

7.2 Наземне лазерне 3D-сканування як інтегрований процес від збору даних до створення тривимірних моделей

Вступ. Тенденції автоматизації різних сфер виробничої діяльності обумовлені стрімким розвитком мікропроцесорних технологій та цифрових рішень. Сучасні досягнення в цій галузі значно трансформували підходи до організації та управління виробничими процесами, зокрема завдяки розробці комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень. Такі системи дозволили мінімізувати вплив людського фактору на якість і обсяги виробленої продукції, забезпечуючи вищу точність та стабільність. У цьому контексті мікропроцесорна техніка виконує ключову роль інтеграційної ланки, яка об'єднує окремі етапи виробничого процесу в єдину технологічну систему.

Особливе місце у цьому процесі посідає інтеграція цифрових технологій збору, обробки й аналізу даних. Поєднання геодезичних методів, фотограмметричних технологій і мікропроцесорних систем створило новий клас пристроїв для просторового дослідження місцевості – наземні лазерні сканери. Ці інноваційні інструменти значно змінили підходи до збору та аналізу просторових даних, зробивши їх більш оперативними та точними.

Наземне лазерне сканування базується на високошвидкісному вимірюванні відстаней від сканера до точок об'єкта і одночасній реєстрації напрямків вимірювань, що включають горизонтальні та вертикальні кути. Таким чином, обчислювані параметри нагадують ті, що використовуються при роботі з електронними тахеометрами. Однак принципова відмінність полягає у повному охопленні об'єкта замість фіксації лише окремих його точок. Ця особливість визначає наземне лазерне сканування як комплексний метод зйомки, кінцевим результатом якого є тривимірна модель об'єкта, відома як хмара точок.

Сучасні системи наземного лазерного сканування дозволяють автоматизувати процес збору даних на таких рівнях, які ще кілька десятиліть тому здавалися недосяжними. Висока точність та деталізація результатів роблять

ці технології незамінними в багатьох галузях, включаючи будівництво, архітектуру, моніторинг інфраструктури, а також у геодезії та наукових дослідженнях. Наземні лазерні сканери стали інструментом, який одночасно скорочує час, потрібний для отримання даних, і підвищує їхню якість, що забезпечує нові можливості для моделювання та аналізу складних об'єктів.

Таким чином, інтеграція мікропроцесорних та цифрових технологій у виробничі процеси не лише прискорює їхню автоматизацію, але й відкриває нові горизонти у зборі та обробці просторової інформації. Наземне лазерне сканування є яскравим прикладом цієї трансформації, поєднуючи передові інженерні рішення з можливістю створення точних тривимірних моделей реального світу.

*Технологія та принципи роботи наземних тривимірних
лазерних сканувальних систем.*

Наземний лазерний сканер (НЛС) дозволяє створювати тривимірні моделі, представлені хмарами точок, які відображають навколишні об'єкти. Це досягається шляхом визначення положення видимих поверхонь за допомогою відбиття лазерного світла. Сучасні лазерні сканери поділяються на кілька типів, кожен з яких має свої переваги та обмеження, залежно від сфери застосування. Сучасні тривимірні сканувальні системи можна умовно розподілити на три великі групи за методами вимірювання відстані: тріангуляційні сканери, імпульсні сканери та фазові сканери [256].

Тріангуляційні сканери використовують лазерний промінь, який направляється на поверхню об'єкта, що досліджується. Відбитий від поверхні промінь формує світлову пляму, зображення якої фіксується цифровою камерою. Залежно від відстані до об'єкта, світлова пляма відображається на різних пікселях камери [257]. Для точного калібрування тріангуляційного вимірювача відстані застосовується контрольна пластина, що розташована на відомій відстані від сканера. Під час калібрування на цифровому зображенні визначають

положення контрольного пікселя, що дозволяє коригувати параметри вимірювань (рис. 1).

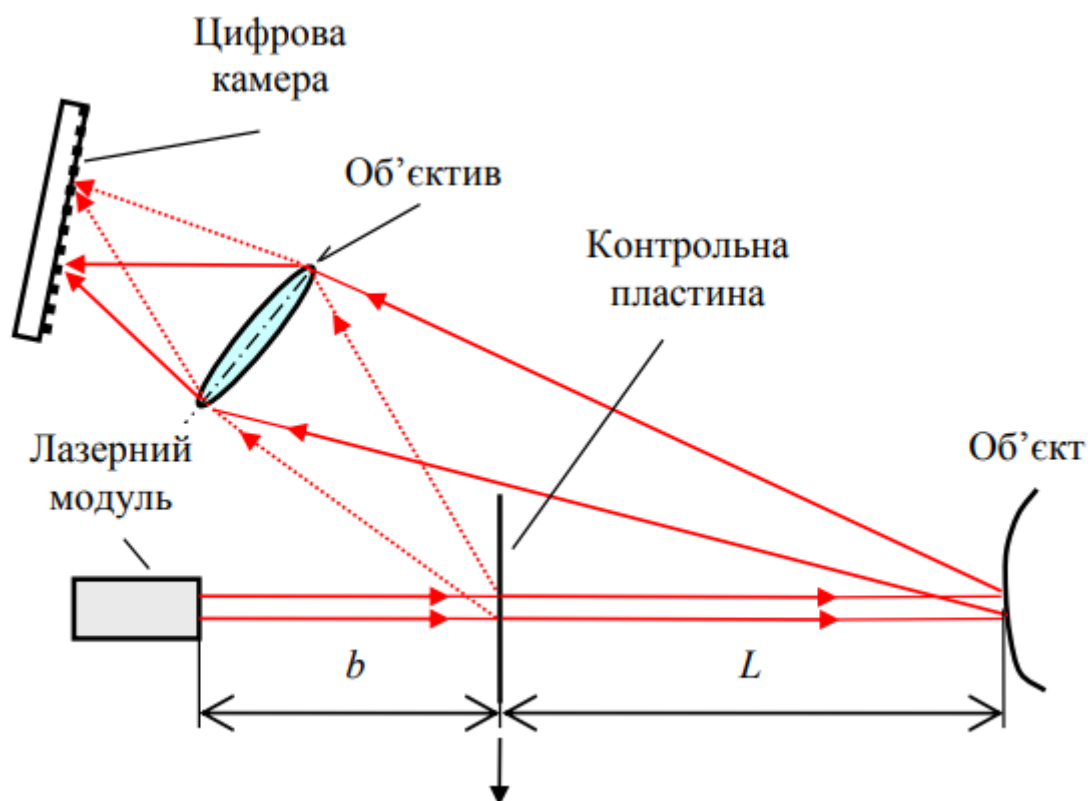


Рисунок 1. Схема триангуляційного вимірювача відстані [257]

Метод триангуляції, який використовують ці сканери, був відомий ще до появи лазерних технологій. Він ґрунтується на принципі створення прямокутного трикутника, де одна зі сторін є відстанню між сканером та точкою на об'єкті (катет), яку необхідно визначити. Для цього за допомогою відомого другого катета (бази) і виміряного кута між базою і скануючим променем можна обчислити відстань, використовуючи основні принципи геометрії. Цей метод дозволяє з високою точністю визначати відстані навіть до малих або складно доступних об'єктів.

Триангуляційний сканер характеризується високою роздільною здатністю, що може досягати десятків мікрометрів, що дозволяє отримувати надзвичайно детальні зображення об'єктів. Однак процес сканування з такою високою точністю займає значний час. Крім того, результат сканування може бути

спотворений, якщо об'єкт або сам сканер рухатимуться під час зйомки. Ці обмеження роблять використання тріангуляційних сканерів менш ефективним при необхідності швидкого збору даних або у випадках, коли об'єкти знаходяться в русі.

Імпульсний 3D-сканер складається з лазерного випромінювача та детектора. Лазерний промінь випромінюється зі сканера в певному напрямку, а детектор фіксує час, необхідний для того, щоб відбитий промінь повернувся до нього. Оскільки швидкість світла є сталою величиною, сканер може обчислити відстань до об'єкта, вимірявши час, який світло витрачає на проходження цього шляху за формулою [256]:

$$R = \frac{v \cdot \tau}{2}, \quad (1)$$

де v – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль;

τ – виміряний час з моменту подачі сигналу до його прийому.

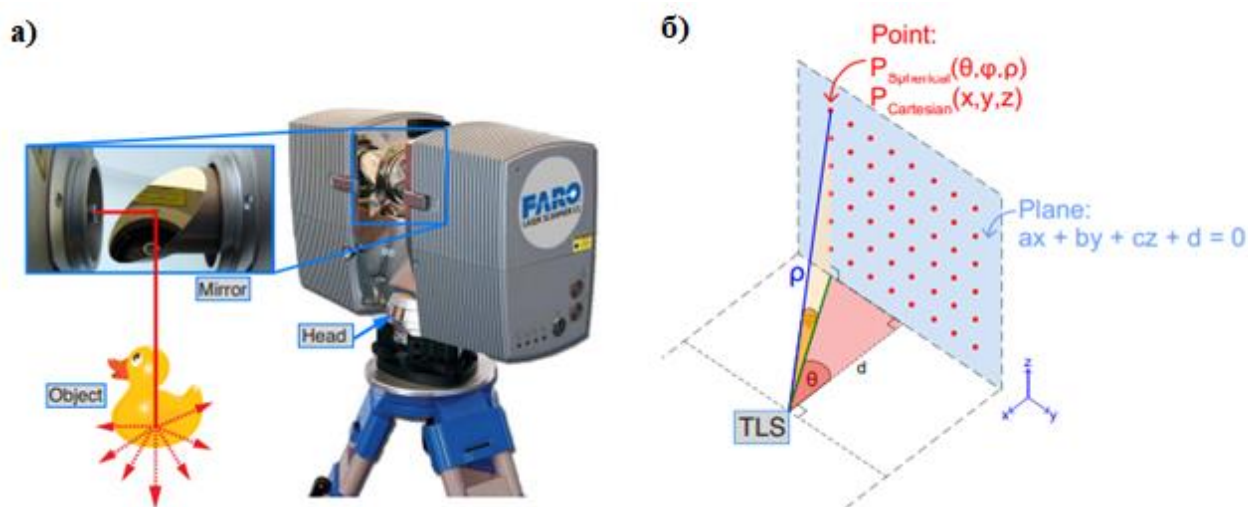
За допомогою цієї інформації 3D-сканер здатен точно визначати відстані до різних точок на об'єкті та створювати його тривимірну модель.

Основною перевагою цього методу вимірювання є здатність охоплювати великі відстані – до кількох сотень метрів, що забезпечується високою потужністю лазера. Така велика дальність дозволяє здійснювати точні вимірювання на значних відстанях, що є важливим для багатьох геодезичних задач. Однак, випромінювання лазерів, які використовуються в таких приладах, може бути небезпечним для зору, тому під час роботи з ними необхідно дотримуватися спеціальних заходів безпеки.

Мінімальна відстань, на якій можливе вимірювання, залежить від конкретної моделі сканера та конструктивних особливостей його корпусу і штативу. Цей параметр може варіюватися в залежності від призначення приладу та типу використовуваного лазера. Для деяких моделей мінімальна відстань може бути дуже маленькою, що дозволяє здійснювати вимірювання в умовах

обмеженого простору. Проте в цілому для більшості приладів характерна здатність проводити вимірювання на значних відстанях, що робить їх універсальними для використання у різних сферах.

Приклад фазового наземного лазерного сканера представлений на рисунку 2 (зліва) [258]. Зазвичай фазовий сканер складається з двох основних елементів: обертового двигуна (сервоприводу) та обертового дзеркала. Комбінація цих двох рухомих частин дозволяє отримувати під час сканування панорамні знімки, які створюють детальне зображення об'єкта.



а) – фазовий наземний лазер; б) – схематичне зображення збору хмари точок.

Точка P вимірюється в кутових положеннях (θ, ϕ) , з діапазоном ρ

Рисунок 2. Приклад і принцип роботи фазового
наземного лазерного сканера [258]

На кожному етапі горизонтального обертання дзеркало обертається з регулярним вертикальним кроком, що дозволяє направляти лазерні промені в необхідний напрямок. Відбиття кожного лазерного променя, що потрапляє на поверхню об'єкта, вимірюється в напрямку, з якого він був випущений, як показано на рисунку 2 (праворуч). Цей метод вимірювання положення поверхні об'єкта дає змогу отримати величезні обсяги даних за дуже короткий проміжок часу, що робить таке сканування ефективним для роботи з великими та складними об'єктами.

На базі даних методів сформована порівняльна характеристика у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1.

Аналіз НЛС за методом вимірювання відстаней

Метод вимірювання	Максимальна відстань, що вимірюється, м	Точність визначення відстаней, мм
Імпульсний метод	50-300	до 10 (25)
Фазовий метод	до 100	до 10
Метод тріангуляції	до 5	до 1

Хмара точок зазвичай представляється у вигляді неорганізованих даних, тобто таких, що не прив'язані до будь-якої сітки, в декартових координатах. Для підвищення точності та можливості візуалізації, сканери можуть бути оснащені однооб'єктивною дзеркальною камерою, що дозволяє фарбувати хмари точок.

На сьогоднішній день більшість сучасних наземних лазерних сканерів оснащені вбудованими камерами, які розташовані безпосередньо поруч з лазерним випромінювальним пристроєм. Це дозволяє здійснювати отримання кольорових хмар точок швидко і майже безшовно. Таке поєднання лазерного сканування та кольорових даних дає можливість створювати точні та детальні 3D-моделі об'єктів з природними кольорами, що є важливим для подальшого аналізу і візуалізації.

Діапазон таких 3D-об'єктів є надзвичайно широким, починаючи від простих труб на нафтових вишках і закінчуючи моделями цілих міст. Приклад 3D-хмари точок зображено на рисунку 3. Представленні точки (x, y, z) фарбуються відповідно до значень інтенсивності i (від 0 до 1), виміряних наземним лазерним сканером, та відображаються відповідно до користувацької кольорової карти RGB для полегшення кращої візуалізації [258].

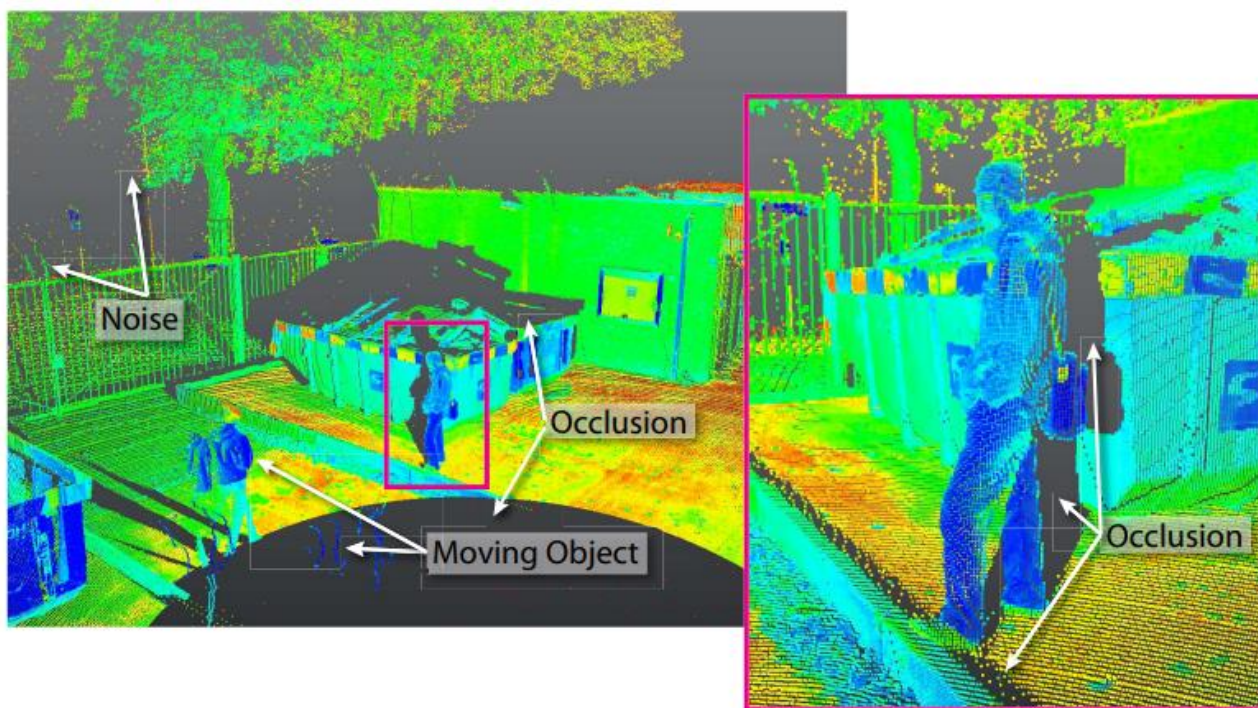


Рисунок 3. Приклад 3D хмари точок [258]

Лазерний сканер захоплює лише ті поверхні, які знаходяться в його прямій видимості, що призводить до утворення закритих ділянок (оклюзій), як показано на рисунку 3. Ці оклюзії є типовими для лазерного сканування, адже певні частини об'єкта можуть бути недоступними для променя через їх розташування або геометричні особливості. Врахування таких закритих ділянок є важливим аспектом при створенні точних 3D-моделей, оскільки вони можуть впливати на точність реконструкції та подальший аналіз об'єкта.

У цьому прикладі показана постійна «мертва зона» приладу – периметр навколо станції стояння пристрою або оклюзійне коло. Це явище зумовлене тим, що сканер не може захоплювати поверхні безпосередньо під собою, оскільки сервопривід і штатив завжди перешкоджають огляду поверхонь, що знаходяться під самим сканером.

Іншим прикладом оклюзії є ситуація, де стояча людина заважає огляду контейнерів на задньому плані. Поверхні, що не потрапляють в пряме поле зору наземного лазерного сканера з однієї точки огляду, часто можуть бути захоплені з іншої точки, де вони вже стають видимими для сканера. Це підкреслює

важливість правильного вибору позицій для сканування і можливості використання кількох точок огляду для отримання повної інформації про об'єкт.

У останнє десятиліття все частіше використовуються фазові лазерні сканери, принципи вимірювання яких дуже схожі на імпульсні. Фазові сканери випромінюють безперервну амплітудно-модульовану хвилю, яка часто модулюється комбінацією кількох різних довжин хвиль. Серед іншого, найкоротша довжина хвилі визначає точність, яку можна досягти, а найдовша довжина хвилі визначає неоднозначність вимірювань. Як показано на рисунку 4, відстань до об'єкта визначається шляхом вимірювання зміщення фази між випроміненим і прийнятим сигналом.

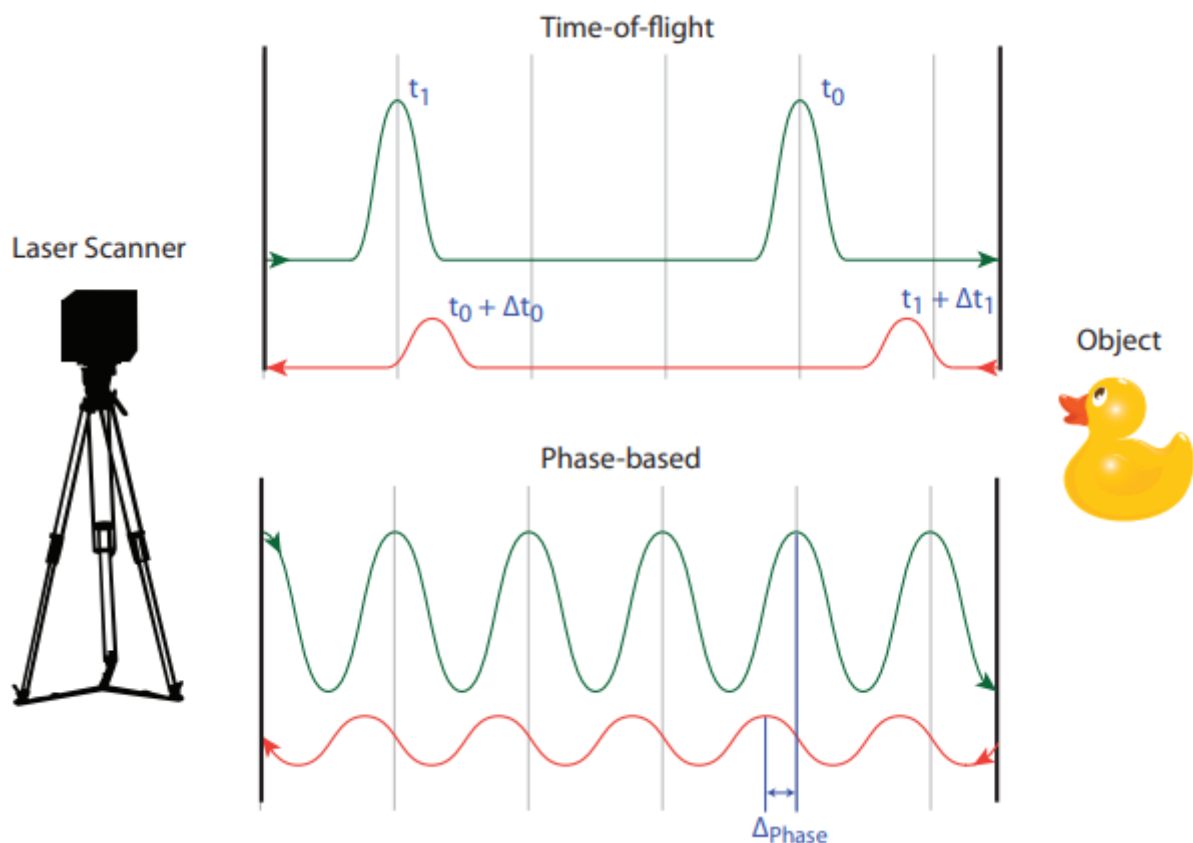


Рисунок 4. Принцип вимірювання відстані лазерними сканерами

[258]

Оскільки лазерні сканери на основі фазового зсуву випромінюють безперервну хвилю, це забезпечує вищу швидкість вимірювань. Висока точність, у свою чергу, досягається переважно завдяки амплітудній модуляції з кількома

довжинами хвиль і більш точному визначенню фазового зсуву. Це дозволяє значно покращити ефективність сканування великих об'єктів, зменшити час, необхідний для збору даних, а також забезпечити високу точність при роботі в складних умовах.

Імпульсні сканери випромінюють вузький лазерний промінь в заданому напрямку і вимірюють сигнал зворотного розсіювання, відбитий поверхнею об'єкта. Як показано на рисунку 4, визначаючи час проходження випроміненого імпульсу в обидва напрямки, можна визначити відстань до об'єкта в заданому напрямку. Цей метод дозволяє сканувати об'єкти на більшому діапазоні відстаней, оскільки імпульсні сканери здатні охоплювати великі відстані і працювати на більш широких територіях. Він є ефективним для вимірювань в умовах, де потрібна висока дальність і швидкість збору даних.

Огляд і класифікація наземних лазерних сканерів.

На сьогоднішній день розробкою приладів для тривимірного лазерного сканування займається велика кількість компаній, серед яких широко відомі Trimble (США) та Leica Geosystems (Швейцарія), а також Riegl (Австрія), I-Site (Австралія), Zoller+Fröhlich (Німеччина) та інші. Усі ці компанії випускають сканери для різних цілей, орієнтуючись на потреби різних галузей і специфічні вимоги до точності та швидкості збору даних.

Завдання, які вирішуються конкретною моделлю наземного лазерного сканера, визначаються її технічними характеристиками. Основними технічними характеристиками, що дозволяють оцінити можливості НЛС, є [259]:

- дальність дії;
- точність вимірювання відстаней;
- швидкість виконання вимірювань;
- мінімальний кутовий крок сканування;
- кут поля зору;
- діапазони припустимих робочих температур і зовнішніх умов;
- клас безпеки лазера;

- можливість геодезичного орієнтування НЛС;
- споживання напруги, що впливає на тривалість роботи НЛС.

Дальність дії визначає максимальну відстань, на якій наземний лазерний сканер здатний отримати однозначний результат з гарантованими характеристиками точності. Цей параметр залежить від використовуваного методу вимірювання відстаней, потужності лазера, а також відбивної здатності поверхні, що сканується. Чим вища відбивна здатність матеріалу об'єкта, тим більша ймовірність отримання точних даних на великих відстанях. Наприклад, відбиття від гладких або металевих поверхонь забезпечує кращі результати на більших відстанях порівняно з поверхнями, що мають низьку відбивну здатність, такими як асфальт чи бетон.

Точність вимірювання відстаней визначається похибкою одиничного вимірювання і залежить від методу вимірювання та конструкції далекоміра. Значний вплив на точність має розбіжність лазерного випромінювання. Коли відстань вимірюється до площин, які не перпендикулярні до осі променя, або до об'єктів складної форми, що розташовані на великій відстані вздовж осі променя, відбитий сигнал може надходити від кількох елементів поверхні одночасно. Як результат, виміряна відстань відноситиметься до умовної точки, яка може знаходитися поза межами об'єкта. Чим більший розмір лазерної плями, тим більше відстань і координати виміряних точок будуть відрізнятися від свого істинного значення, що може призвести до значних похибок у визначенні форми та розмірів об'єкта, як показано на рисунку 5.

Швидкість виконання вимірювань визначається кількістю точок, що реєструються наземним лазерним сканером за одиницю часу. Цей показник залежить від методу вимірювання відстаней та конструкції блоку розгортки. Комбінація фазового методу вимірювання відстаней з методикою неперервної реєстрації кутів дозволяє досягати максимальної швидкості вимірювань, яка може досягати до 500 000 точок за секунду (точок/с). Така швидкість є особливо корисною при скануванні великих об'єктів або територій, де потрібна висока продуктивність для збору великого обсягу даних за короткий проміжок часу.



Рисунок 5. Помилки у вимірюванні відстаней, викликані високою розбіжністю лазерного випромінювання [259]

Кутовим кроком сканування називається величина кутового зміщення блоку розгортки для кожного окремого вимірювання. Мінімальний кутовий крок сканування визначає максимально можливу щільність зйомки для конкретної моделі наземного лазерного сканера і залежить від конструктивних особливостей блоку розгортки. Чим менший кутовий крок, тим вищою є точність і щільність зйомки, оскільки це дозволяє отримати більше точок на одиницю площі, що є важливим для детального моделювання об'єктів та точного аналізу їх поверхні.

Кут поля зору наземного лазерного сканера визначає максимальну область, яку можна охопити з однієї сканерної станції без необхідності переміщення чи розвороту самого пристрою. Цей параметр вимірюється в градусах і охоплює горизонтальну та вертикальну площини. Якщо раніше кут поля зору перших моделей НЛС становив лише 40° в обох площинах, то більшість сучасних моделей мають кут поля зору, що наближається до панорамного – до 360° в горизонтальній площині та до 320° у вертикальній. Це значно розширює можливості сканування, дозволяючи отримати більше даних за менший час і без

необхідності додаткових переміщень пристрою, що підвищує ефективність і точність вимірювань.

Наземні лазерні сканери, через особливості своєї конструкції, не мають підвищеної морозостійкості. Більшість моделей працює лише при температурах вище 0° С, що обмежує їх використання в умовах низьких температур, особливо в зимовий період, коли потрібне сканування на відкритому повітрі. Однак останнім часом виробники активно вдосконалюють НЛС, враховуючи збільшення попиту на лазерні сканери та потребу в більш широкому діапазоні експлуатаційних температур.

Сучасні моделі НЛС мають високий рівень пило- та вологозахисності, що дозволяє працювати в умовах підвищеної запиленості та вологості. Для поліпшення герметичності та виключення контакту з зовнішнім середовищем перевагу отримують сканери з рідинним охолодженням. Класи захисту таких пристроїв визначаються за стандартом ІЕС 60825-1 за індексом ІР, з класами до ІР66, що забезпечує їх надійність і витривалість в екстремальних умовах [260].

Сучасні НЛС можуть працювати при температурах до мінус 40° С, що значно розширює їх застосування в умовах низьких температур.

Щодо безпеки, лазери, що використовуються в НЛС, поділяються на кілька класів відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 60825-1, зокрема: клас 1, 1М, 2, 2М, 3R, 4 [260]. Кожен клас визначає рівень безпеки лазерного випромінювання і вимоги до захисту від його впливу на очі та шкіру.

Для приведення результатів вимірювань наземного лазерного сканування до заданої системи координат зазвичай виконується орієнтування за точками з відомими координатами, які називають сканерними марками. Цей метод обумовлений тим, що більшість сучасних НЛС не оснащені пристроями для автоматичного врахування нахилу і розвороту, що могли б забезпечити орієнтування іншим способом.

Однак у останні роки спостерігається тенденція до впровадження традиційних способів орієнтування, подібних до тих, які використовуються в електронних тахеометрах. Для реалізації цього підходу сучасні НЛС обладнують

пристроями, які компенсують кути нахилу приладу або враховують їх у визначеному діапазоні. Завдяки цьому можна більш точно визначити положення сканера і дирекційний кут однієї з осей, що дозволяє привести дані вимірювань до єдиної системи координат.

Впровадження таких технологій значно розширює функціональні можливості НЛС, роблячи процес орієнтування швидшим і точнішим. Зростаюча автоматизація і інтеграція з іншими геодезичними інструментами підвищують ефективність роботи, особливо в складних умовах, де традиційні методи могли бути обмеженими.

Більшість сучасних моделей топографічних наземних лазерних сканерів здатні працювати як від джерел змінної, так і постійної напруги. Використання змінної напруги є оптимальним у випадках, коли доступна мережа 220 В, що зазвичай характерно для закритих виробничих приміщень чи лабораторій. Це забезпечує стабільне електроживлення і знімає потребу в додаткових джерелах енергії.

На відкритих майданчиках, де доступ до мережі обмежений або взагалі відсутній, живлення НЛС здійснюється за допомогою спеціалізованих або універсальних акумуляторних батарей. Зазвичай ці батареї забезпечують постійну напругу в діапазоні від 12 до 24 В, що достатньо для більшості моделей сканерів. Однак деякі пристрої потребують мінімальну напругу 24 В, що може створювати певні незручності, адже батареї з такими характеристиками мають більшу вагу, що знижує мобільність і зручність транспортування обладнання.

Удосконалення джерел живлення для НЛС є одним із важливих напрямків сучасного розвитку технологій. Виробники зосереджуються на створенні компактних, легких і довговічних акумуляторів, які дозволяють збільшити час автономної роботи та полегшують використання обладнання в польових умовах. Це особливо важливо для тривалих геодезичних робіт або у важкодоступних місцевостях, де кожен грам ваги і кожна година роботи мають вирішальне значення.

Останнім часом на ринку наземних лазерних сканерів спостерігається стрімкий розвиток, зумовлений впровадженням передових технологій і вдосконаленням конструкцій приладів. Виробники зосереджуються на розширенні функціоналу, покращенні точності вимірювань і підвищенні зручності використання. Таким чином, можна використовувати наступну класифікацію наземного лазерного сканування (рисунк 6) [259].

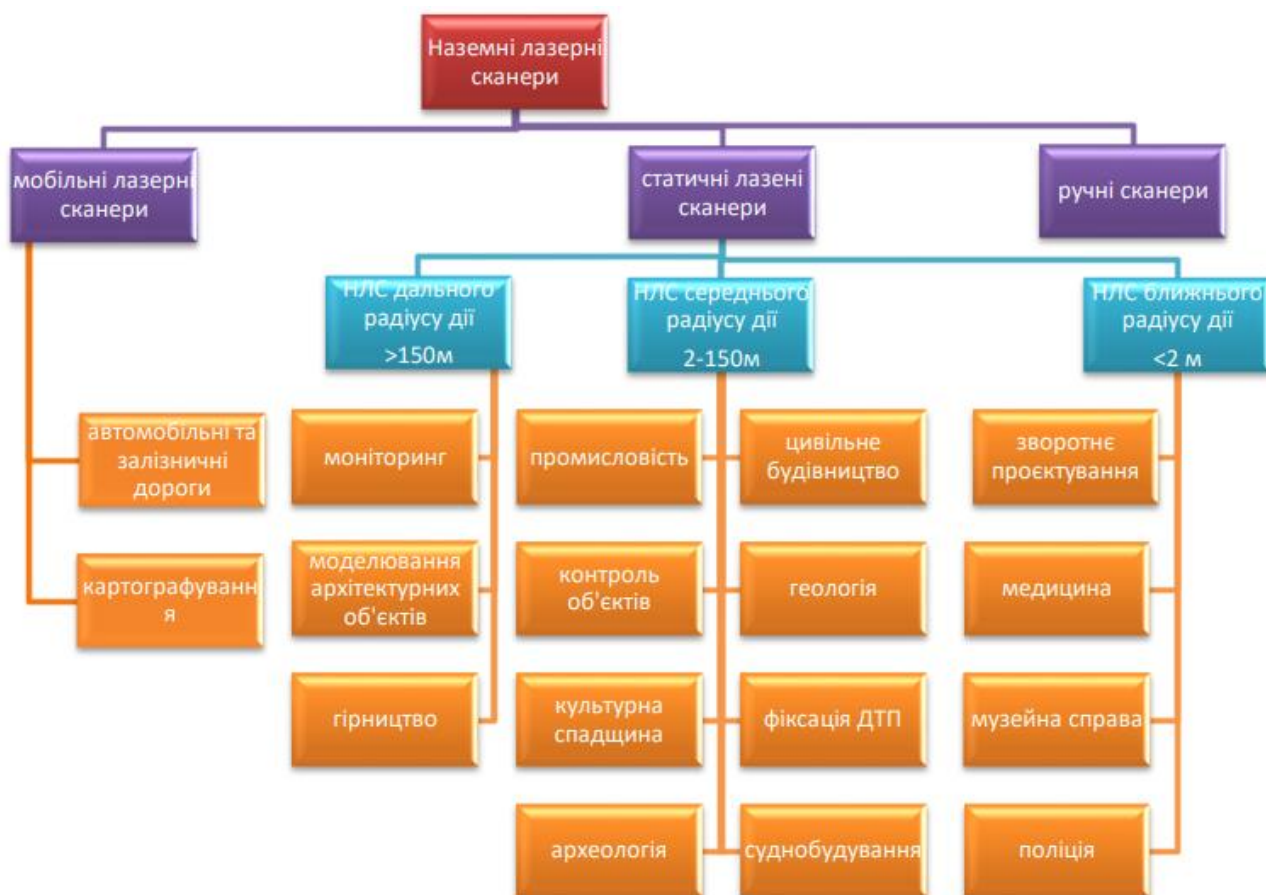


Рисунок 6. Класифікація НЛС [259]

Джерела похибок у результатах наземного лазерного сканування.

Усі похибки, що виникають при вимірюванні величин за допомогою наземного лазерного сканування, можна поділити на дві основні групи [261]:

– інструментальні, що залежать від якості збирання та налаштування механічних, оптичних і електронних компонентів приладу;

– методичні, які обумовлені особливостями самого методу визначення величин за допомогою НЛС.

Похибки першої групи фіксуються у технічному паспорті сканера, їх первинне визначення відбувається на етапі збирання та налаштування приладу, а подальше – під час періодичної калібровки і метрологічної атестації НЛС. Результати таких досліджень дозволяють оцінити відповідність точності роботи окремих блоків приладу заявленим характеристикам. Усунути інструментальні похибки зазвичай можливо лише шляхом заміни компонентів або зміни технології виготовлення приладу.

Методичні похибки зазвичай можна врахувати під час обробки результатів вимірювань.

Щодо наземного лазерного сканування, методичні похибки поділяються на такі категорії:

– похибки, спричинені умовами навколишнього середовища, зокрема атмосферною рефракцією, затуханням електромагнітних хвиль, вібрацією приладу тощо;

– похибки, пов'язані з характеристиками об'єкта сканування, такими як розмір, орієнтація, колір, текстура тощо.

Для врахування методичних похибок у результатах наземного лазерного сканування використовують два основні підходи:

– окремий аналіз впливу кожного фактору. Цей метод передбачає оцінювання впливу кожної причини похибок окремо. Його застосовують для усунення основної частини систематичних похибок, які виникають під час вимірювання кутів і відстаней сканером. Таке коригування зазвичай здійснюється на етапі попередньої обробки сканів;

– комплексний підхід. Він полягає у врахуванні сукупного впливу всіх факторів, подібно до усунення систематичних похибок у координатах точок під час фотограмметричної обробки знімків. Для цього часто використовуються поліноміальні моделі. Комплексний підхід дозволяє усунути залишкові

систематичні похибки в координатах точок сканів, забезпечуючи універсальність та точність обробки.

Крім того, автоматичне постоброблення, яке часто виконується під час зйомки, наприклад, видалення або фільтрація точок за певними критеріями, також може вплинути на загальну якість хмари точок.

Технологічний процес наземного лазерного сканування.

На даний момент не існує запатентованої технології виконання робіт із наземного лазерного сканування для створення тривимірних моделей місцевості та розробки топографічних планів і двовимірних креслень ділянок сканування.

Розглянемо сутність та особливості виконання кожного етапу наземного лазерного сканування [262-266].

На етапі складання технічного проекту визначають необхідну точність побудови тривимірної моделі місцевості (об'єкта) або цифрового плану, їх зміст та деталізацію, необхідний формат (розширення) готової продукції, використовуване обладнання та вартість виконання робіт. У разі потреби уточнюються питання щодо додаткової семантичної інформації для кожного об'єкта.

З урахуванням конкретних умов місцевості вибирається раціональний спосіб створення та згущення зйомочного обґрунтування. Також під час рекогностування визначаються точки розташування сканера, місця для розміщення спеціальних марок, уточнюються строки проведення робіт тощо.

Кількість і розташування сканерних станцій проєктується на основі вимог до забезпечення необхідної точності створення продукції за результатами сканування, продуктивності та економічності робіт. Відстань між сканерними станціями при зйомці об'єктів з метою створення тривимірних моделей, як правило, становить 20-30 м, а в деяких випадках – менше, залежно від складності об'єкта.

Після завершення рекогносрування складаються абриси території. Від точності абрисів залежить достовірність подальшого розпізнавання об'єктів зйомки при дешифруванні точкової моделі в камеральних умовах.

При зйомці мало забудованих територій абрис краще скласти за точковою моделлю об'єкта (отриманою після наземного лазерного сканування), надрукованою на папері в ортогональній проекції, подібно до того, як проводиться польове дешифрування об'єктів за фотопланами. Такий підхід спрощує процес складання абрисів, оскільки на скані будуть відображені всі об'єкти в єдиному масштабі, і потрібно лише доповнити його семантичною інформацією.

Визначення координат точок планово-висотного обґрунтування необхідне для створення тривимірних моделей і великомасштабних планів місцевості в заданій системі координат і включає наступні етапи:

- складання проєкту мережі основного та робочого планово-висотного обґрунтування;
- закріплення точок основного планово-висотного обґрунтування та проведення польових вимірювань за планово-висотною прив'язкою точок основного обґрунтування;
- камеральна обробка, що включає етапи: зрівнювання результатів польових вимірювань та складання каталогу координат точок основного планово-висотного обґрунтування;
- оцінка точності створення основного зйомочного обґрунтування;
- створення робочого планово-висотного обґрунтування.

Процес виконання тривимірного наземного лазерного сканування передбачає кілька етапів, кожен з яких має важливе значення для досягнення високої точності і якості отриманих даних:

- на першому етапі сканер встановлюється на запроєктованій точці, використовуючи штатив. Висота установки штатива визначається таким чином, щоб забезпечити максимальне охоплення досліджуваної території або об'єкта на одному скані;

– навколо сканера встановлюються спеціальні марки, що служать точками робочого зйомочного обґрунтування (рисунок 7, 8). Вони можуть бути різних типів, залежно від завдань сканування. Плоскі марки зазвичай використовуються для орієнтації сканів щодо зовнішньої системи координат, а об'ємні марки – для точного взаємного орієнтування і з'єднання сканів між собою;



Рисунок 7. Плоскі марки зі світловідбивною поверхнею [267]



Рисунок 8. Об'ємні марки [267]

– визначення координат центрів спеціальних марок здійснюється з точок основної опорної мережі. Оцінка точності створення робочого обґрунтування може бути виконана шляхом багаторазового вимірювання центрів спеціальних марок або визначення координат тих самих марок з різних пунктів основної зйомочної мережі. Це дозволяє порівняти результати вимірів та оцінити їх точність, використовуючи стандартні методи, аналогічні оцінці точності тахеометричних вимірювань, де враховується похибка, що виникає при зйомці з різних точок;

– зйомка місцевості та об'єктів навколо точки розташування сканера. На цьому етапі проводиться сканування об'єкта, враховуючи як його геометричні особливості, так і особливості навколишнього середовища. Якщо сканер оснащений цифровою камерою, одночасно виконується цифрова зйомка для створення фотограмметричних матеріалів, що забезпечують додаткові дані для подальшої обробки та аналізу;

– переміщення сканера на наступну точку зйомки та повторення вищеписаних етапів забезпечує безперервність процесу сканування, охоплюючи всі необхідні ділянки території. Це дозволяє отримати дані з різних точок зйомки, що необхідні для формування повної та точної 3D-моделі об'єкта або місцевості.

Камеральні роботи та попередня обробка даних наземного лазерного сканування є важливою складовою процесу отримання точних 3D-моделей об'єктів. Первинна обробка отриманих даних, як правило, здійснюються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, розробленого виробником сканера. Попередня обробка даних починається з фільтрації точок, яка включає етапи очищення та уточнення інформації. Для цього застосовуються різні типи фільтрів, що допомагають усунути шумові точки, які можуть виникнути через несприятливі умови сканування або обмеження технічних характеристик сканера. Серед найбільш поширених методів – фільтрація для видалення шумів, осереднення даних для зменшення випадкових похибок, а також фільтрація високих та низьких частот, що дозволяє зберегти тільки

значущі дані для подальшої обробки. Фільтрація даних дозволяє значно підвищити якість точкової хмари, зробивши її більш придатною для створення точних 3D-моделей та подальшої аналізу, зменшуючи кількість зайвих або неправильних точок, що можуть спотворювати результати.

Наступним етапом є зовнішнє орієнтування одиночних точкових моделей (сканів), що полягає в приведенні отриманих даних до визначеної системи координат. Оцінка точності зовнішнього орієнтування сканів проводиться за допомогою обчислення середньоквадратичної похибки одиниці ваги. Це дозволяє оцінити точність розміщення сканів у заданій системі координат та визначити, наскільки коректно виконано їх орієнтування. Похибка оцінюється з використанням алгоритмів, що реалізовані в програмному забезпеченні, яке використовується для обробки даних лазерного сканування. Середньоквадратична помилка дає змогу виявити можливі спотворення або неточності при поєднанні точок із різних сканів, що є важливим для подальшої побудови точних тривимірних моделей.

Експорт зовнішньо орієнтованих сканів є важливим етапом для подальшої роботи з даними, оскільки багато програмних продуктів для обробки сканів використовують власні формати файлів, що можуть відрізнятися від стандартів, які застосовуються у програмному забезпеченні для управління сканером. Тому необхідно виконати експорт даних з програми, що контролює процес сканування, у відповідний формат для подальшого використання. В результаті цього процесу створюється файл, що містить єдину точкову модель, яка об'єднує всі скани в одну цілісну структуру, готову до подальшого аналізу та обробки в іншому програмному середовищі.

Основна частина камеральних робіт у технології створення тривимірних моделей місцевості на основі даних наземного лазерного сканування полягає у побудові векторних моделей об'єктів ситуації.

Для створення тривимірних векторних моделей об'єктів ситуації застосовуються такі режими:

– автоматичний – використовується для моделювання об'єктів правильної геометричної форми, таких як будівельні елементи стандартної форми. У цьому режимі процес векторизації значно прискорюється завдяки алгоритмам, які автоматично розпізнають та перетворюють точкові дані у векторні елементи;

– напівавтоматичний – використовується для об'єктів зі складною, але все ж достатньо визначеною формою. Тут векторизація частково автоматизована, але потребує певного втручання оператора для коректного визначення контурів та уточнення деталей;

– інтерактивний – застосовується для об'єктів неправильної або дуже складної геометрії, а також для малих об'єктів, де автоматичні алгоритми можуть не справитися з точністю. В цьому режимі оператор активно взаємодіє з моделлю, коригуючи контури вручну.

Для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) на основі даних наземного лазерного сканування розроблена наступна методика:

– на першому етапі в інтерактивному режимі видаляються точки, які належать об'єктам, таким як дерева, високі конструкції (опори ЛЕП, будівлі, труби, цистерни тощо). Це робиться для зменшення складності точкової моделі, що полегшує подальшу обробку даних за допомогою автоматичних фільтрів;

– застосовується топографічний фільтр для відокремлення точок, що не відносяться до земної поверхні. Для досягнення бажаного результату необхідно кілька разів використовувати цей фільтр, поступово збільшуючи розмір оброблюваної ділянки. Це дозволяє поліпшити точність і детальність моделі;

– для моделювання рельєфу застосовується метод TIN (Triangulated Irregular Network), що представляє поверхню як нерегулярну мережу трикутників.

Для остаточного оформлення топографічного плану доцільніше використовувати системи автоматизованого проєктування або геоінформаційні системи.

Програмне забезпечення для обробки даних наземного лазерного сканування.

Усі виробники НЛС пропонують своє програмне забезпечення для управління сканером та обробки результатів сканування. Більшість таких програмних продуктів дозволяє вирішувати прикладні завдання в різних галузях.

Програмне забезпечення, яке використовується в технології лазерного сканування, залежно від його функціонального призначення, можна поділити на кілька груп (таблиця 2).

Сучасні розробники програмного забезпечення для наземного лазерного сканування орієнтуються на створення комплексних платформ, які забезпечують інтегроване вирішення кількох завдань. Такі програмні продукти не лише ефективно керують лазерними сканерами та обробляють отримані дані, але й включають функції, притаманні системам автоматизованого проєктування. Це дозволяє значно розширити можливості використання таких платформ у різних галузях, наприклад [268]:

- проведення порівняння реальної моделі з проєктною, що дає змогу оцінити відповідність виконаного сканування заданим параметрам і виявити розбіжності. Цей процес включає в себе візуалізацію графічних відомостей, що дають чітке уявлення про відхилення, що виникають під час будівництва або реконструкції об'єктів;

- редагування тривимірних векторних моделей, що дає змогу коригувати структуру та геометрію моделей на основі нових вимірів або уточнень. Це дозволяє створювати детальні та точні 3D-моделі, що відповідають реальному стану об'єктів;

- створення моделей у вигляді Solid-геометрії (твердих тривимірних тіл), що є важливим кроком у розвитку проєктування, адже такі моделі є набагато більш точними, ніж традиційні моделі, побудовані з набору полігонів або структурних ліній. Це дозволяє здійснювати аналіз об'ємів, інтерференцій і навіть симуляції взаємодії об'єктів у тривимірному просторі, що надзвичайно важливо для розробки складних інженерних проєктів.

Таблиця 2.

Класифікація ПЗ за функціональним призначенням [268]

Програмне забезпечення	Призначення програмного забезпечення
Керуюче програмне забезпечення	– управління сканером для задання роздільної здатності сканування, секторів сканування шляхом візуального вибору об'єктів, режиму сканування, режиму роботи цифрової камери; – візуалізація сканів у режимі реального часу; – контроль отриманих результатів; – налаштування та калібрування сканера; – тестування сканера, виявлення можливих несправностей; – врахування помилок, пов'язаних з впливом зовнішніх умов навколишнього середовища; – об'єднання сканів; – зовнішнє орієнтування сканів; – експорт результатів сканування.
Програмне забезпечення для створення єдиної точкової моделі	– об'єднання сканів; – зовнішнє орієнтування сканів; – редагування точкової моделі: сегментування та розрідження; – візуалізація точкової моделі; – експорт та друк.
Програмне забезпечення для побудови тривимірних моделей і двовимірних креслень за даними сканування	– створення нерегулярної трикутної мережі (TIN) і NURBS-поверхні за масивом точок; – редагування TIN; – створення моделі об'єкта за допомогою геометричних примітивів; – профілювання; – побудова креслень; – проведення вимірювань (довжин, діаметрів, площ, об'ємів об'єктів); – візуалізація побудованої моделі; – автоматизовані механізми створення креслень; – побудова ізоліній; – можливість порівняння побудованої моделі з проєктною; – текстурування тривимірної моделі; – експорт та виведення на друк результатів обробки даних НЛС.
Комплексне програмне забезпечення	– всі функції керуючого програмного забезпечення; – створення точкової моделі; – побудова тривимірних моделей і двовимірних креслень за даними наземного лазерного сканування.

Цей підхід не лише підвищує точність і ефективність обробки даних, але й дозволяє інтегрувати сканування в більш широкий процес проєктування, що включає аналіз, моделювання та візуалізацію результатів.

Області застосування даних наземного лазерного сканування.

Наземне лазерне сканування має широкий спектр застосувань у різних галузях, що підкреслює його універсальність та ефективність у вирішенні складних задач [262-264, 266, 269]:

- картографування місцевості. НЛС забезпечує високу точність і продуктивність у створенні цифрових карт. Воно ефективне як для малозабудованих територій, так і для зон із великою щільністю об'єктів, проте менш придатне для ділянок із густою рослинністю;

- документування архітектурних пам'яток. Технологія НЛС використовується для сканування складних форм і деталей об'єктів культурної спадщини, що сприяє їхньому збереженню та реконструкції;

- нафтогазова промисловість. НЛС ефективне для моделювання об'єктів із високою щільністю трубопроводів, кабелів та резервуарів, забезпечуючи швидкість і точність, необхідні для аналізу складної інфраструктури;

- медицина. Тривимірне сканування тіла дозволяє створювати точні моделі для виготовлення ортопедичних пристроїв, таких як протези та корсети, із максимальною індивідуалізацією;

- будівництво та інженерія. НЛС застосовують для моніторингу будівель, виявлення деформацій, створення детальних моделей для реконструкції або проєктування нових об'єктів;

- гірничча промисловість. Технологія використовується для сканування кар'єрів, тунелів та інших гірничих об'єктів, що дозволяє швидко створювати тривимірні моделі для аналізу стабільності конструкцій або оцінки обсягів видобутих матеріалів;

- транспортна інфраструктура. Наземні лазерні сканери активно застосовуються для оцінки стану доріг, мостів та залізничних шляхів. Це

допомагає ідентифікувати дефекти покриття, оцінити геометрію та забезпечити якісний моніторинг стану об'єктів;

– енергетика. Сканування електростанцій, ліній електропередач і підстанцій дозволяє оцінити стан обладнання, проводити регулярний моніторинг і планувати ремонтні роботи;

– кіноіндустрія та віртуальна реальність. НЛС використовується для створення цифрових моделей реальних об'єктів у віртуальних середовищах, що робить його незамінним інструментом для фільмів, ігор і симуляторів;

– агроіндустрія. Сканування сільськогосподарських територій для моніторингу рельєфу, іригаційних систем і земельних ресурсів.

*Практична реалізація: особливості лазерного 3D-сканування
з використанням об'ємних марок*

Об'ємні марки слугують з'єднувальними точками, які забезпечують точність і надійність поєднання сканів з різних станцій. У дослідженні, проведеному в закритому спортивному приміщенні, сфери розміщували на різних висотах і поверхнях для перевірки їх ефективності за різних умов освітлення і кутів відбиття лазера (рисунок 9, 10). Зйомка проводилась лазерним сканером Trimble TX6, який відомий своєю здатністю автоматично визначати такі марки в хмарі точок [270].

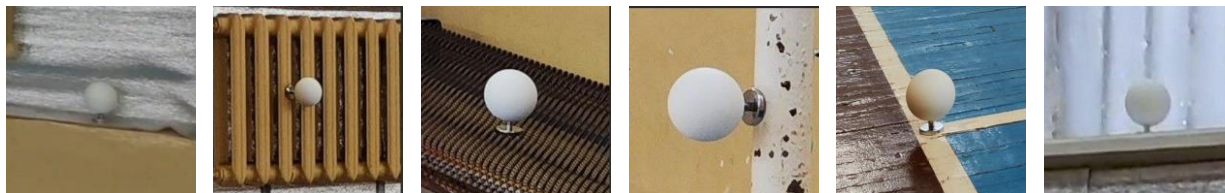


Рисунок 9. Приклади розміщення об'ємних марок [270]

Під час експерименту було проведено сканування з двох станцій на третьому рівні точності, що дозволило отримати понад 555 мільйонів точок зі станції. Програмне забезпечення Trimble RealWorks автоматично розпізнавало об'ємні марки (рисунок 11), зшивало результати сканування, а також надавало

можливість редагувати та аналізувати отримані дані. Для зшивання було обрано 8 з 12 марок, які забезпечили точне поєднання сканів (рисунк 12). Решта марок, через перешкоди у вигляді волейбольної сітки, були ідентифіковані лише з одного боку.

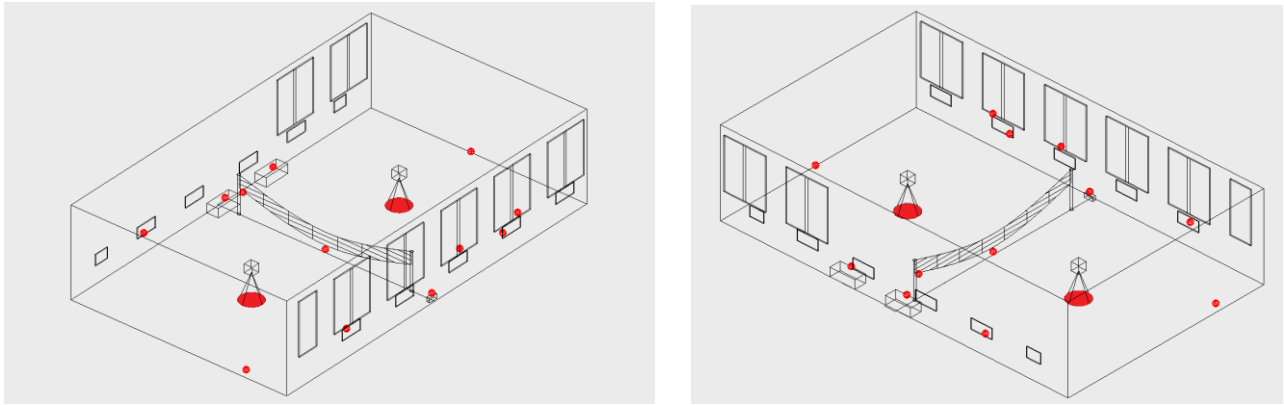


Рисунок 10. Схема розташування магнітних сфер [270]

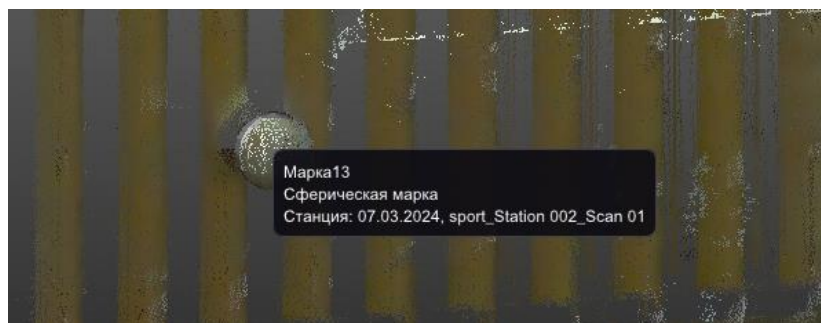


Рисунок 11. Виявлена марка з автоматичним призначенням номера [270]

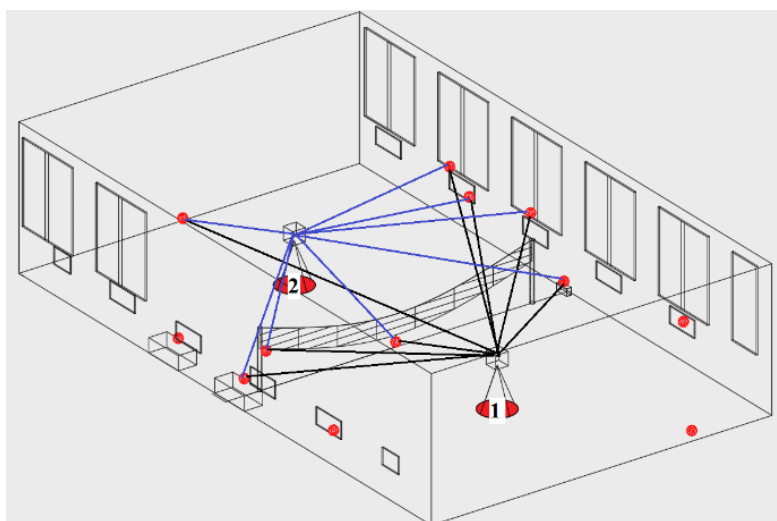


Рисунок 12. Схема зшивання за марками [270]

Однак під час зшивання хмари точок виникли труднощі, пов'язані з паралаксом на краях і неправильною реєстрацією деяких точок. Це вимагало додаткового часу для ручного очищення даних. Незважаючи на це, зшита хмара точок забезпечила достатню деталізацію для подальшого аналізу об'єкта (рисунок 13).

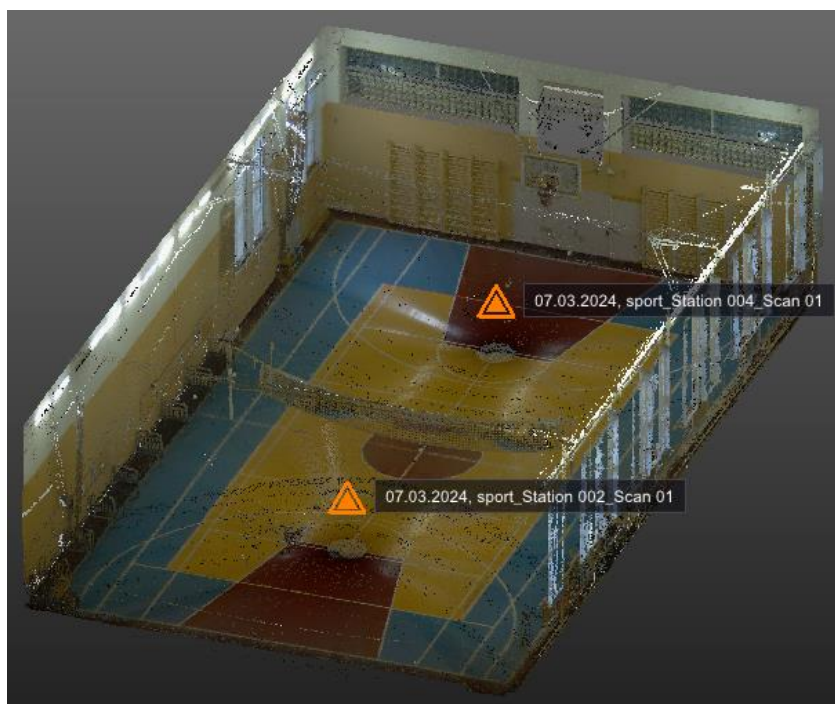


Рисунок 13. Зшита хмара точок закритого приміщення [270]

*Практична реалізація: особливості лазерного 3D-сканування
з використанням плоских марок*

Особливу увагу слід приділити складній геометрії об'єктів. Відображення об'єктів із нетиповими формами або значною протяжністю вимагає точності та збереження коректної геометрії під час об'єднання даних із кількох сканувальних станцій. У цьому процесі важливу роль відіграють плоскі марки, які мають перевагу тривалого використання, що спрощує подальші зйомки або корекцію даних [271].

Плоскі марки, представлені у вигляді простих геометричних примітивів, мають низку характеристик, серед яких вектор нормалі, відстань до початку координат і довжина нормалі, що визначається математично.

Експеримент проведено в закритому спортивному приміщенні площею 25×15 м. На різних поверхнях приміщення були встановлені плоскі марки розмірами 10×10 см та 15×15 см, які слугували референсними точками для лазерного сканера Trimble TX6 (рисунок 14, 15). Обробка даних виконувалася в програмному забезпеченні Trimble RealWorks.

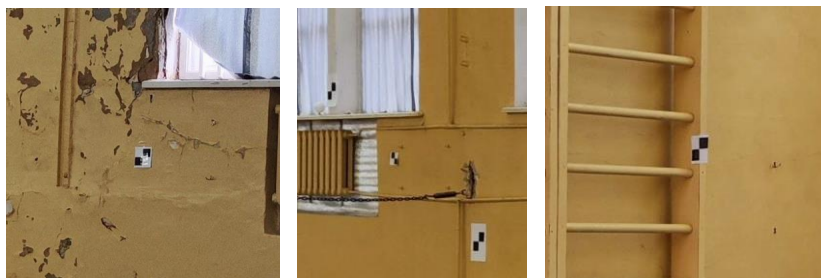


Рисунок 14. Приклади розміщення плоских марок [271]

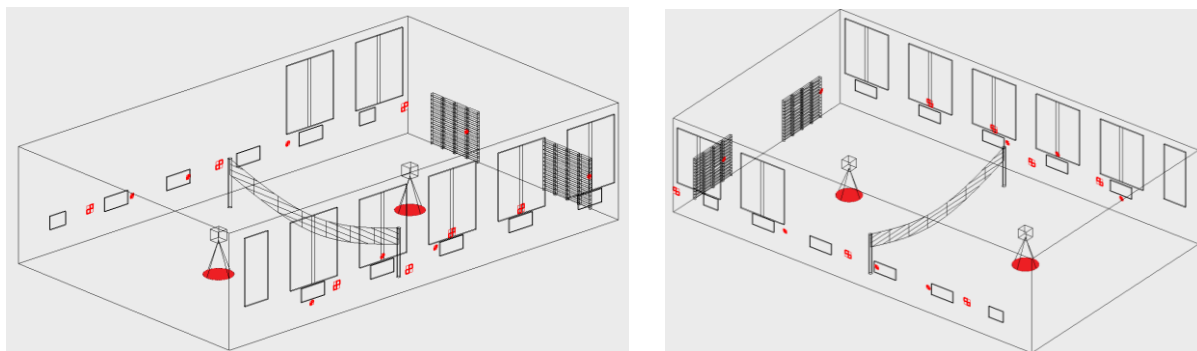


Рисунок 15. Схема розташування плоских марок [271]

Результати сканування показали, що більші марки були ефективнішими для забезпечення точності зшивання. Водночас на нерівностях поверхонь програма іноді розпізнавала фонові елементи як додаткові марки, що потребувало детальної перевірки (рисунок 16).

Для зшивання було виконано прив'язку сканів з двох станцій шляхом розпізнавання 5-ти плоских марок з 10-ти. Марки з 6-го по 10-ий номер теж були розпізнані сканером, але тільки з одного боку. Ще 5 марок не були розпізнані взагалі (рисунок 17).



Рисунок 16. Неіснуючі плоскі марки [271]

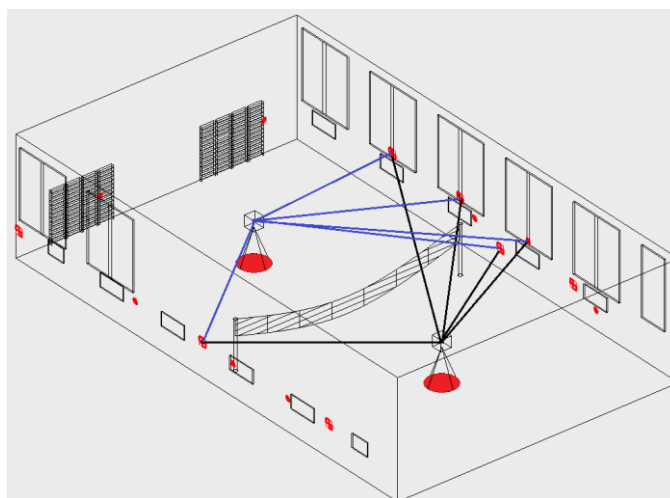


Рисунок 17. Схема зшивання за марками [271]

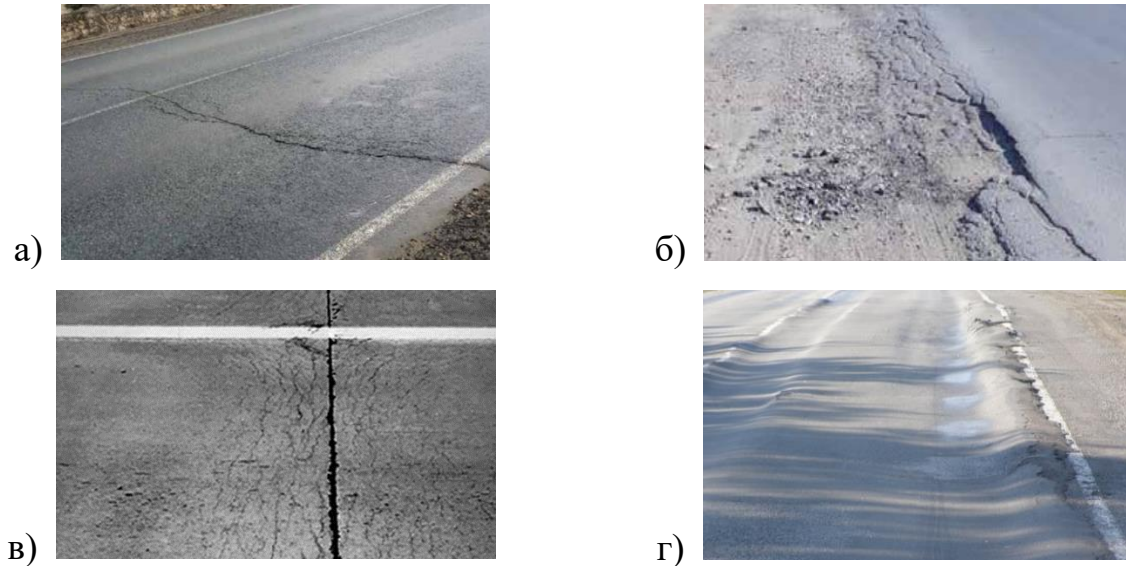
Зшита хмара точок наведена на рисунку 13.

*Практична реалізація: технологія наземного лазерного 3D-сканування
для оцінки стану дорожнього покриття.*

Дослідження у сфері моніторингу дорожнього покриття підкреслюють важливість точного отримання інформації для оптимального управління інфраструктурою. Лазерне 3D-сканування визнане одним із найточніших способів створення моделей дорожнього покриття, що дозволяє фіксувати дрібні дефекти. У той же час, інтеграція цієї технології у дорожню галузь України перебуває на початкових етапах і потребує адаптації нормативної бази [272].

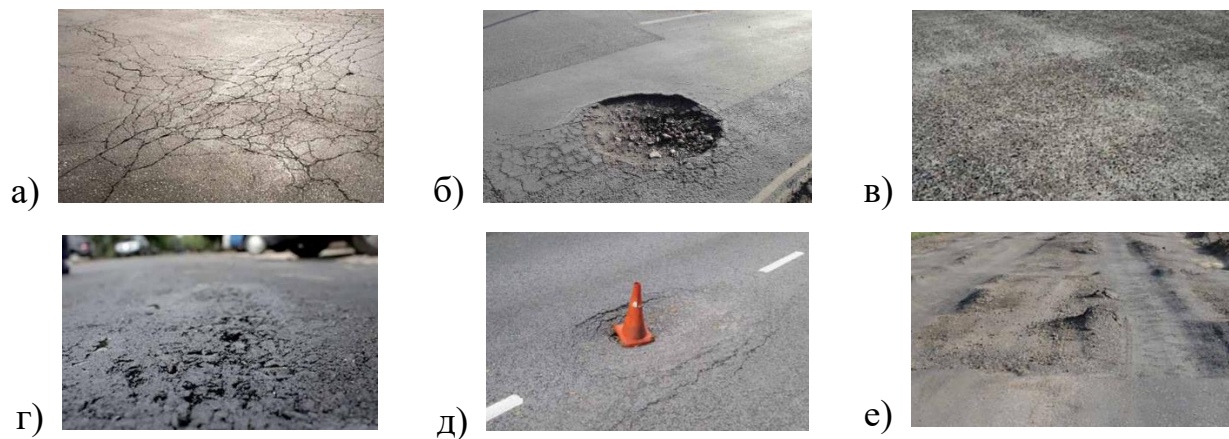
За допомогою лазерного 3D-сканування можна ідентифікувати основні види дефектів, серед яких (рисунок 18, 19):

- лінійні дефекти: тріщини, руйнування крайки дорожнього одягу, колійність;
- площинні дефекти: вибоїни, сітки тріщин, просідання.



а) – поперечні тріщини; б) – руйнування крайки дорожнього одягу;
в) – руйнування деформаційних швів; г) – колійність.

Рисунок 18. Лінійні дефекти [273]



а) – сітка тріщин; б) – вибоїна; в) – викришування;
г) – лущення; д) – просідання; е) – проломи

Рисунок 19. Площинні дефекти [273]

Оптимальними характеристиками сканера для дорожнього моніторингу є точність до 2 мм, радіус дії до 100 м та широкий кут поля зору. Наприклад,

Trimble TX6 відповідає цим вимогам (рисунок 20), забезпечуючи високу деталізацію і стабільність у діапазоні температур від 0 до 40 °С. Підготовка до роботи включає перевірку обладнання, налаштування параметрів (рисунок 21) та врахування особливостей місцевості.

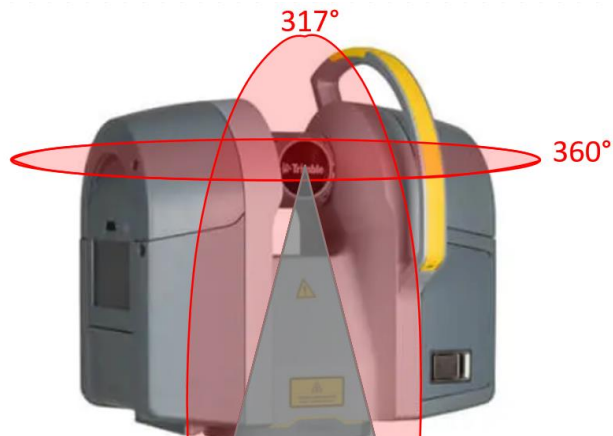


Рисунок 20. Поле зору сканера Trimble TX6



Рисунок 21. Мінімальна висота триноги
для оцінки стану дорожнього покриття

Правильне розташування станцій мінімізує ризик утворення «мертвих зон» (рисунок 22). Для невеликих ділянок (~150 м) достатньо 4-7 станцій, для довгих (до 1 км) – до 25 станцій. У складних умовах, таких як транспортні розв'язки, сканування повинно виконуватись з обох рівнів конструкції.

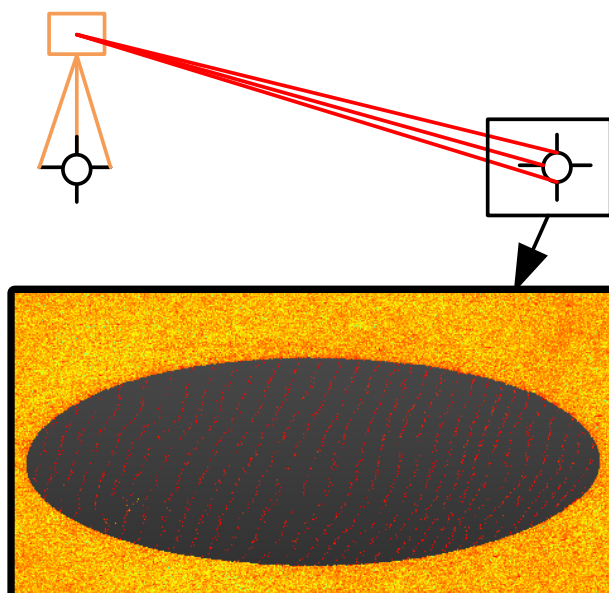


Рисунок 22. Результати сканування у «мертвій зоні»
з суміжної станції

Після збору даних здійснюється їх очищення, фільтрація та об'єднання в єдину тривимірну модель. Цей етап є критично важливим для якісного аналізу дефектів і формування звітності.

Практична реалізація: технологія обробки даних лазерного 3D-сканування

Застосування сучасних лазерних 3D-сканерів суттєво пришвидшує польові роботи, оскільки більшість завдань з обробки даних переміщається на камеральний етап. Під час польової зйомки збирається велика кількість даних, які потребують подальшої систематизації, фільтрації та побудови інтегрованих цифрових моделей. Це піднімає питання вибору відповідного програмного забезпечення для роботи з великими обсягами інформації, оскільки від цього залежить точність і ефективність подальшої обробки даних.

Існує багато методів обробки хмар точок, що активно розробляються для аналізу топографічних об'єктів. Одним з основних підходів є метод визначення середньої лінії об'єктів, що дозволяє створювати згладжені просторові лінії, мінімізуючи відхилення траєкторії та забезпечуючи точне моделювання.

Алгоритми машинного навчання відіграють ключову роль у точному та швидкому розпізнаванні структурних елементів, навіть в умовах складної геометрії, що дає змогу підвищити ефективність аналізу. Для створення детальних профілів місцевості застосовуються методи інтерполяції хмар точок, що дозволяють точно відтворити геометрію поверхні, враховуючи усі її особливості.

Виявлення дефектів або аномалій здійснюється шляхом аналізу текстур та застосування алгоритмів фільтрації та згладжування, що дозволяє зменшити шум і підвищити точність результатів. Крім того, важливою є класифікація хмар точок для автоматизованого розпізнавання об'єктів, таких як дорожні знаки, розмітка чи інші елементи інфраструктури.

Для складних моделей, які потребують більш детального аналізу, застосовуються методи параметричної ідентифікації, що включають визначення нормалей до точок поверхні, що сприяє покращенню точності топографічного аналізу та моделювання об'єктів. Такий підхід дозволяє отримувати високоточні 3D-моделі для різноманітних цілей, від інженерних розрахунків до ландшафтного дизайну [274-278].

У програмному забезпеченні Trimble RealWorks впроваджені автоматизовані алгоритми, що спрощують процес об'єднання хмар точок. Спочатку імпортуються дані, отримані під час сканування, після чого застосовуються алгоритми автоматичного зшивання, які визначають спільні точки і поверхні між сканами для їх точного з'єднання (рисунки 23).

Для початкового етапу обробки даних важливо здійснити автоматичну класифікацію об'єктів на зйомці, що дозволяє ефективно структурувати хмару точок та виділити елементи для подальшого аналізу. В залежності від типу середовища (відкрите або закрите), застосовуються різні класифікації.

Наприклад, при обробці хмар точок для відкритих територій, інструменти Trimble RealWorks дозволяють автоматично класифікувати дані за наступними категоріями (рисунки 24):

– «Ground» (поверхня землі);

- «Building» (будівлі);
- «Poles and Signs» (стовпи та знаки);
- «Power Lines» (лінії електропередач);
- «High Vegetation» (висока рослинність);
- «Remaining» (залишкові об'єкти).

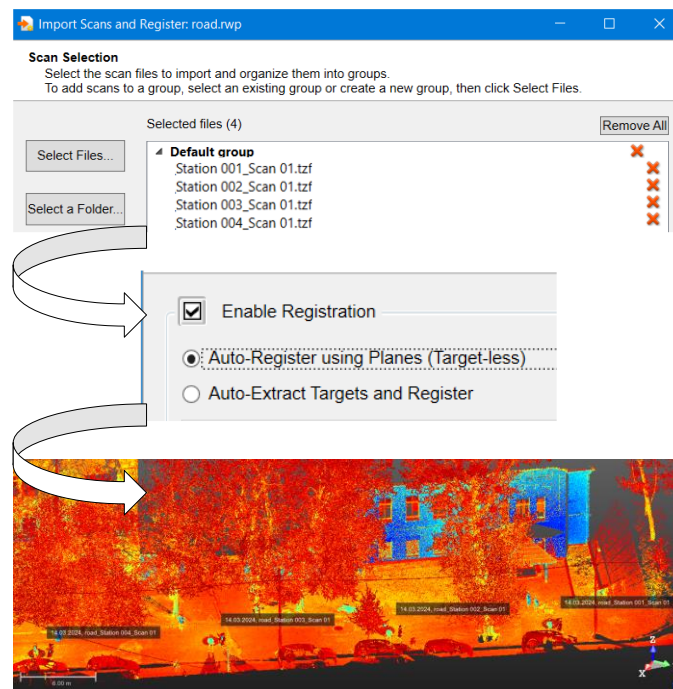


Рисунок 23. Етапи автоматизованого процесу «зшивки» хмар точок у програмному забезпеченні Trimble RealWorks

Це дає змогу зосередити увагу на певних елементах, наприклад, дорожньому покритву, знижуючи навантаження на комп'ютерні системи при обробці великих обсягів даних. Крім того, фільтрація точок за різними параметрами дозволяє підвищити ефективність обробки та точність результатів.

Окрім зазначених класифікацій, існують й інші специфічні категорії, що використовуються залежно від конкретної задачі. Ця гнучкість класифікації дозволяє застосовувати технології лазерного сканування для різноманітних типів об'єктів та умов, забезпечуючи точне та ефективне моделювання.

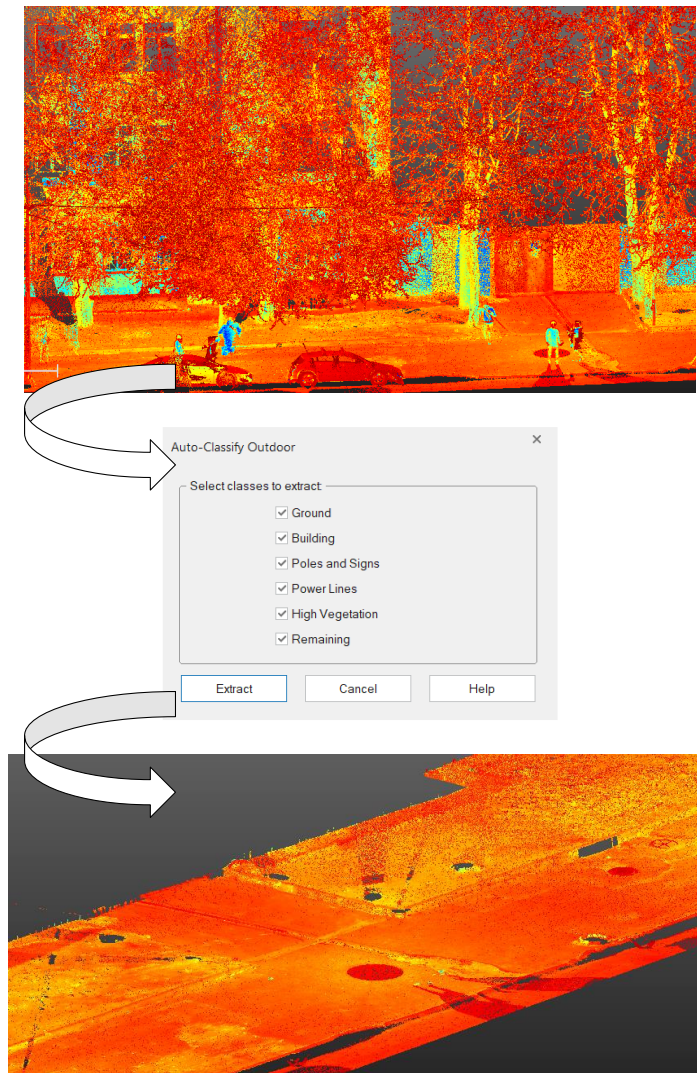


Рисунок 24. Результат автоматичної класифікації об'єктів на вулиці
в Trimble RealWorks із вибраним класом «Ground»

Процес очищення даних включає видалення зайвих точок, які можуть вплинути на точність аналізу (рисунок 25). Для цього застосовують сегментацію, що дозволяє вручну перевірити та усунути небажані елементи (рисунок 26). Алгоритми машинного навчання демонструють високу точність, але можуть потребувати ручного коригування через залишкові помилки, такі як неправильно класифіковані об'єкти.

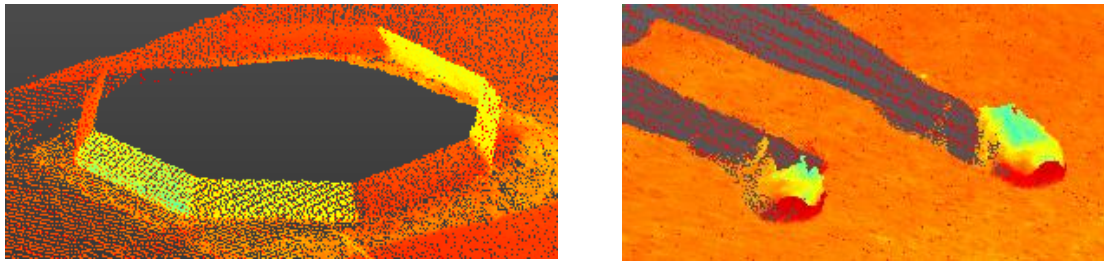


Рисунок 25. Приклад об'єктів, які потребують ручного видалення після автокласифікації для забезпечення коректності моделі

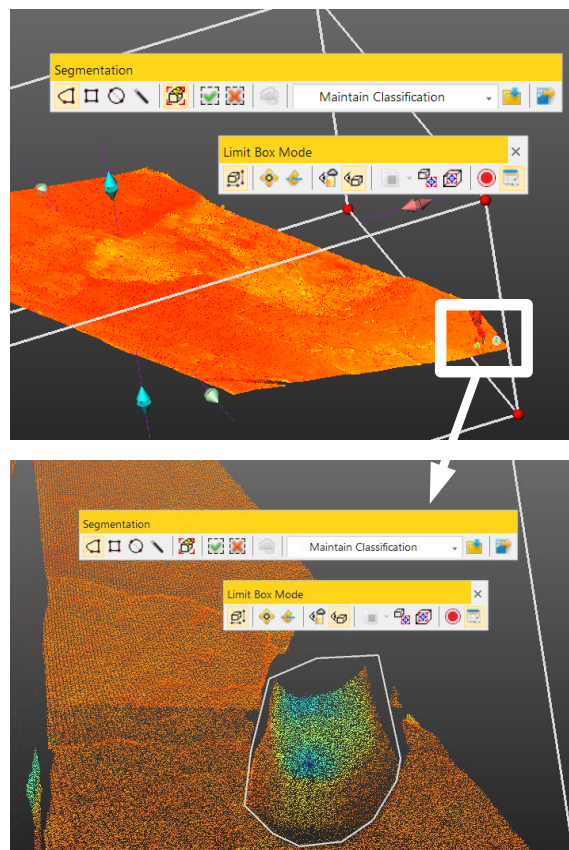


Рисунок 26. Процес ручного видалення точок з використанням інструменту обмеження області для запобігання втрати інформації

Після очищення хмари точок наступним етапом є створення Mesh-моделі (рисунок 27), яка є тривимірним відображенням геометрії ділянки. Ця модель створюється шляхом з'єднання точок хмари між собою, формуючи трикутну сітку, що відображає поверхню з високою точністю. Mesh-модель дозволяє візуалізувати деталі об'єкта, а також використовувати її для подальших аналітичних процедур, таких як розрахунок об'ємів, аналіз деформацій,

перевірка відповідності проектним вимогам чи оцінка стану поверхні. Така модель може бути інтегрована в різні програмні комплекси для здійснення точних вимірювань і моделювання, що робить її незамінною для геодезичних та будівельних робіт.

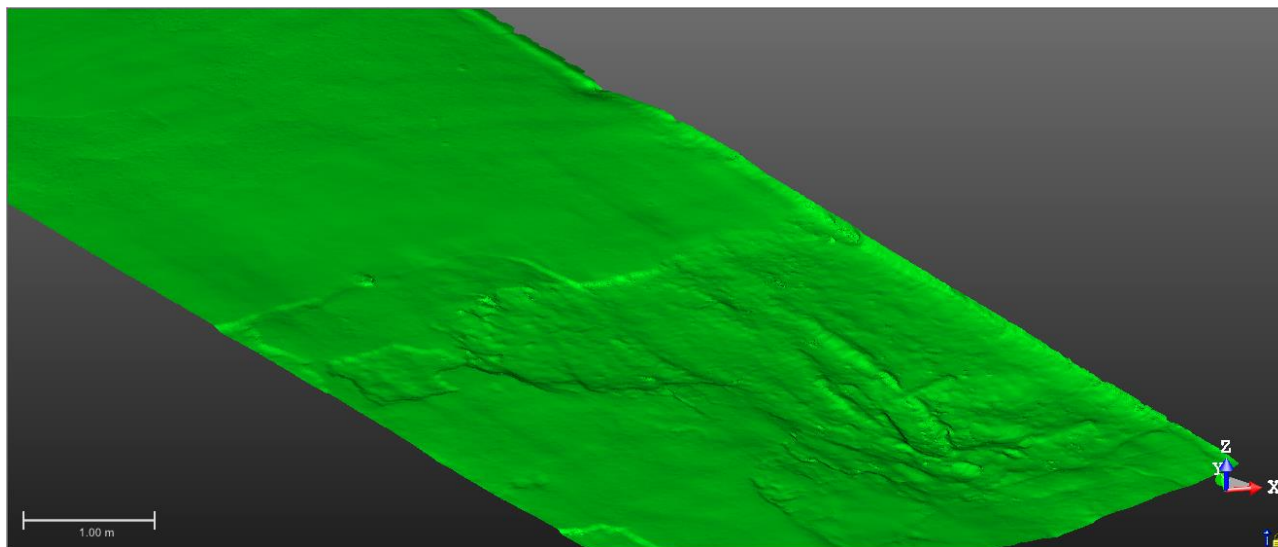


Рисунок 27. Триангуляційна модель для проведення
оцінки стану дорожнього покриття

Висновки. Виходячи з досвіду застосування наземних лазерних сканувальних систем для вирішення прикладних завдань у різних галузях народного господарства, можна сміливо стверджувати про впевнене впровадження цієї технології в повсякденну практику. Концепція повної автоматизації збору просторових даних про об'єкти місцевості за допомогою лазерної локалізації дозволяє вирішити дві основні проблеми будь-якого виробництва:

- підвищення продуктивності робіт;
- поліпшення якості та надійності отриманої продукції.

Фактично точність визначення координат точок місцевості за допомогою наземних лазерних сканерів залежить в основному від характеристик приладу, тобто виключається низка помилок при наведенні на марку, нумерації пікетів тощо. Підвищення надійності результатів сканування зумовлене, перш за все, зменшенням впливу людського фактору при роботі з приладом. При камеральній

обробці матеріалів польових сканувальних зйомок все ще значну роль відіграє досвід оператора в інтерпретації великого обсягу даних лазерного сканування, і проблема автоматизації обробки цих даних стає головною. Однак у цьому напрямі активно розробляються алгоритми та програмні продукти, що дозволяють спростити та автоматизувати роботу камеральника.

Швидкому впровадженню технології наземного лазерного сканування в виробництво сприяла тенденція переходу від класичної двовимірної картографії та проєктування до тривимірного опису об'єктів реального світу. Переваги тривимірних моделей за їх інформативністю та наочністю безперечні в порівнянні з традиційними двовимірними планами, картами та кресленнями. За останні два десятиріччя технологія опису об'єктів реального світу за допомогою тривимірного комп'ютерного моделювання перетворилася з фантастики на реальність. Однак, якщо розглядати глобальний перехід від традиційних карт і ГІС до тривимірних, слід ще вирішити низку важливих проблем, пов'язаних з зберіганням і організацією даних, стандартизацією форматів, розробкою принципово нових методів аналізу даних, оскільки кількість топологічних зв'язків у тривимірному світі як мінімум на порядок більша. Попри ці проблеми, вже сьогодні є ряд практично реалізованих проєктів з тривимірного моделювання окремих об'єктів та цілих територій для вирішення конкретних завдань. Наприклад, у умовах зростання вартості земельних ресурсів у деяких країнах впроваджуються системи тривимірного кадастру об'єктів нерухомості, що дозволяють при реєстрації враховувати обсяг використовуваного простору, а не площу земельної ділянки.

Таким чином, наземні лазерні сканери є новим вимірювальним інструментом, що робить реальним і звичайним отримання тривимірних моделей різного призначення.

Це дозволяє стверджувати, що найближчим часом технологія наземного лазерного сканування, якщо не повністю витіснить інші методи, то, принаймні, займе провідну позицію в галузі польового збору метричної інформації для тривимірного моделювання об'єктів і територій.