально виготовленого кріплення для забезпечення прямого огляду до дорожнього покриття перед автомобілем. Корпус сенсора LVS з'єднується з головою датчика за допомогою оптичних волокон. Сенсорна головка електронно пасивна і випромінює менше 3 мВт інфрачервоного лазерного світла з трьох різних апертур. LVS є безпечним для очей (клас 1), тому заходи безпеки не потрібні.

LVS була підключена до Boreas D90 через Ethernet у мережевій конфігурації. Усі навігаційні дані, включно з зовнішніми 3D-пакетами відносної швидкості тіла, які надсилаються до INS з LVS, зберігаються у енергонезалежній пам'яті на Boreas D90. Система живилася від однієї батареї на 18 В. Конфігурація інтегрованої системи показана на (рис.2.6).

Погано налаштована INS може суттєво погіршити навігаційні характеристики в польових умовах. Два важливі параметри, які потрібно налаштувати: а) зсуви антени GNSS та б) зміщення головки датчика LVS відносно інерційної системи INS.

Просторові зсуви між системою відліку INS, антеною GNSS та головою сенсора LVS вимірювалися з приблизною точністю 10 мм. У випадку LVS також необхідно враховувати відносну орієнтацію (крену, тангаж і ривання) головки сенсора відносно INS.

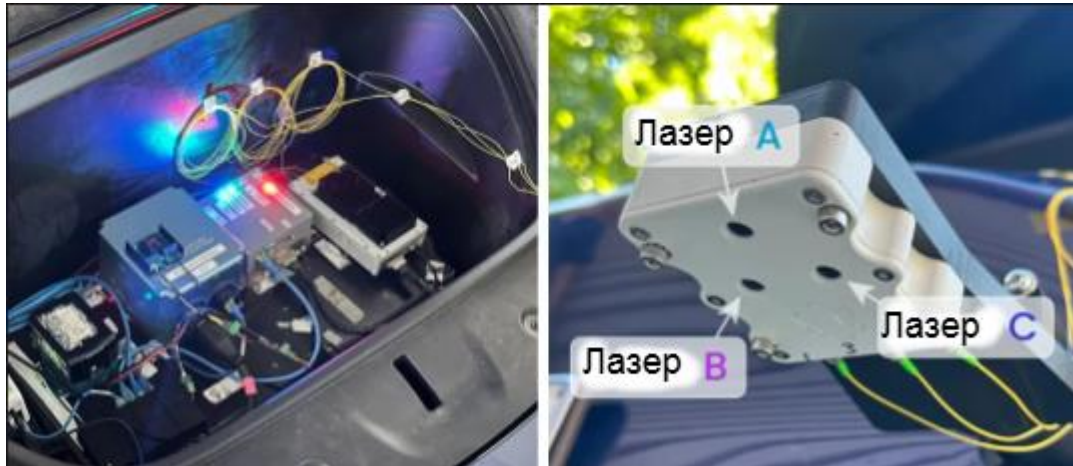


Рисунок 2.6 – Сенсорна головка LVS

Це надзвичайно складно оцінити на місці. Отже, відносна орієнтація оцінювалася на основі даних, зібраних у результаті тесту «випробування». Автоматичне вирівнювання цих параметрів можливе за допомогою комбінації RTK GNSS та сирих даних сенсорів INS і LVS. Зміщення тангажу, крену та вирівнювання ризання LVS автоматично розраховувалися на основі одного випробувального двигуна з точністю $0,01^\circ$. Початкове розвалювання LVS оновлювалося один раз під час тестування через підозру на зміщення сенсорної головки LVS, яка могла бути пошкоджена в якийсь момент тижневої кампанії.

2.9 Навігація GNSS з 3D-лазерним датчиком швидкості (LVS)

Цей тест складався з маршруту навколо Парламентського трикутника з використанням LVS і Boreas D90 з відмовленою GNSS роботою. Ця траса включає довгі прямі ділянки з швидшою їздою, а також повільнішим рухом, зупинками, поворотами та круговими розв'язками. Траса довжиною 19,2 км тривала 35 хв 15 с, з зафіксованою помилкою 3,5 м порівняно з референсною тракою GNSS. Це відповідає вражаючій помилці на пройдену відстань лише

0,018 %. Як видно на супутниковому знімку, наприкінці цієї 19,2-кілометрової подорожі транспортний засіб все ще знаходиться на тій самій смузі руху.

З рис. 2.7 видно, що максимальна похибка положення у 18 м виникла приблизно через 9 км після початку тесту. На 9-му кілометрі тестовий автомобіль мав пройти безліч будівельних зон. На рис. 2.8 показано еволюцію помилки положення на пройденій відстані, де стрибки в позиції RSE призводять до стрибків EPD [22].

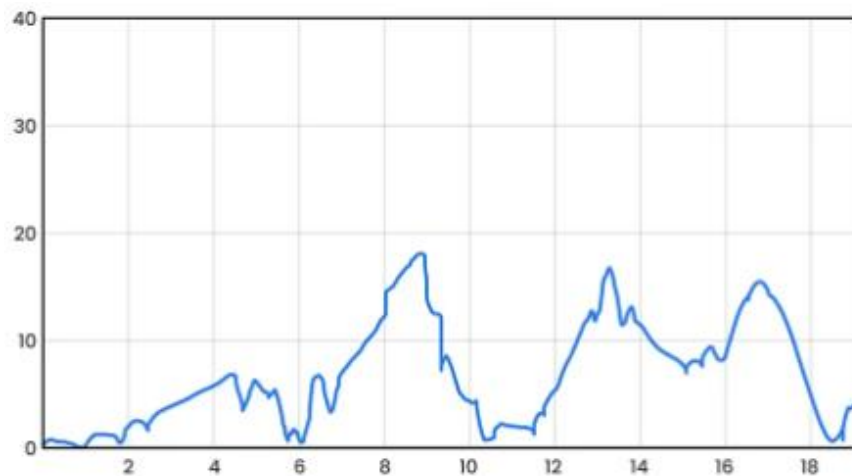


Рисунок 2.7 – Квадратична похибка кореня позиції INS

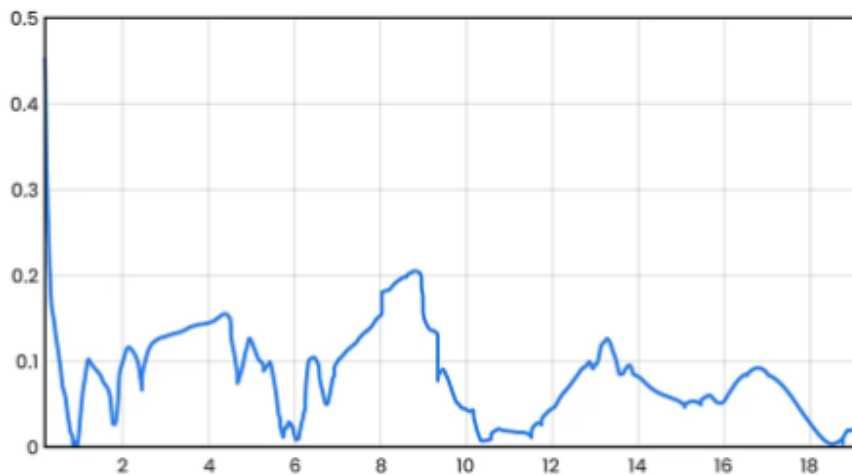


Рисунок 2.8 – Помилка позиції INS та LVS

Результати демонструють високий рівень точності та послідовності у оцінці позиції. У межах дисків 1-3 EPD у середньому становив 0,082 %, що відповідає середній похибці позиції 5,91 м. Після переналаштування диски 4–5 показали ще більшу точність, у середньому похибку 0,048 % і нижчу середню похибку положення 3,44 м, що ще більше підтверджує надійність системи. У всіх тестах похибка положення залишалася низькою, із загальним середнім значенням 4,92 м і стандартним відхиленням лише 1,79 м, що підкреслює стабільну продуктивність.

Метрики помилок цих тестів включені до табл. 2.1, яка показує стабільно низький кінцевий EPD 0,065 % та мінімальну варіативність RMSE між тестами. Диски 4-5 дали найкращі результати, з остаточною похибкою 0,048 %, тоді як навіть найвищі помилки в тестах 2-3 залишалися нижче 0,105 %, що демонструє високу стійкість системи. Низьке стандартне відхилення у всіх тестах свідчить про стабільне поширення помилок, що забезпечує повторювану та передбачувану ефективність мертвого розрахунку (рис. 2.9).

Таблиця 2.1 – Імпульсний далекомір як складовий модуль 3D-лазерного сканера

Тести	Кінець тесту	PMSE	Стандартне відхилення
1	5,09	2,03	1,18
2	7,02	3,61	2,46
3	7,63	3,24	2,05
1-3	5,91	3,04	1,61
4	3,85	2,35	1,30
5	3,03	2,61	1,47
4-5	3,44	2,49	1,32
Усі	4,92	2,82	1,79

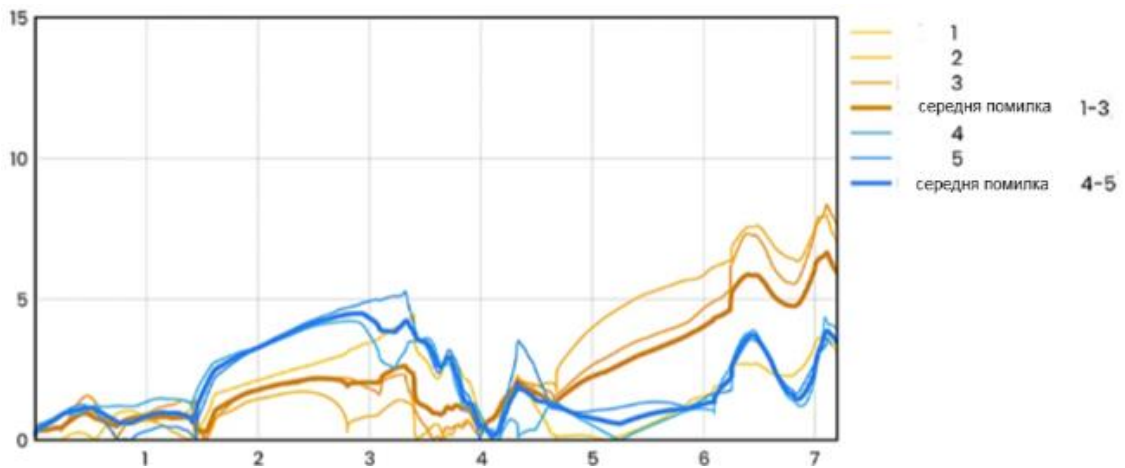


Рисунок 2.9 – Квадрат похибки кореня позиції INS щодо пройденної відстані для 5-ти повторних схем мертвого розрахунку з Boreas D90 і LVS

2.10 Чотиришаровий лазерний сенсор

Для розроблення методу, що забезпечує виявлення пішоходів у зовнішніх умовах на основі чотиришарового лазерного сенсора, подібного до пристрою, створеного компанією ІВЕО, ми спиралися на низку робіт, наведених у бібліографії (рис. 2.10). За відсутності попередніх відомостей про кількість об'єктів у спостережуваній сцені було обрано алгоритм сегментації та класифікації [23], який групує лазерні вимірювання та класифікує їх у певні геометричні класи, залишаючи лише ті об'єкти, що мають форму, характерну для пішохода.

Наш підхід передбачає новий принцип, що полягає у використанні інформації з усіх чотирьох лазерних площин до ухвалення остаточного рішення. У запропонованому алгоритмі застосовано метод Парзена, для попереднього виділення об'єктів-пішоходів у кожній площині, після чого результати об'єднуються. На відміну від підходу Цуя та його колег, метод Парзена використовується для виявлення пішоходів без акценту на конкретні частини тіла (наприклад, ноги). Крім того, оригінальність полягає у використанні гаусового ядра, яке містить геометричну інформацію, властиву формі пішохода.



Рисунок 2.10 – Лазерний сканер IBEO ALASCA XT та тестовий автомобіль Renault

Щоб підвищити ефективність алгоритмів виявлення пішоходів на основі датчика з одним лазерним шаром, запропонована ідея дозволяє компенсувати відсутню інформацію в деяких шарах у момент часу t за допомогою інших. Також помилкові вимірювання в одному або двох шарах можуть бути відкинуті на основі даних з решти шарів. У результаті загальна точність виявлення підвищується.

Для відстеження пішоходів з рухомого транспортного засобу використано фільтр частинок типу SIR PF [24], оскільки він продемонстрував високу ефективність у ситуаціях зі змінною кількістю цілей та відсутністю апріорних відомостей щодо траєкторії руху пішохода. Загальний огляд алгоритму наведено на (рис. 2.11).

Лазерний сенсор забезпечує кутову роздільну здатність $0,5^\circ$, що відповідає 300-м вимірюванням на канал за один скан. Кут огляду кожної скануючої площини становить приблизно $3,2^\circ$. Дві відеокамери типу SMAL, встановлені на даху транспортного засобу (див. рис. 2.10), одночасно реєструють сцену.

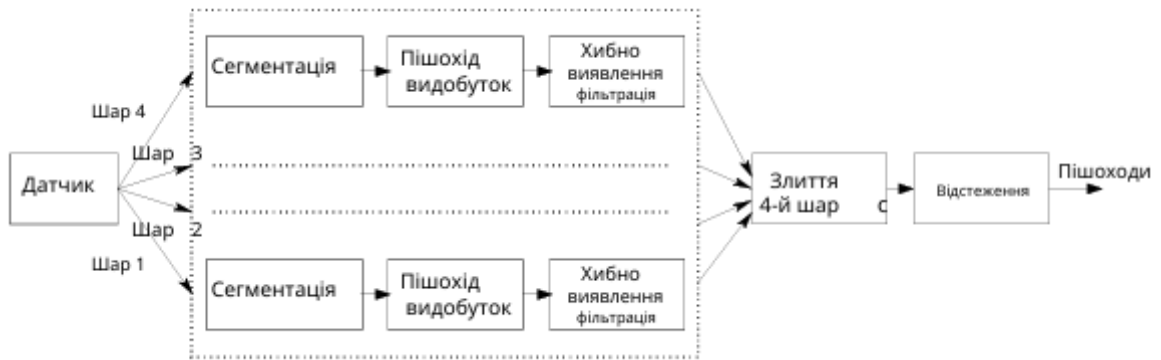


Рисунок 2.11 – Алгоритм виявлення пішоходів з використанням багат шарового датчика

Використовуючи лазерне сканування, система повинна на основі положення лазерних точок сформувати непараметричне представлення функції правдоподібності. Отже, складність цієї моделі безпосередньо залежатиме від припущень, зроблених щодо форми пішохода, зафіксованого на лазерному зображенні. Щоб розв'язати цю проблему, ми пропонуємо оригінальний підхід до побудови непараметричної моделі на основі ядерних функцій, що дає змогу здійснювати розумний вибір найрелевантніших 2D лазерних точок за допомогою функції аналізу правдоподібності. Дискримінаційна функція правдоподібності дозволяє класифікувати кожен лазерну точку як таку, що належить до центру мас пішохода, або як точку іншого типу. Метод не потребує попередніх знань для обробки лазерного сканування (рис. 2.12).

Позначимо:

$$z = \{z_k\} k = 1, \dots, N_a,$$

де вектор, що містить 2D-вимірювання лазера, які не були відфільтровані модулем сегментації в межах однієї лазерної площини. Визначаємо випадкову змінну Бернуллі:

$$\omega_k \in \{\omega_1, \omega_2\},$$

де $\omega_k = \omega_1$, якщо відповідна подія класифікується як центр мас пішохода, і $\omega_k = \omega_2$ в усіх інших випадках.



Рисунок 2.12 – Алгоритм відстеження пішоходів

2.11 Класифікація помилок в даних наземного лазерного сканування

Усі похибки, що виникають під час визначення величин за допомогою лазерного сканування, умовно поділяють на дві основні категорії:

- інструментальні, що пов'язані з якістю складання та юстування оптичних, механічних і електронних вузлів сканувального обладнання;
- методичні, які обумовлені особливостями самого способу вимірювання лазерним сканером.

Похибки першого типу зазвичай вказані в технічній документації пристрою. Вони встановлюються спочатку під час виготовлення й налаштування сканера, а згодом перевіряються під час регулярних калібрувань та метрологічних випробувань. Метою цих процедур є визначення того, чи відповідають параметри точності окремих модулів приладу заявленим нормам.

Інструментальні похибки, як правило, усувають лише через заміну окремих компонентів або вдосконалення технології їх виробництва.

Методичні похибки здебільшого враховують під час подальшої обробки даних вимірювання. Для наземної лазерної зйомки їх зазвичай поділяють на такі групи:

- похибки, спричинені впливом довкілля (атмосферною рефракцією, зменшенням інтенсивності електромагнітних хвиль, вібраціями обладнання тощо);

- похибки, пов'язані з властивостями об'єкта сканування (його формою, орієнтацією у просторі, кольором, структурою поверхні тощо).

2.12 Інструментальні помилки наземних лазерних сканерів

Використання в наземних лазерних сканерах лазерів, що працюють у безперервному режимі або генерують імпульси з високою частотою, призводить до нагрівання як самого випромінювача, так і внутрішнього простору приладу. З цієї причини виробники оснащують сканери системами охолодження, відсутність яких може спричинити такі наслідки:

- через постійні цикли перегрівання (вище допустимих значень) та охолодження можливі деформації обертових і вимірювальних елементів, що знижує точність даних між окремими запусканнями приладу та скорочує строк його експлуатації;

- надмірне нагрівання може призвести до заклинювання рухомих вузлів, що створює ризик повного виходу сканера з ладу.

У конструкціях лазерних сканерів зазвичай застосовують два типи охолоджувальних систем:

- повітряне охолодження, яке ґрунтується на подачі зовнішнього холодного повітря всередину пристрою та відведенні нагрітого назовні. Такі системи формуються з решітки вентиляторів, що забезпечують необхідну

циркуляцію. Основним недоліком цього підходу є відсутність герметичності сканера, що знижує рівень його захисту від пилу та вологи.

– внутрішня система охолодження, у якій як робоче середовище використовується газ, найчастіше азот.

Для роботи таких систем застосовують криогенні насоси. У більшості наземних сканерів використовують вакуумні насоси, принцип дії яких полягає в тому, що газ, який відкачується, поглинається поверхнями, охолодженими до наднизьких температур. Ефективність охолоджувальної системи безпосередньо впливає на стабільність функціонування лазерного сканера.

Точність вимірювання відстаней імпульсним методом визначається похибками у фіксації часу проходження імпульсу та у визначенні швидкості поширення електромагнітних хвиль. Значення швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль у середовищі обчислюють за формулою:

$$v = \frac{c}{n}$$

де c – швидкість світла у вакуумі, затверджена Міжнародним геодезичним та геофізичним союзом і становить $299\,792\,458 \pm 1,2$ м/с;

n – показник заломлення повітря, значення якого визначається фізичними параметрами атмосфери — температурою, тиском, вологістю, а також довжиною електромагнітної хвилі.

Сьогодні для обчислення швидкості поширення електромагнітних хвиль у вакуумі використовують непрямий фізичний підхід, що базується на такій залежності:

$$c = \lambda_v f_v$$

де λ_v – довжина електромагнітної хвилі у вакуумі;

f_v – частота електромагнітного коливання.

Застосування непрямого методу дало змогу визначити швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі з відносною похибкою 3×10^{-9} .

Похибка вимірювання відстані фазовим методом за умови використання різних підходів для розв'язання задачі неоднозначності визначається за такою формулою:

$$m_R = \sqrt{m_c^2 + \left(\frac{v}{4\pi f}\right)^2 m_\phi^2 + R^2 \left[\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_v}{v}\right)^2\right]},$$

де m_c – помилка визначення постійної виправлення приладу;

m_ϕ – помилка визначення різниці фаз між опорним та робочим сигналами;

m_f – помилка, спричинена відмінністю масштабної частоти від номінального значення;

m_v – помилка визначення швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі у атмосфері.

У сканерах компаній Riegl, Leica, Zoller+Fröhlich та інших фірм для здійснення горизонтального та вертикального сканування застосовується безперервне обертання призми й оптичної головки. Під час цього обертання лазерне джерело випромінює промінь на призму, яка перенаправляє його на об'єкт. Після відбиття від поверхні об'єкта промінь повертається до приймального модуля. Оскільки призма та оптична головка обертаються безперервно, за час проходження сигналу від сканера до об'єкта і назад значення відліків по вертикальному та горизонтальному колах змінюються на кути $\Delta\varphi$ та $\Delta\theta$. Це ставить питання про те, у якій саме момент необхідно фіксувати значення кутових координат.

- 1) θ_{out} – у момент подачі сигналу на джерело лазерного випромінювання;
- 2) θ_{in} – у момент прийому відбитого сигналу;
- 3) Обчислювати середнє значення кута $(\theta_{out} + \theta_{in})/2$.

Щоб показати необхідність урахування поправок до вимірних напрямків під час сканування, визначимо кут, на який зміщується призма за той час, поки імпульс проходить шлях від наземного лазерного сканера до об'єкта та повертається назад. У подальших міркуваннях розглядатимемо лише вертикальне сканування, оскільки швидкість горизонтального значно нижча — на кілька порядків.

Вертикальна швидкість сканування коливається в межах від 1 до 20 ліній за секунду. Це означає, що за мінімальної швидкості кутова швидкість обертання променя становитиме $v_{min} = 1 \text{ лін} / c \frac{2 \cdot 360}{3} = 240 / c$, а за максимальної — $v_{max} = 20 \text{ лін} / c \frac{2 \cdot 360}{3} = 4800 / c$.

Можна спочатку обчислити час, за який лазерний імпульс долає шлях до об'єкта й повертається, а потім визначити кути повороту скануючого дзеркала, що відповідають цьому проміжку часу (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Величини кутів повороту дзеркала наземного лазерного сканера з моменту виходу сигналу і до надходження на приймач

R , м	t , с	$\Delta\theta$ при v_{min} , °	$\Delta\theta$ при v_{max} , °
50	$3,33 \times 10^{-7}$	0,00008	0,00160
100	$6,67 \times 10^{-7}$	0,00016	0,00320
200	$1,33 \times 10^{-6}$	0,00032	0,00640
400	$2,67 \times 10^{-6}$	0,00064	0,01280
1000	$6,67 \times 10^{-6}$	0,00160	0,03200

З таблиці очевидно, що величини $\Delta\theta$ при v_{min} і v_{max} є значними, що доводить необхідність забезпечення синхронізації вимірювання кутів та відстаней.

У якості прикладу розглянуто технічні характеристики найновішого сканера Leica RTC360, що виконує 3D-сканування швидше. Завдяки швидкості сканування до 2 млн точок за секунду та вдосконаленій системі отримання HDR-зображень, створення кольорових тривимірних хмар точок займає менше 2 хв. Крім того, автоматизоване зшивання сканів (завдяки технології VIS) та автоматизація процесу передачі даних з поля в офіс скорочують час роботи над проєктом і забезпечують максимальну продуктивність.

Скануюча система:

- вимірювання відстаней – найвища швидкість сканування завдяки технології Waveform Digitizing (WFD);
- клас лазера – 1 (відповідно до IEC 60825-1:2014),
- довжина хвилі 1550 нм (невидимий);
- поле зору – 360° (по горизонталі) / 300° (по вертикалі);
- відстань – від 0,5 м до 130 м;
- швидкість – до 2 000 000 точок на секунду;
- дозвіл на сканування – 3 користувацькі режими (3/ 6/ 12 мм на 10 м);
- точність системи – кутова точність 18”;
- відстань 1,0 мм + 10 ppm;
- 3D точність: 1,9 мм на 10 м; 2,9 мм на 20 м; 5,3 мм на 40 м.

Навігаційні датчики:

- технологія VIS – інерційна вимірювальна система, за допомогою обробки відеозображення, фіксує місцезнаходження сканера та виконує зшивку сканів у реальному часі;
- додаткові сенсори – альтиметр, компас, GNSS;
- робоча температура – від -5° до +40° C;
- температура зберігання – від -40° до +70° C;
- пил/вода – IP54 (IEC 60529);
- мобільні пристрої – додаток Leica Cyclone FIELD 360 для iPad або планшета на Android:
- дистанційне керування сканером;
- 2D або 3D перегляд даних;
- додавання тегів;
- автоматичне зшивання сканів.

2.13 Вплив погодних умов і навколишнього середовища та продуктивність лазерного далекоміра

Найпоширенішим фактором, який впливає на роботу лазерного далекоміра, є видимість. В умовах слабкого освітлення, наприклад у сутінках, на світанку або в похмурі дні, людське око може не бачити лазерний промінь. Це може ускладнити прицілювання та точне вимірювання відстані [25]. Однак більшість сучасних лазерних далекомірів оснащені такими функціями, як регулювання яскравості або освітлення, які можуть допомогти подолати цю проблему.

Іншим фактором, який може вплинути на роботу лазерного далекоміра, є температура. Екстремальні температури можуть спричинити запотівання або обмерзання лінз, що може ускладнити видимість через далекомір. У таких випадках дуже важливо тримати далекомір у теплі, щоб уникнути цієї проблеми. Крім того, висока температура також може спричинити подібні проблеми зі скляними лінзами та внутрішніми компонентами. Тому бажано зберігати далекомір у захисному футлярі або сумці, особливо коли він не використовується.

Іншим фактором навколишнього середовища, який може вплинути на роботу лазерного далекоміра, є вологість. Високий рівень вологості може призвести до утворення крапель води на лінзі, що вплине на чіткість зображення. Щоб цього уникнути, важливо часто чи за потреби очищати об'єктив далекоміра. Крім того, багато далекомірів постачаються з наборами для очищення лінз, які допомагають підтримувати чітке зображення. Очевидно, що погодні умови та умови навколишнього середовища можуть впливати на продуктивність лазерного далекоміра. Однак при правильній підготовці та догляді ці проблеми можна легко подолати. Якісний лазерний далекомір все ще буде ефективно працювати в більшості умов за умови його правильного використання та обслуговування. Тому дуже важливо мати

необхідне обладнання та знання для використання далекоміра за будь-яких погодних умов і умов навколишнього середовища.

Як це впливає на продуктивність:

- зменшення дальності: найбільш помітний ефект, промінь «розмивається» раніше;
- помилки вимірювання: прилад може «чіпляти» частинки в повітрі або відбиття від перешкод, видаючи неправильні цифри;
- нестабільність: результати можуть стрибати між показаннями, вимагаючи багаторазових вимірювань.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження фізико-математичних принципів, технічних особливостей та сучасних застосувань технологій тривимірного лазерного сканування. На основі виконаного аналізу отримано такі основні результати та узагальнення.

Розглянуто фундаментальні принципи роботи 3D-лазерних сканерів, зокрема методи вимірювання відстані на основі Time-of-Flight та фазового зсуву. Показано, що ці технології забезпечують високу точність, швидкість отримання просторових даних та можливість формування детальних хмар точок для подальшої обробки. Наведено класифікацію сучасних сканерів, описано їх конструктивні особливості та сферу оптимального використання.

Виконано порівняльний аналіз типів 3D-сканування та їх практичної реалізації. Встановлено, що найбільш ефективними для інженерних, навігаційних та геопросторових задач є лазерні системи, які поєднують високу роздільну здатність, стійкість до зовнішніх умов та можливість роботи на значних відстанях. Досліджено модельні та реальні приклади формування тривимірних карт за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Проведено аналіз експериментально застосовуваних систем 3D-лазерного сканування у безпілотному транспорті. Встановлено, що LiDAR є ключовою технологією для забезпечення ситуаційної обізнаності, виявлення перешкод, картографування навколишнього середовища та підтримки алгоритмів автоматизованого керування. Наведено типові архітектури сенсорних систем, описано принципи роботи обертових та багат шарових лазерних сенсорів, а також особливості інтеграції LiDAR з GNSS-навігацією.

Досліджено вплив атмосферних факторів на точність та стабільність роботи 3D-лазерних сканерів. Показано, що туман, дощ, пил, зміна температури та вологість здатні викликати значні похибки вимірювань, зменшувати дальність реєстрації та заважати формуванню коректної хмари точок. Проаналізовано основні методи компенсації таких впливів, включаючи

фільтрацію сигналів, обмеження потужності променя, оптимізацію поля зору та використання довжин хвиль, безпечних для очей.

Розглянуто інструментальні та методичні похибки наземного та мобільного лазерного сканування, оцінено особливості роботи конкретних промислових систем, зокрема Leica RTC360. Проаналізовано їх характеристики, переваги та можливі обмеження при використанні в інженерних задачах.

Узагальнюючи результати роботи, можна стверджувати, що технології тривимірного лазерного сканування посідають ключове місце у сучасних вимірювальних системах, автоматизованій навігації, цифровому моделюванні та інженерному аналізі. Їх переваги — висока точність, швидкість збору даних і можливість створення деталізованих цифрових моделей — відкривають широкі перспективи для розвитку систем автономного керування, робототехніки, геодезії, архітектури та промислової метрології.

Перспективними напрямками подальших досліджень є інтеграція LiDAR із системами машинного навчання, покращення завадостійкості в складних погодних умовах, підвищення енергоефективності сенсорів та створення нових методів обробки великих масивів даних хмар точок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Broggi A., Bertozzi M., Rose M., Felisa M., Rako tomamonjy A. A Pedestrian Detector using Histograms of Oriented Gradients and a Support Vector Machine Classifier in Procs. IEEE Intl. Conf. on Intelligent Transportation Systems Seattle. WA, USA, Sept. 2007. P. 144–148,.
2. Broggi A., Bertozzi M., Fedriga R.I., Gomez C.H., Vezioni G., Rose M. Del. Pedestrian Detection in Far Infrared Images based on the use of Probabilistic Templates : in Procs. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey, June 2007. P. 327-332.
3. Kluge B., Koehler C., Prassler E. Fast and Robust Tracking of Multiple Moving Objects with a Laser Range Finder : in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seoul, Korea, 2001. P. 1683-1688.
4. Curio C., Edelbrunner J., Kalinke T., Tzomakas C. Walking Pedestrian Recognition : in IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems. Sept. 2000. 1(3). P. 155–163,
5. Pomerleau D. Rapidly adapting artificial neural networks for autonomous navigation : in Advances in Neural Information Processing Systems 3. Morgan Kaufmann, 1991. P. 429–435.
6. Reid D.B. Multiple an Algorithm for Alignment Targets: *IEEE Transactions On Automatic Control*. December 1979. Vol. AC-24, No 6. P. 843-854.
7. Dickmanns E. D., Zapp A. Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision: International Federation of Automatic Control. World Congress (10th). Automatic control : world congress. Published By: Pergamon Press, Oxford, England.1987. P. 221–226.
8. Prassler E., Scholz J., Fiorini P. Navigating a Robotic Wheelchair in a Railway Station during Rush Hour. *Journal on Robotics Research (IJRR)* 1999. Vol. 18, No 7. P. 760–772.

9. Dickmanns E.D., Behringer R., Dickmanns D., Hildebrandt T. et al. The seeing passenger car 'vampors p'. Intelligent Vehicles '94 Symposium, Proceedings of the, 1994.
10. Bardet F., Chateau T. MCMC Particle Filter for Real-Time Visual Tracking of Vehicles : in Proc. of the IEEE Conference Intelligent Transportation System, Beijing, China, 2008.
11. Surmann H., Lingemann K., Nchter A., Hertzberg J. A 3d laser range finder for autonomous mobile robots. Proceedings of the 32nd ISR(International Symposium on Robotics).2001. P. 153–158.
12. Falcou J., Sérot J., Pech L., Lapresté J.T. Meta programming Applied to Automatic SMP Parallelization of Lin ear Algebra Code: In Proceeding of EuroPar, Las Palmas, Gran Canaria, August 2008.
13. Fuerstenberg K., Lages U. Laserscanner innovations for detection of obstacles and road. Proceedings of AMAA, 2003.
14. Fuerstenberg K.C., Linzmeier D.T., Dietmayer K.C.J. Pedestrian Recognition and Tracking of Vehicles using a Vehicle based Multilayer Laserscanner : in 10th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS), Madrid, Spain, November 2003.
15. Wang L., Shu J., Emlira T., Irnagai N. A 3d scanning laser rangefinder and its application to an autonomous guided vehicle. VTC, 2000.
16. Bertozzi M., Broggi A., Rose M. Del, Felisa M. A Symmetry-based Validator and Refinement System for Pedestrian Detection in Far Infrared Images. Seattle, USA, 2007.
17. Gordon N.J., Salmond N.J., Smith A.F.M. Novel Ap proach to Nonlinear/non-Gaussian Bayesian State Estimate. *IEEE Proc.-F*. 1993. Vol. 140, No.2. P.107–113.
18. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Predic tion Problems. *Trans. ASME J.Basic Eng, flight*. 1960. Vol. 82. P. 34–45.
19. Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D. et al. : The robot that won the darpa grand challenge. *Journal of Field Robotics*. 2006.

20. Thrun S., Burgard W., Fox D. A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3d mapping : in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), San Francisco, CA, 2000.
21. Gandhi T., Trivedi M.M. Pedestrian Collision Avoidance Systems: a Survey of Computer Vision based Recent Studies : in Procs. IEEE Intelligent Transportation Systems 2006, Sept. 2006, P. 976–981.
22. Willhoeft V., Fuerstenberg K.C. Quasi-3d scanning with laserscan ners. 8th World Congress on Intelligent Transport Systems, 2001.
23. Li X.R., Jilkov V.P. A Survey of Maneuvering Target Alignment: Dynamic Models : in 6in Proc. of SPIE Conference one Signal and Data Processing of Small Target, Orlando, FL, the USA, April 2000.
24. Мачехін Ю.П., Курський Ю.С., Гнатенко О.С. Принципи моделювання вимірювань в оптичних нелінійних динамічних системах // Радіотехніка. 2018. № 194. С. 29–33.
25. Курський Ю.С. Теоретична модель виміру параметрів лазерного випромінювання // Радіотехніка. 2019. № 197. С. 86–92.