

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Леськів Олександр
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**« Використання 3D наземного лазерного сканування при
польових дослідженнях і моніторингу різних об'єктів»**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

О. Леськів, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: к.т.н. доцент Роксолана Олесків
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Леськів

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Використання 3D наземного лазерного сканування при польових дослідженнях і моніторингу різних об'єктів »

керівник роботи: к.т.н. доцент Роксолана Олесків

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Методи вишукування поверхні
2. Візуалізація та аналіз
3. Застосування лазерного 3D-сканування

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Методи вишукування поверхні		
2	Візуалізація та аналіз		
3	Застосування лазерного 3D-сканування		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ Леськів О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Олеськів Р.

Анотація

Технологія тривимірного лазерного сканування ландшафту, хоч і відносно нещодавно з'явилася, вже здійснила переворот у сфері геодезичних вимірювань.

Цей спосіб забезпечує надзвичайно докладний масив цифрової інформації, відображений як "хмара точок", кожна з яких точно локалізована у тривимірному просторі.

Важливою перевагою даної методики є значна густина точок, що гарантує роздільну здатність в межах 5-10 мм.

Завдяки цьому стає можливим створення високоточних моделей як окремих об'єктів, так і значних територій.

Однак, для продовження дослідження відсканованої площини, точки, що розподілені нерівномірно, потребують перетворення в об'ємну інформацію про поверхню.

Це досягається через процес відновлення (реконструкції) цієї самої поверхні.

Отриману, відновлену поверхню можна ефективно використовувати в різних техніках тривимірної візуалізації.

Це суттєво спрощує подальший аналіз і широке практичне застосування результатів.

Більше того, на основі такої 3D-моделі стає можливим формування двовимірних профілів та контурів.

Це забезпечує її сумісність з поширеними програмними рішеннями для географічних інформаційних систем (ГІС) та систем автоматизованого проектування (САПР).

У процесі виконання бакалаврської роботи було проведено дослідження, спрямовані на вивчення різноманітних варіантів

застосування наземного лазерного сканування в інженерно-геодезичній практиці.

Детально проаналізовано потенціал використання цього методу для вирішення задач об'ємного аналізу, відстеження змін, що відбуваються з об'єктами, створення детальних та великомасштабних карт місцевості, забезпечення контролю при будівництві тунелів, сканування гірських порід, а також цифрового картографування геологічних відслонень.

Також було проаналізовано застосування наземного лазерного сканування для спостереження за геологічними розрізами, оскільки прогрес у сфері 3D-сканування, безпілотної аерофотозйомки та дронного моніторингу, у поєднанні з інтеграцією з BIM (інформаційне моделювання будівель), відкриває перспективи для глибшої взаємодії з іншими сучасними підходами.

Це створює передумови для розробки ще детальніших цифрових моделей об'єктів і територій, що набуває особливої ваги в будівництві, плануванні міст та управлінні природними багатствами.

Ключові слова: 3D лазерне сканування, відновлення поверхні, відстеження, цифрове картографування, об'ємний аналіз, тунелі, геоінформаційні системи, BIM, безпілотні технології.

Abstract

The technology of three-dimensional laser scanning of the landscape, although it appeared relatively recently, has already revolutionized the field of geodetic measurements.

This method provides an extremely detailed array of digital information, displayed as a "cloud of points", each of which is precisely localized in three-dimensional space.

An important advantage of this technique is the significant density of points, which guarantees a resolution within 5-10 mm.

This makes it possible to create high-precision models of both individual objects and significant territories.

However, to continue studying the scanned plane, points that are unevenly distributed need to be converted into volumetric information about the surface.

This is achieved through the process of restoration (reconstruction) of this very surface.

The resulting, restored surface can be effectively used in various three-dimensional visualization techniques.

This significantly simplifies further analysis and wide practical application of the results.

Moreover, on the basis of such a 3D model, it becomes possible to form two-dimensional profiles and contours.

This ensures its compatibility with common software solutions for geographic information systems (GIS) and computer-aided design (CAD) systems.

In the process of performing the bachelor's thesis, research was conducted aimed at studying various options for the application of ground laser scanning in engineering and geodetic practice.

The potential of using this method to solve problems of volumetric analysis, tracking changes occurring with objects, creating detailed and large-scale maps of the terrain, ensuring control during the construction of tunnels, scanning rocks, as well as digital mapping of geological outcrops was analyzed in detail.

The application of terrestrial laser scanning for geological section monitoring was also analyzed, as progress in the field of 3D scanning, unmanned aerial photography and drone monitoring, combined with integration with BIM (building information modeling), opens up prospects for deeper interaction with other modern approaches.

This creates the prerequisites for the development of even more detailed digital models of objects and territories, which is of particular importance in construction, urban planning and natural resource management.

Keywords: 3D laser scanning, surface restoration, tracking, digital mapping, volumetric analysis, tunnels, geographic information systems, BIM, unmanned technologies.

Зміст

Вступ

1. Методи вишукування поверхні

2. Візуалізація та аналіз

2.1 Методи візуалізації

2.2 Застосування лазерного сканування в інженерії та геодезії.

3 Застосування лазерного 3D-сканування

3.1 Аналіз і моніторинг обсягів

3.2 Детальні та вичерпні топографічні карти

3.3 Дослідження різних тунелів

3.4 Зйомка скель

3.5 Цифрове картографування виступів

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Тривимірне лазерне сканування місцевості – це передовий спосіб збору просторової інформації, котрий знайшов широке застосування у сферах на кшталт геодезії, будівництва, архітектури та інженерії.

Висока точність та швидкість виконання зробили цей метод незамінним для спрощення процесів проектування та аналізу, формуючи деталізовані цифрові моделі територій та споруд.

У сучасних наземних лазерних сканерах реалізовано принцип вимірювання часу, необхідного лазерному променю для проходження дистанції від приладу до поверхні об'єкта й повернення назад.

Ось ключові складові сканера: лазерний діод, що генерує лазерне світло; система дзеркал, що спрямовує промінь у двох вимірах; детектор, який вловлює відбите випромінювання; комп'ютер, що обробляє зібрану інформацію.[4]

Промінь, відхиляючись, взаємодіє з поверхнями та повертається назад до сканера під різними кутами.

З надзвичайною точністю вимірюється час, потрібний сигналу для подорожі, що дає можливість точно визначити відстань до кожної окремої точки сканування.

Програмний комплекс інтерпретує отримані дані про азимут, кут місця та відстань для побудови тривимірної моделі простору, визначаючи координати кожної точки.

Зібрані відомості складають собою густу «хмару пунктів», кожна з яких визначається координатами X , Y та Z . Це надає змогу формувати

докладні 3D-образи навколишнього середовища та різноманітних предметів.

До того ж, передові лазерні сканери мають можливість фіксувати інформацію про кольори, використовуючи RGB-сенсори, що гарантує реалістичне кольорове відтворення об'єкта.

Для отримання цілісного зображення складного або великого об'єкта, процес сканування, як правило, виконується з декількох різних позицій.

Наступним етапом є обробка даних спеціальним програмним забезпеченням, яке здійснює інтеграцію численних сканів у цілісну 3D-модель.

Це дозволяє позбутися «тіньових зон» (частин, на які лазерний промінь не потрапив під час окремих сканувань).

Основні переваги наземного лазерного сканування полягають у наступному:

- Виняткова точність - отримані дані характеризуються надзвичайною роздільною здатністю, здатною досягати 5-10 мм. Це дає можливість чітко фіксувати навіть найдрібніші елементи об'єкта.
- Висока продуктивність - сучасне обладнання дозволяє здійснити повне сканування території на 360 градусів всього за лічені хвилини, забезпечуючи оперативність процесу.
- Відсутність фізичного контакту - метод сканування не передбачає безпосереднього дотику до об'єкта. Це є ключовою перевагою при роботі з небезпечними або складними для доступу зонами.
- Детальне документування - створення точної тривимірної моделі дає можливість збереження інформації для подальшого вивчення, порівняльного аналізу та реконструкції об'єктів.

Попри значну користь, варто зазначити про певні недоліки цього підходу:

- Чутливість до зовнішніх факторів - опади, імла, скупчення пилу, а також надлишкове освітлення здатні негативно впливати на точність зібраної інформації.

- Значні фінансові витрати - лазерні сканери вирізняються високою ціною, що може ускладнити їх широке застосування на практиці.

- Потреба в подальшій обробці - отримані хмари точок вимагають додаткової обробки, що потребує потужних програмних засобів та відповідних знань.

3D лазерне сканування знайшло застосування в різноманітних галузях, зокрема:

- Геодезія та картографія: створення високоточних цифрових копій місцевості, топографічні зйомки для потреб землевпорядкування та поділу земельних ресурсів.

- Будівництво та архітектура: контроль геометричних параметрів будівельних об'єктів, моніторинг технічного стану споруд, розробка цифрових інформаційних моделей будівель (BIM).

- Інженерні дослідження: контроль деформаційних процесів конструкцій, аналіз стану інфраструктурних об'єктів.

- Культурна спадщина: оцифрування архітектурних пам'яток та творів мистецтва з метою збереження історичної спадщини.

- Гірничодобувна промисловість: моніторинг змін у відкритих кар'єрах та підземних гірничих виробках, прогнозування обсягів видобутку корисних копалин.

Пристрої для лазерного 3D-сканування представлені у лінійках визнаних лідерів ринку (див. рис. 1):

Leica RTC360 - забезпечує оперативне сканування та автоматичну обробку масивів точок;

FARO FOCUS 3D - відзначається компактністю та високою точністю, ідеальний для геодезичних робіт і будівництва;

Trimble X7 - інтелектуальна система з функцією нівелювання, що гарантує отримання надзвичайно деталізованих даних.



Рисунок 1. Три актуальні моделі лазерних сканерів.

Хоча фундаментальна схема функціонування лазерних сканерів залишається незмінною, вартість кінцевої інформації суттєво

розрізняється, залежно від інженерних специфікацій конкретного зразка або компанії-виробника.

Розходження проявляються в ключових параметрах, зокрема, у роздільній здатності сканування, точності замірів, швидкості збору інформації, межах вимірювання та розбіжності лазерного променя.

Ось ключові параметри, що впливають на якість отриманих сканів:

- Роздільна здатність: Вона показує, наскільки густо розташовані точки у хмарі та якою є деталізація отриманого зображення.

Збільшення роздільної здатності безпосередньо веде до кращої точності та деталізації об'єкта.

- Точність вимірювань: Відхилення визначених координат від реального положення точки в тривимірному просторі.

У високоякісних сканерів похибка вимірювань обмежується декількома міліметрами.

- Швидкість сканування: Визначається частотою лазерних імпульсів, що впливає на загальну швидкість збору інформації.

Деякі зразки здатні фіксувати понад мільйон точок щосекунди.

- Розбіжність лазерного променя: Характеризує розширення променя на відстані, що впливає на дальність його дії.

Чим менша похибка, тим краще видно деталі на великій відстані.

Відповідно до цих характеристик, одні лазерні сканери ідеально підходять для точних інженерних розрахунків, а інші — для швидкого отримання загальних даних у великих обсягах.

1. Методи вишукування поверхні

Просте представлення у вигляді хмари точок відкриває користувачам детальний тривимірний огляд відсканованої сцени або об'єкту.

Але, для ефективнішого застосування цих даних, зокрема у проєктуванні, інженерії та архітектурі, слід реконструювати поверхні, щоб отримати точну тривимірну модель.

Основні підходи до відновлення поверхонь:

1. Триангуляція

Цей метод, що широко застосовується, трансформує скупчення точок на поверхню, розбиваючи простір на трикутники;

2. Реконструкція поверхонь, що ґрунтується на згладжуванні скупчень точок, щоб створити суцільні поверхні

3. Інтерполяція на основі сітки

Він спирається на хмари точок для генерації впорядкованих сіток висот, що застосовуються для створення регулярних сіток висот;

4. Нерівномірні раціональні В-сплайни (NURBS).

Використовуються для створення плавних поверхонь, апроксимуючи набори точок кривими та поверхнями.

Деякі користувачі віддають перевагу роботі, інтегруючи прив'язані або неродаговані хмари точок в уже наявні 3D-моделі або бази даних, наприклад, AutoCAD, Revit, ArcGIS чи спеціалізоване програмне забезпечення для інженерного моделювання (рис. 2).

Це забезпечує швидкий аналіз відсканованих об'єктів без потреби у формуванні комплексних поверхонь, що є надзвичайно корисним у геодезії та архітектурних дослідженнях.

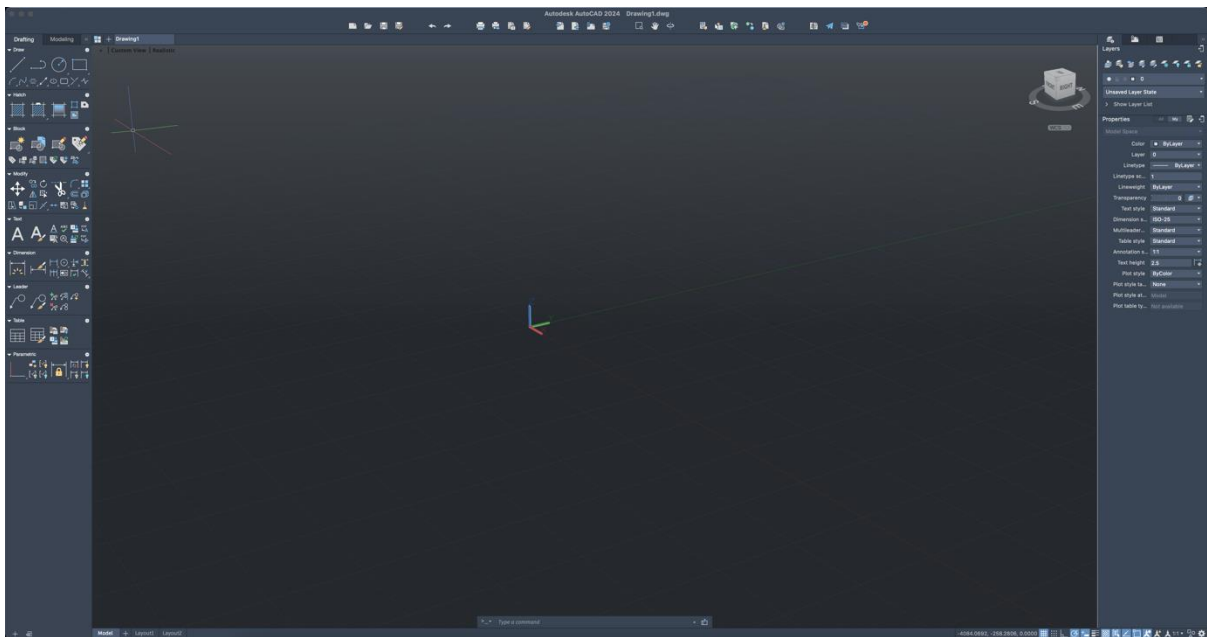


Рисунок 2 Початкова сторінка AutoCad

Щоб повністю розібратися з геометрією та властивостями відсканованого предмету, необхідно перетворити хмару точок, що розташовані нерівномірно, у неперервну 3D-модель поверхні.

Для цього використовується особливе програмне забезпечення, яке базується на найновіших алгоритмах реконструкції.

У 3D геодезичному моделюванні застосування методів реконструкції поверхні має два основні завдання:

1. Відтворення масштабних об'єктів (форм) з використанням обмеженої інформації (як приклад, створення моделей ландшафту або забудови міських районів);
2. Реконструкція мініатюрних тривимірних поверхонь на основі щільних масивів точок (застосовується в промисловості, архітектурі та при реставрації).

Алгоритми реконструкції можна класифікувати як полігональні та параметричні:

1. Полігональні методи передбачають створення моделей поверхонь через використання сіток з елементарних геометричних форм, найчастіше - трикутників.

Центральним прийомом виступає 3D триангуляція (триангуляція Делоне), яка дозволяє побудувати мережу трикутників, сполучаючи ключові точки у тривимірному просторі.

Переваги:

- Більша швидкість обчислення, порівняно з альтернативами.
- Ідеально підходить для поверхонь із значною шорсткістю.

Недоліки:

- Можливість формування витягнутих або неточних трикутників за умови обмеженої кількості вихідних точок.
- Недостатня реалістичність гладких поверхонь, що може ускладнювати моделювання об'єктів із плавними формами.

2. Параметричні методи оперують математичними функціями для формування плавних кривих і площин.

Найбільш розповсюджений метод - NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), варіативна система кривих, що забезпечує реалістичніше відтворення поверхонь.

Переваги:

- Дозволяє створювати більш згладжені поверхні, що мають природний вигляд.
- Спроможний компенсувати відсутні або неякісні ділянки у хмарі точок.

Недоліки:

- Вимагає значних обчислювальних потужностей.
- Складний у застосуванні та потребує спеціалізованого програмного забезпечення.

Полігональні підходи вигідні для оперативного моделювання, коли в пріоритеті швидкість роботи.

Параметричні ж методи, хоча й потребують більше часу та потужностей, забезпечують вищу точність.

Вибір відповідної методики залежить від задачі, ресурсних обмежень та бажаного рівня деталізації.

Для наочного порівняння двох технік інтерполяції, зверніться до зображення на Рисунку 3.[4]

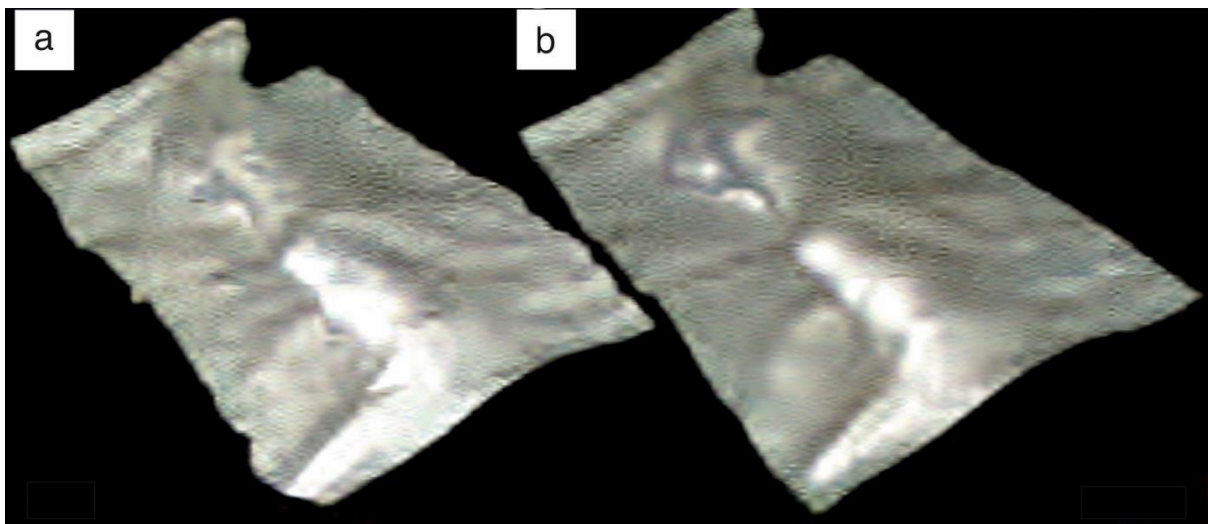


Рисунок 3. Порівняння 3D тріангуляції (а) та параметричної поверхні (б) форми після цифрового рендерингу

2. Візуалізація та аналіз

Подальшим етапом після відбудови поверхні постає візуалізація, використовуючи різноманітні способи 3D-зображення.

Головна задача візуалізації – надати користувачеві змогу глибше розібратися зі структурою й особливостями об'єкта, через інтерактивний перегляд предметів та сцен під різними ракурсами і напрямками.

2.1 Методи візуалізації

Для виділення специфіки поверхні, як-от шорсткість, структура і форма рельєфу, можуть бути застосовані різні способи освітлення.

Скажімо, форму об'єкта можна зробити більш наочною для дослідження, використовуючи різноманітні джерела світла, аби сформувати тіні та відблиски.

Колірні співвідношення

В залежності від сили лазерного променя, точкам може бути присвоєно різні кольори, що дозволить візуалізувати поверхні згідно їх форми та властивостей матеріалу (до прикладу, під час вивчення будівельних матеріалів чи об'єктів природи).

Текстурування поверхонь

Використовуючи отримані дані текстури, на точки або фрагменти поверхні можливо накладати різноманітні текстури.

Інтеграція з іншими програмами та системами

Проте, щоб мати більш вичерпний аналіз обробленої поверхні, візуального представлення часто буває замало.

Кінцеві споживачі нерідко мають потребу в інтеграції здобутих 3D-моделей з вже наявними програмними засобами, як-от ГІС (Геоінформаційні системи) чи САПР (Системи автоматизованого проектування).

На основі відновлених 3D-поверхонь можна формувати 2D-профілі та лінії місцевості.

Це відкриває можливість точніше планувати будівництво, обчислювати навантаження, оцінювати ймовірні ризики, а також інтегрувати дані з інших джерел.[4,5]

2.2 Застосування лазерного сканування в інженерії та геодезії.

Нижче наведено низку випадків практичного використання лазерного сканування, а також перелік ключових переваг цього методу в царині інженерії та геодезії:

1. Створення моделей інфраструктури: Це включає в себе процес реконструкції наявних будівель, а також різноманітних інженерних споруд, що дозволяє візуалізувати та аналізувати їх стан.

2. Створення карт місцевості: Детальне моделювання місцевості дає можливість проводити поглиблений аналіз геологічних особливостей та гідрологічних характеристик певної території.

3. Відстеження змін довкілля: Застосування лазерного сканування дозволяє здійснювати оцінку змін, що відбуваються як у природних, так і в урбанізованих ландшафтах, виявляючи такі явища, як зсуви або процеси ерозії берегової лінії.

Ці випадки ілюструють, як лазерне сканування має потенціал значно покращити як точність, так і продуктивність процесу зйомки.

Критичним є інтегрування з широко вживаним програмним забезпеченням та платформами для обробки інформації, щоб гарантувати

клієнтам простий доступ до даних, отриманих шляхом лазерного сканування.[4]

Наприклад:

- AutoCAD та Revit широко застосовуються для розробки високоточних будівельних проєктів з використанням сканованих даних. Інтегрування з хмарию 3D точок дозволяє створювати деталізовані моделі для проєктування та оновлення будівель.

- ArcGIS та суміжні геоінформаційні системи (ГІС) забезпечують картографічне відображення місцевості та аналіз просторових даних, що важливо для планування інфраструктурних об'єктів і управління природними ресурсами.

Цей метод забезпечує автоматизовану діагностику стану об'єктів, виявлення їхніх деформацій, моніторинг змін з плином часу та імітацію взаємодії різноманітних інженерних споруд.

Не менш важливим є формування двовимірних профілів або контурів.

Ці компоненти дають змогу проводити детальний аналіз території, визначати висотні відмітки рельєфу, проєктувати об'єкти на місцевості та розробляти плани будівництва автошляхів, мостів, гребель та інших об'єктів інфраструктури.

Процедура генерування контурних ліній з хмар точок задіює спеціалізовані алгоритми для створення площин та схилів, що дозволяє формувати високоточні карти з відображенням всіх особливостей місцевості.

3 Застосування лазерного 3D-сканування

3.1 Аналіз і моніторинг обсягів

Вимірювання та контроль об'єму наповнення і наносів в кар'єрах є ключовим аспектом при видобутку корисних копалин, а застосування 3D лазерного сканування відкриває важливі перспективи в цьому процесі, особливо з точки зору точності та оперативності отримання інформації.

Визначення об'єму вилученої гірської маси та видобутого сировинного матеріалу становить собою непросте завдання для кар'єрів та шахт, враховуючи необхідність ретельного вимірювання змін об'єму з плином часу.

За допомогою лазерного сканування існує можливість створити високоточну 3D модель насипу чи відвалу та з високою точністю визначати зміни у формі об'єкта.[4]

Це може суттєво зменшити час на заміри та покращити точність визначення об'єму.

Робочий процес виглядає так:

1. Первинне сканування: спершу здійснюється первинне сканування, аби зафіксувати вихідний стан насипу чи відвалу. Це як «нульова точка» для майбутніх порівнянь;

2. Періодичні сканування: періодичні сканування виконуються на кожному етапі робіт, щоб сформувати актуальну 3D-модель поверхні;

3. Підрахунок змін: шляхом зіставлення свіжих даних із попередньою базовою лінією можна автоматично розрахувати об'єм матеріалу, що був досипаний чи забраний.

Отже, ця методика може бути застосована не лише для надзвичайно точного обчислення об'єму греблі, а й для виявлення будь-яких змін чи відхилень, як-от незаконне збільшення або зменшення об'єму.[4]

Це має критичне значення для контролю безпеки та продуктивності гірничих розробок.

Переваги застосування лазерного сканування для спостереження за кар'єрами:

- Швидкість та висока точність: лазерне сканування суттєво пришвидшує процес збору даних та забезпечує значно вищу точність у порівнянні зі звичайними способами.

- Мінімізація людського впливу: всі обчислення виконуються автоматично за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що значно знижує ймовірність помилок, спричинених людським фактором.

- Постійний моніторинг: систематичний збір інформації дає змогу виявляти зміни в реальному часі та приймати рішення, спираючись на актуальні дані.

- Високоточні виміри об'ємів: використання тривимірних моделей робить можливим проведення надзвичайно точних об'ємних розрахунків, що недоступно при використанні традиційних методів.

- Легкість обробки та аналізу: отримані дані без проблем інтегруються в геоінформаційні системи (ГІС) та інші програмні засоби для подальшого аналізу й планування.

Ці переваги роблять лазерне сканування наріжним каменем сучасної геодезії та розробки кар'єрів, суттєво збільшуючи результативність і скрупульозність вимірів.

Застосування 3D лазерного сканування сприяє відчутному зменшенню терміну виконання вимірювань та досягненню більшої точності, ніж при використанні традиційних способів.

Технологія лазерного сканування дає змогу виконувати вимірювання за лічені хвилини, в той час як традиційні методи потребують значних витрат часу та залучення значної кількості робочого ресурсу. [4,6]

Окрім цього, акуратність і деталізованість інформації, отриманої завдяки лазерним сканерам, дозволяє значно покращити якість аналізу та прийняття рішень, що надзвичайно важливо, наприклад, під час спостереження за об'ємами заповнення та відвалів у кар'єрах.

Зразок, що ілюструє цей процес, продемонстровано на рисунку 3.[4]



Рисунок 3. Приклад застосування технології 3D-зйомки з використанням лазерного сканування у розрізі кар'єру.

3.2 Детальні та вичерпні топографічні карти

Технологія 3D лазерного сканування демонструє надзвичайну продуктивність у процесі формування детальних топографічних планів значних земельних ділянок.

Це може бути актуально для будівельних майданчиків, зон видобутку корисних копалин або територій, які зазнали змін у наслідок різних процесів.

Процедура сканування не вимагає безпосереднього контакту з потенційно небезпечними або важкодоступними зонами.

Це забезпечує оперативний та безпечний збір даних, що робить цей метод суттєво ефективнішим, ніж традиційні підходи до зйомки.[5]

Переваги лазерного сканування у топографічному картографуванні:

1. Швидкість роботи: лазерне сканування дає змогу оперативно виконувати детальні топографічні зйомки на великих територіях, суттєво зменшуючи час, потрібний для збору інформації;

2. Безпека: відсутня необхідність перебувати поблизу небезпечних місць, оскільки сканування реалізується дистанційно.

3. Точність та деталізація: лазерне сканування формує точні тривимірні моделі місцевості з високою щільністю точок, що критично важливо для складного рельєфу;

4. Нечутливість до складного рельєфу: лазерне сканування забезпечує високу точність і деталізацію навіть у випадках, коли місцевість відрізняється особливою складністю або є важкодоступною.

Проте, лазерне сканування здатне генерувати високоточні цифрові копії.

Показовим прикладом використання цієї технології є дослідження гребель, де навколишній ландшафт відзначається складною структурою та хаотичним розташуванням елементів (див. Рис. 4).[4]

За стандартних умов, підхід до подібних об'єктів супроводжувався б обмеженнями або ризиками, але лазерні сканери забезпечили можливість побудови деталізованої цифрової копії місцевості, не вимагаючи безпосереднього контакту з об'єктом.

Завдяки цьому, фахівці з геодезії отримали інструмент для ефективної роботи у випадках, коли традиційні методи вимірювання виявлялись недоцільними або надто небезпечними.

Наведений приклад акцентує увагу на ключовій ролі технології лазерного сканування у виконанні складних та ризикованих геодезичних зйомок території в різноманітних умовах.



Рисунок 4. Тривимірна хмара точок лазерного сканування дамби.

3.3 Дослідження різних тунелів

Для вимірювання геометрії підземних споруд створено спеціалізоване лазерне обладнання, здатне генерувати надзвичайно точні дані про внутрішню будову тунелю.

Дане обладнання функціонує на базі визначення різниці фаз між лазерним променем, який було випромінено, та променем, що відбився, що забезпечує підвищену точність і отримання більш деталізованих даних, особливо на невеликих дистанціях.

Такий метод перевершує за швидкістю та точністю традиційні лазерні далекоміри, котрі ґрунтуються на вимірюванні часу проходження сигналу.

Переваги фазових лазерних сканерів у тунелебудуванні:

- Виняткова точність: Фазові сканери збирають детальні тривимірні дані про геометрію тунелів, відзначаючись високою роздільною здатністю

- Стрімке сканування: Ці пристрої використовують принцип вимірювання фазових зсувів, що є критичним у проєктах, де час - ключовий фактор, забезпечуючи оперативний збір даних і, як наслідок, швидке отримання точних результатів;

- Контроль параметрів шару та форми: Лазерні сканери, засновані на фазовому принципі, є оптимальним рішенням для інспекції товщини торкрет-бетону (методика укріплення тунелів) та відстеження остаточної форми тунельних конструкцій. Це дає можливість надійно керувати якістю виконання робіт;

- Моніторинг змін деформацій: Завдяки своїй високій точності фазові сканери бездоганно підходять для спостереження за

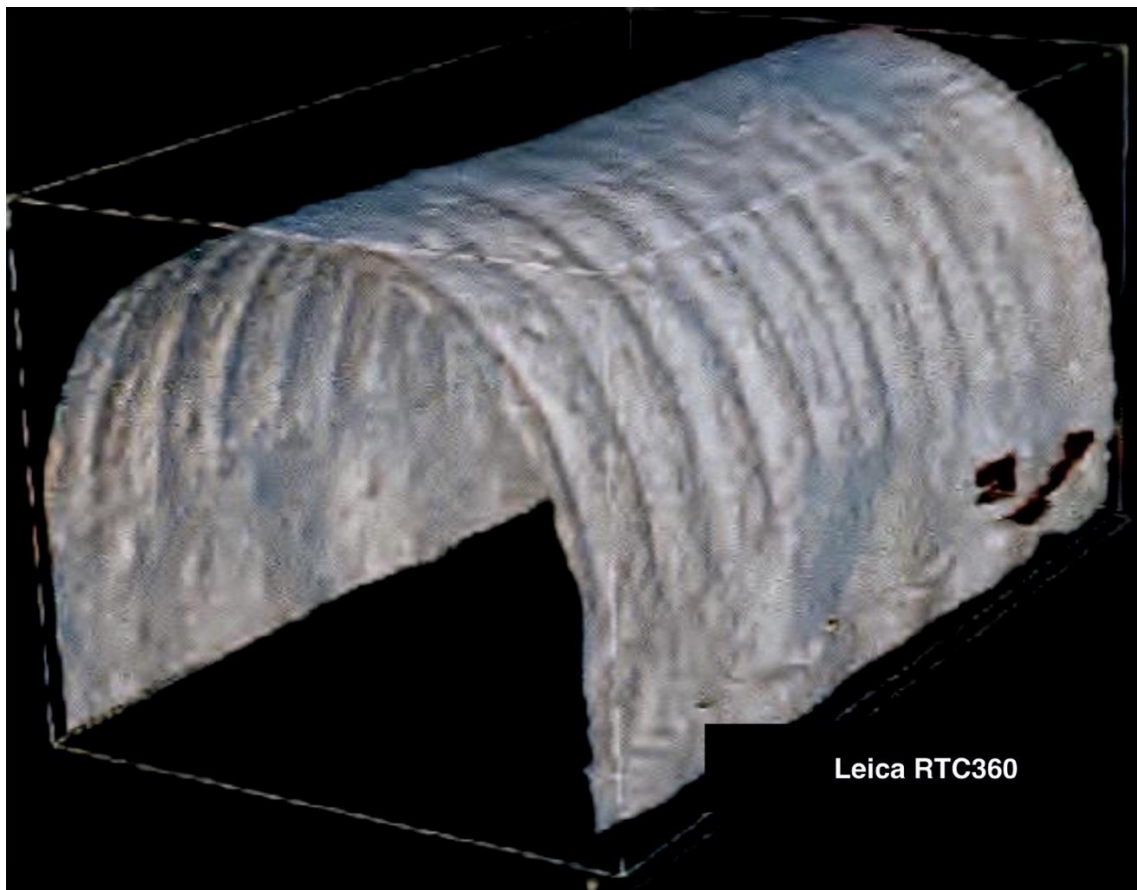
деформаційними процесами в тунелях, що має вирішальне значення для гарантування безпеки.[4]

Фазові сканери легко інтегруються у малогабаритні транспортні засоби або візки, що переміщуються вздовж тунельних шляхів.

Завдяки цьому досягається можливість оперативного та високоточного сканування всієї протяжності тунелю, уникнувши громіздкого устаткування.

Як показано на ілюстрації (Рис. 5), такий спосіб сканування сприяє ретельному відстеженню геометричних параметрів тунелю, виявляючи деформації та відхилення, включаючи аналіз товщини та однорідності матеріалу поверхні.[4,5]

Зазначена технологія знаходить застосування на різних етапах зведення та подальшого функціонування тунелів, забезпечуючи виняткову точність і швидкість вимірювань, що істотно спрощує виконання інженерно-геодезичних робіт у подібних умовах.



Рисусонок 5. Лазерне сканування автодорожнього тунелю.

3.4 Зйомка скель

Цифрове картування зсувів та вивчення гірських порід – це ще один важливий напрямок використання тривимірного наземного лазерного сканування, який відкриває широкі можливості в геодезії та інженерії.

Лазерні сканери дозволили здійснювати високоточні вимірювання гірських порід та зсувів навіть у місцях з обмеженим доступом, що раніше потребувало великих затрат часу та ресурсів.

Переваги 3D лазерного сканування для картографування зсувів та гірських порід

1. **Безпека:** Лазерне сканування забезпечує можливість досліджувати гірські породи на безпечній відстані, уникнувши наближення до потенційно небезпечних місць. Це є критичним, особливо для скель, де існує ризик обвалів чи зсувів.

2. Доступність важкодоступних місць: Сканування гірських порід можна здійснювати без потреби в громіздкому та дорогому обладнанні, на кшталт риштувань чи спеціальних підйомників. Це значно зменшує як фінансові витрати, так і терміни виконання робіт.

3. Висока точність та деталізація: Лазерні сканери дозволяють створювати надзвичайно точні та деталізовані 3D-моделі поверхні гірських порід, що в свою чергу сприяє точному картографуванню та поглибленому аналізу.

4. Виявлення потенційно небезпечних блоків: Завдяки 3D-візуалізації та створенню 2D-профілів стає можливим ідентифікувати нестабільні блоки та місця, де ймовірні зсуви. Це дає змогу вчасно реагувати та вживати необхідні заходи безпеки.

5. Оцінка стійкості: Дані, отримані в результаті лазерного сканування, можуть бути використані для аналізу стабільності гірських порід, прогнозування потенційно небезпечних зсувів та оцінки загального ризику.

Сканування площин скель, яке продемонстровано на рисунках 6 та 7, видає вичерпні відомості для подальшого дослідження та визначення стійкості даних формацій.[4]

Це сприяє фахівцям-інженерам і геодезістам при прийнятті рішень стосовно стійкості скель і безпеки транспортних шляхів.

Відтак, застосування тривимірного лазерного сканування для створення карт зсувів та скельних порід дозволяє відчутно скоротити час, збільшити точність і забезпечити безпеку в обставинах, де звичайні способи вимірювань є недоречними або становлять небезпеку.



Рисунок 6. Цифрове тривимірне відображення хмар над стрімкими скелями, створене з використанням лазерного сканера Leica.

Насиченість (світлість) відбитого лазерного проміння формує зображення, що майже не відрізняється від фотографії.

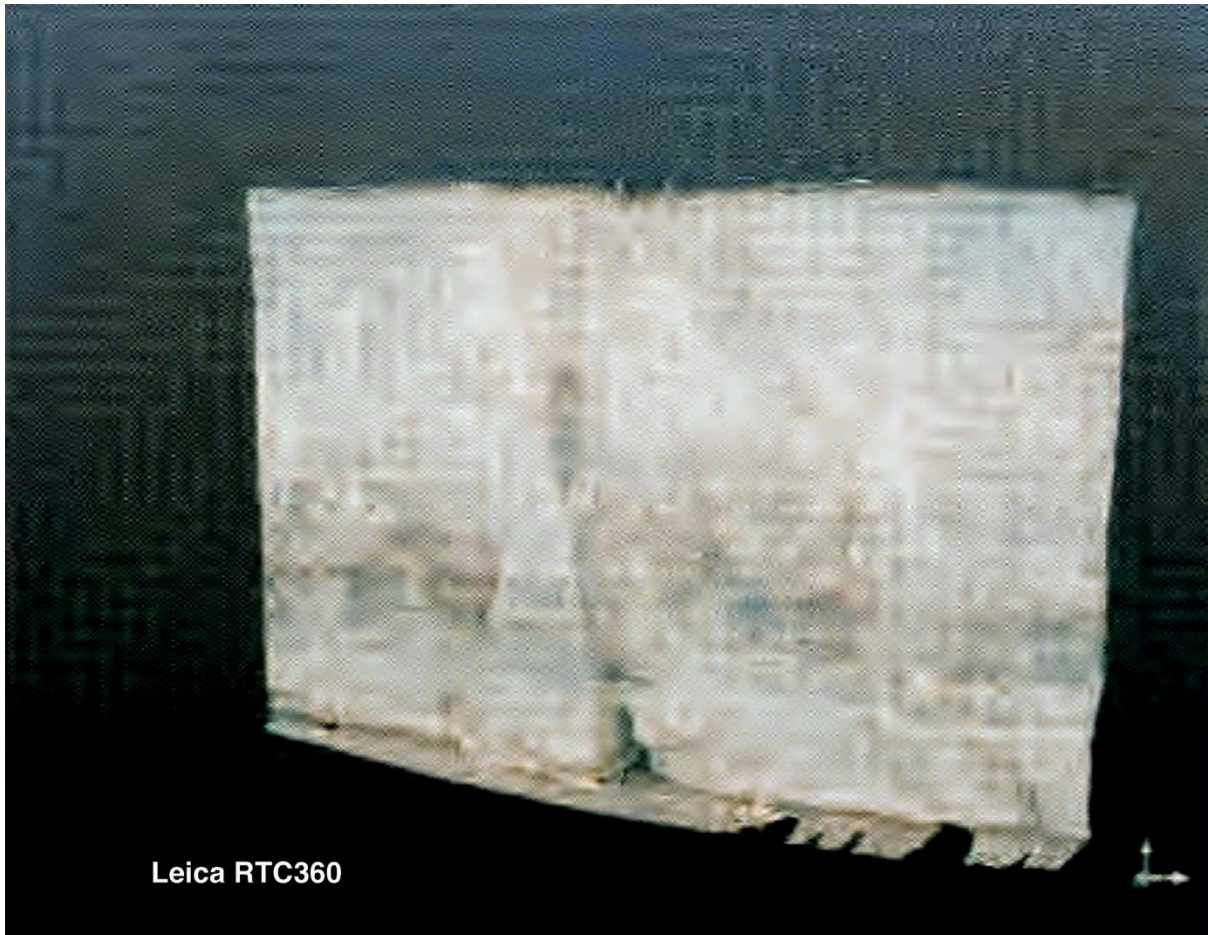


Рисунок 7. Цифрова тривимірна візуалізація хмари скельних точок, згенерована за допомогою системи Leica.

Кожна точка у цій «хмарі» отримала кольорове забарвлення завдяки цифровій камері з надзвичайно високою роздільною здатністю.

3.5 Цифрове картографування виступів

Цифрове відображення розривів гірських порід за допомогою лазерного сканування нині актуальний напрямок досліджень, критично важливий для аналізу геомеханічних характеристик як скельних порід, так і ґрунтів.

Застосування лазерного сканування забезпечує надзвичайно високу точність та рівень деталізації, що сприяє отриманню не лише геометричних параметрів, але й даних про цілісність та інші, вкрай важливі аспекти, пов'язані з безпекою та стійкістю гірського масиву.

Перевірка за допомогою лазерного сканування відкриває широкі можливості:

1. Аналіз щільних гірських порід та ґрунтових масивів: головна мета – ідентифікація тріщин, які вказують на потенційні ризики, наприклад, карстові вирви чи зсуви. Лазерне сканування генерує високоточні дані про структуру та пористість порід та ґрунтів, що має вирішальне значення для оцінки їхнього стану та стійкості;
2. Векторне моделювання: інтегруючи дані 3D хмари точок з методами реконструкції поверхні, можливо створити векторні моделі сканованої поверхні, що дають змогу глибше та точніше зрозуміти геометрію відслонень. Це сприяє додатковим дослідженням, зокрема, виявленню областей деформації; Інтерпретація геомеханічних властивостей: зібрані дані можна використовувати для більш детального аналізу фізичних властивостей гірських порід і ґрунту, таких як міцність, вологість і склад. Це важливо для визначення ризику просідання та оцінки впливу різних природних і антропогенних факторів на ці матеріали.
3. Визначення потенційних зон небезпеки: методи лазерного сканування можуть бути застосовані для ідентифікації територій, де існує ймовірність зсувів або осідання ґрунту. Візуалізація та побудова моделей цих зон сприяють розробці заходів, спрямованих на попередження або пом'якшення наслідків природних катаклізмів такого роду.[4,6]



Рисунок 8. Відновлення рельєфу гірських порід, використовуючи дані лазерного сканування, отримані за допомогою лазерного сканера Leica RTC360.



Рисунок 9. Перетворення хмари тривимірних координат на відновлені тривимірні поверхні, представлені візуально з використанням різноманітних методик обробки цифрових зображень.

Відтворена у цифрі рельєф гірської породи чи ґрунту сформована з безлічі крихітних трикутників або граней, які спільно складають деталізовану копію відслонення.

Цей рельєф визначається природними розломами та тріщинами, що є органічною складовою гірських порід або ґрунту.

Висока щільність інформації з 3D лазерного сканування дозволяє зібрати велику кількість точок даних для кожного об'єкта, що сприяє створенню високоточної, детальної моделі.

У контексті гірських порід, виходи можуть складатися з мільйонів окремих граней або трикутників, кожна з яких є мініатюрним фрагментом загальної поверхні.

Завдяки значній щільності зібраних даних стає можливим виконання комплексних обчислень щодо орієнтації цих граней.

Це має вирішальне значення для детального дослідження геометрії розломів та тріщин, що присутні в структурі породи.[4]

Оскільки всі ці грані є інтегральною частиною розриву, їх орієнтація надає ключову інформацію для глибшого розуміння фізичних процесів, що відбуваються в породі, таких як розподіл напружень і спостережуваний рух.

Визначення орієнтації для кожної грані може бути здійснено з використанням базових законів геометрії.

Один із прикладів – це обчислення вектора нормалі, який характеризує кожен трикутник і визначає орієнтацію відповідної поверхні.

Вектор нормалі задає напрямок, який є строго перпендикулярним до площини, утвореної трикутником, та обчислюється як результат векторного добутку двох векторів, сформованих сторонами трикутника.

Для кожного окремого трикутника, розташованого в тривимірному просторі, можна знайти два вектори шляхом віднімання координат його вершин.

Векторний добуток цих векторів формує вектор нормалі, що окреслює орієнтацію поверхні.

Цей підхід дає змогу створити надзвичайно точну модель розлому, що в свою чергу відкриває можливість проведення поглибленого статистичного аналізу ключових характеристик розлому, наприклад, його орієнтації та взаємодії з ймовірними зміщеннями або іншими геодинамічними явищами.

Ці дані надзвичайно важливі для вивчення заплутаних геологічних структур, на кшталт гірських систем, видобувних комплексів та підземних переходів.

Тут точне знання характеристик речовин є визначальним для планування надійних інженерних рішень, які гарантуватимуть безпеку.

На рисунку10 зображено алгоритм обчислення граней та напрямків нормалей для різних ділянок гірських порід або ґрунтів.[5]

Такий метод дозволяє отримати достовірну інформацію для подальшого моделювання і аналізу особливостей геологічного середовища.

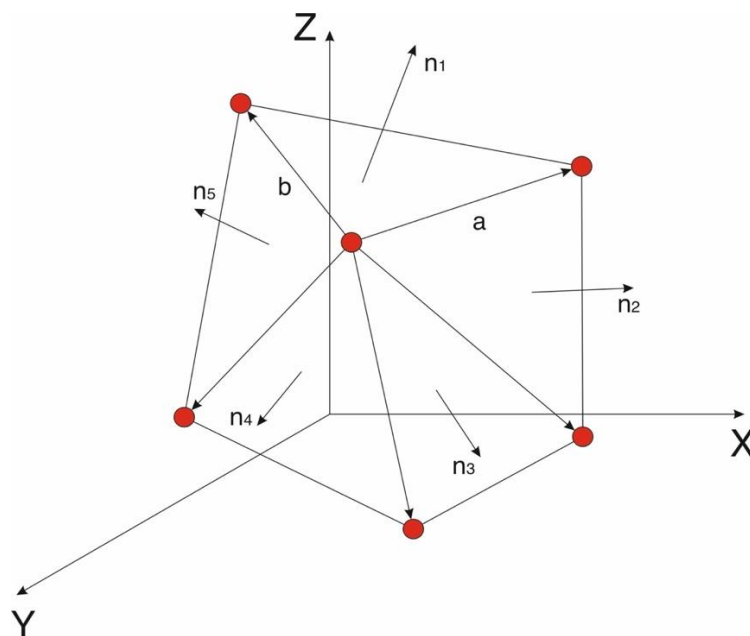


Рисунок 10. Обчислення нормальних векторів для кожного окремого трикутника.

Вектор нормалі, необхідний для визначення орієнтації кожного трикутника, обчислюється за допомогою наступних формул:

$$a = \begin{pmatrix} X_3 - X_2 \\ Y_3 - Y_2 \\ Z_3 - Z_2 \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} X_1 - X_2 \\ Y_1 - Y_2 \\ Z_1 - Z_2 \end{pmatrix}$$

$$n_i = a * b$$

Застосування статистичних підходів для обробки даних, отриманих шляхом 3D лазерного сканування, дає змогу провести поглиблений аналіз просторового розташування границь розділених площин.

Ключовим методом виступає багатовимірний кластерний аналіз, котрий сприяє виявленню окремих кластерів розривних поверхонь згідно з їх орієнтацією в просторі.

У рамках цього методу точки або поверхні групуються, формуючи кілька кластерів, кожен з яких має спільні характеристики орієнтації, зокрема, кут нахилу та напрямок тріщин.

У дослідженні гірських порід та ґрунтів багатовимірний кластерний аналіз ефективно групує точки, що описують поверхню, у визначену кількість кластерів.

Кожен такий кластер визначає певну категорію розривів, що характеризуються подібним напрямком площин у межах даного кластера.

Застосування цього методу дає змогу визначати різні структурні регіони гірських порід та ґрунтових масивів.[5]

Структурні зони, виявлені таким чином, мають спільні геометричні властивості та характеристики, зокрема тип розломів та рівень їхньої схильності до дестабілізації.

Ще одним ключовим підходом є визначення орієнтацій обличч у стереопарах, що дає можливість змодельовати положення кожного обличчя у тривимірному вимірі.

Цього досягають через відображення нормалей на сферу або стереографічну проєкцію.

Застосування цієї техніки дозволяє генерувати графічні представлення, які полегшують усвідомлення взаємозв'язків та просторового розташування різних розривів у межах об'єкта.

Результати подібного дослідження слугують ключем до розуміння внутрішньої будови гірського хребта, прогнозування можливих змін та переміщень, а також для формування стратегій стабілізації небезпечних ділянок.

Детальне знання розташування розломів сприяє суттєвому підвищенню безпеки у сфері видобутку корисних копалин та будівництва, зменшуючи ймовірність катастроф і зсувів ґрунту.

Рисунки 10, 11 та 12 наочно демонструють етапи побудови стереографічних проєкцій орієнтації розломів і кластеризації останніх.[4]

Це забезпечує візуальне представлення того, як розломи різного характеру в межах певного об'єкта піддаються групуванню на основі схожих орієнтаційних ознак.

Такий підхід значно полегшує проведення подальшого аналізу та розробку планів геологічних досліджень.



Рис. 11. Невелика ділянка відслонення скелі.

Довжина та напрямок окремих тріщин і розривів у корінних гірських породах та ґрунті можливо встановити шляхом аналізу декількох наборів розломів, що ілюструє рисунок 11.

Їх типові розміри приблизно 1,5 на 1,5 метри.

Такі дані є важливими для визначення ймовірного ступеня деформацій або ушкоджень, котрі можуть створити серйозні загрози для будівельних робіт або видобутку корисних копалин.[4]

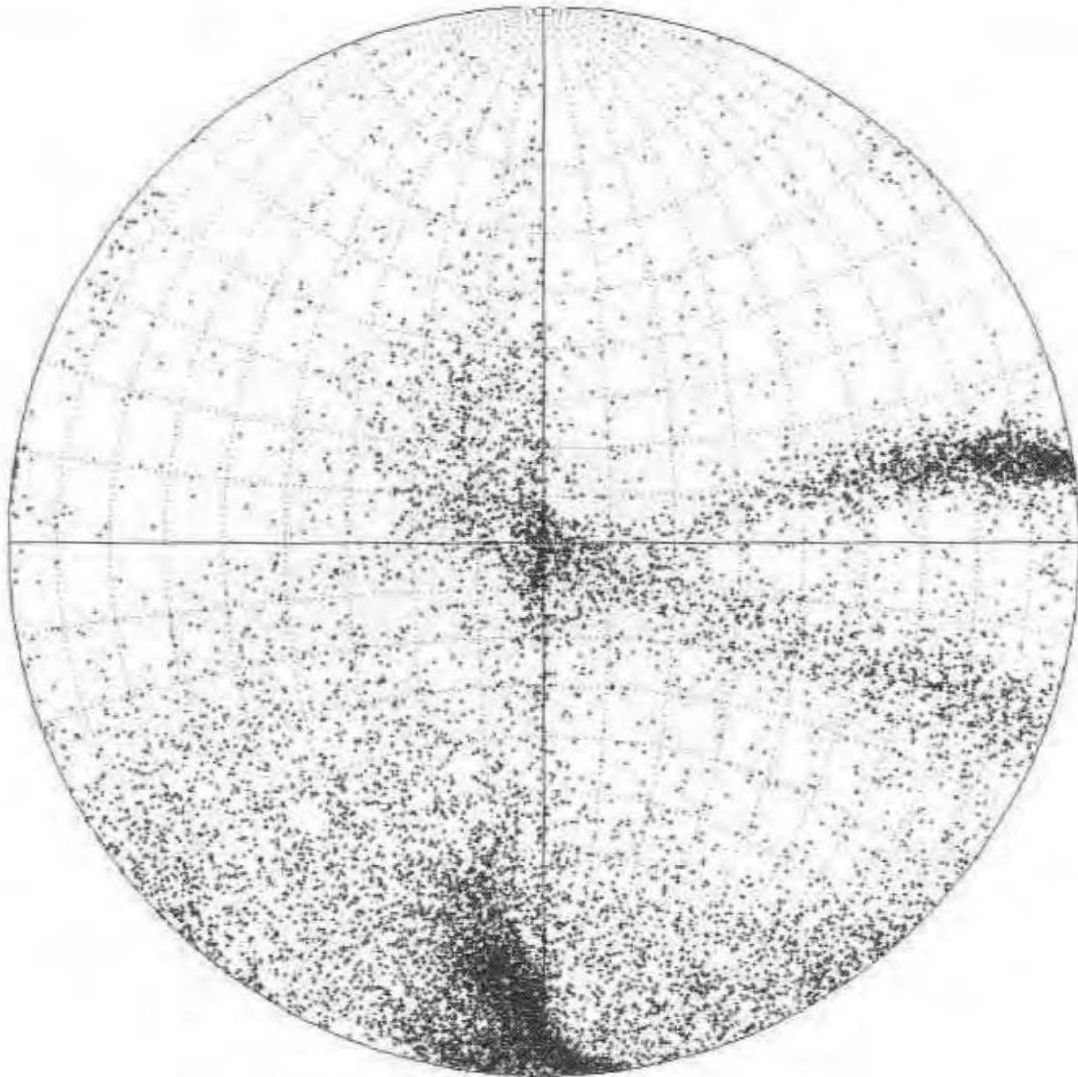


Рисунок 12. Полярна діаграма площин.

Для цього можливо застосувати статистичні й геометричні способи:

- встановити орієнтацію кожного розлому, базуючись на триангуляції та аналізі векторів нормалей;
- відшукати тенденції в розташуванні розломів та дати оцінку рівню нестабільності, а також ризику зсувів та просідань.
- застосувати отримані відомості для моделювання міцності гірського масиву та прогнозування реакції об'єкта за різних навантажувальних обставин.

Такі дослідження сприяють збільшенню точності геологічних передбачень, мінімізуючи потенційні загрози в процесі видобутку мінералів та зведення інфраструктурних об'єктів у критичних середовищах.

Адже статистичний аналіз та кластеризація методів не лише окреслюють орієнтацію розломів, але й забезпечують критичні відомості про їх розподіл, характеристики поверхні – її нерівності, хвилястості, а також про інші властивості гірських порід та ґрунтових формацій.

Ось що можна отримати, зокрема, завдяки лазерному скануванню та наступній обробці інформації:

1. Аналіз шорсткості: оцінка мікрорельєфу поверхні, критичного для прогнозування її реакції на різноманітні зовнішні впливи.

Визначення шорсткості допомагає виявити можливі місця концентрації напружень, що впливають на міцність об'єкта;

2. Визначення хвилястості: оцінка періодичних відхилень та нерівностей, які здатні впливати на стійкість конструкції та її спроможність протистояти додатковому тиску ґрунту.

Це надзвичайно актуально у гірській місцевості, де нестабільність ґрунту здатна призводити до масштабних зсувів та обвалів.

3. Аналіз розташування тріщин – систематизація та розпізнавання тріщин, а також тенденцій їх розповсюдження, дає змогу більш точно оцінювати ймовірність деформацій і лиха, на кшталт зсувів та обвалів.

У підсумку, подібні деталі, як зображені на рисунку 13, не лише сприяють коректному опису геологічної структури, але й забезпечують базу для створення достовірних моделей, котрі дозволяють передбачати подальшу поведінку цих елементів.[4]



Рисунок 13. Деталь сканування скелі.

Інтенсивність лазерного відбиття, а також відтінок, що вказує на міру цього відбиття, є надзвичайно важливими додатковими властивостями для подальшої роботи з даними, отриманими в процесі лазерного сканування.

Ці показники мають потенціал для сортування відсканованих гірських порід та частинок ґрунту на однорідні категорії, що в значній мірі здатне покращити якість аналізу та збільшити деталізацію кінцевих висновків.

Інтенсивність відбитого лазерного сигналу: цей показник демонструє ступінь віддзеркалення лазерного променя від об'єкта та

визначає тип матеріалу (камінь, глина, пісок тощо), а також різноманітні фізичні характеристики поверхні.

Матеріали, що відрізняються великою щільністю чи мають гладку структуру, зазвичай характеризуються високим рівнем інтенсивності відбитого сигналу.

Натомість, матеріали з низькою щільністю або шорсткою поверхнею здатні мати низьку інтенсивність відбитого світла.

У разі, коли лазерний сканер оснащений технологією розпізнавання кольору, кожній точці на поверхні може бути привласнена колірна характеристика.[6]

Цей параметр найчастіше визначається сенсором, приєднаним до лазерного сканера.

Забарвлення полегшує розпізнавання фізичних характеристик матеріалів, також може бути використано для визначення різновидів ґрунтів та гірських порід на основі їхнього природного кольору.

Класифікація на базі таких додаткових відомостей дає змогу:

- Об'єднувати подібні матеріали згідно з їхніми характеристиками (скажімо, розділяти різні різновиди гірських порід та ґрунтів).
- Збільшувати точність аналізу гірських порід і ґрунтів, особливо для виявлення місць із відмінними властивостями.
- Автоматизувати процес класифікації, що мінімізує вплив людського чинника та збільшує продуктивність роботи.

Застосування інтенсивності й кольору відбитого лазера як додаткових параметрів здатне суттєво збагатити наявні дані та забезпечити глибші й точніші висновки для майбутніх інженерно-геологічних досліджень.

Висновок

Тривимірне наземне лазерне сканування (ТНЛС) – надзвичайно ефективний та потужний спосіб отримання високоточних відомостей про геометричні параметри різноманітних предметів та площин, перетворившись на ключовий інструмент в багатьох сферах, включно з інженерією, геодезією та геологією.

Зокрема, цей підхід дає можливість виконувати вимірювання об'єктів зі складною формою, як-от природні утворення або споруди, серед яких скельні масиви, ґрунти, зони видобутку корисних копалин (кар'єри), греблі, тунельні системи та будівельні конструкції.

Лазерне сканування гарантує створення прецизійних та докладних 3D-моделей, що відіграють ключову роль у сфері аналізу, реставрації та втіленні різних дослідницьких та будівельних проєктів.

Одним із ключових плюсів лазерного сканування є здатність формувати цифрову хмару точок високої густини.

Це дозволяє відтворити геометрію об'єкта з винятково високою точністю.

Завдяки цьому стає можливим поглиблений аналіз таких характеристик, як шорсткість поверхні, нерівності та ідентифікація матеріалів.

Ще однією вагомою перевагою такого підходу є оперативність отримання інформації.

Проведення повного сканування потребує всього кілька хвилин, що суттєво випереджає за тривалістю традиційні способи вимірювання.

До того ж, лазерне сканування забезпечує можливість здійснювати виміри у місцях, куди дістатися фізично складно або ж небезпечно.

Це має вирішальне значення для спостереження за станом інфраструктурних споруд, наприклад, дамб, або для дослідження природних об'єктів, таких як гірські масиви вздовж автомобільних шляхів чи відвали кар'єрів.

Цей підхід відкриває широкі перспективи у питаннях безпеки, дозволяючи ефективно економити час та скорочувати витрати, пов'язані з виїзними роботами.

Інтеграція з наявними геоінформаційними системами (ГІС) та системами автоматизованого проектування (САПР) дає можливість без проблем використовувати отримані дані лазерного сканування в інших платформах, необхідних для детального аналізу, розробки проектів та моніторингу.

Завдяки цьому забезпечується надзвичайно висока точність при створенні як двовимірних профілів, так і тривимірних моделей місцевості, що критично важливо в будівництві, проектуванні та при плануванні використання земельних ресурсів.

Окремо варто відзначити значні переваги лазерного сканування у дослідженні та аналізі геологічних розломів.

Завдяки відбудованим тривимірним поверхням з'являється можливість не лише вимірювати геометричні характеристики розривів, а й вираховувати їхній вплив на стабільність ґрунту та гірських порід.

Застосування статистичного аналізу та багатовимірної класифікації дозволяє не тільки скласти розгорнуту модель руйнування, а й передбачити подальшу реакцію матеріалу, що критично важливо для оцінювання загроз у процесі розробки кар'єрів та будівництва.

Додатковою перевагою цього підходу є здатність збирати інформацію в реальному часі, що забезпечує високу продуктивність і точність при спостереженні за великими об'єктами та площами,

наприклад, масштабними кар'єрами, греблями й будівельними майданчиками.

Це дає лазерному скануванню важливість як інструмент, придатний для вирішення задач, пов'язаних з контролем обсягу матеріалів, відстеженням змін форми та оцінкою стану інфраструктурних об'єктів.

Відтак, 3D наземне лазерне сканування постає вагомим технічним проривом, який помітно збільшує продуктивність, гарантує точність і сприяє безпеці інженерно-геодезичних процесів.

Його застосування відкриває можливість розв'язувати непрості проблеми у різноманітних наукових та інженерних областях, а також покращувати якість і достовірність кінцевих результатів з одночасним скороченням витрат часу та ресурсів.

Список використаних джерел

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

4. Slob, S., Hack, R. 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique. In: Hack, R., Azzam, R., Charlier, R. (eds) Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Lecture Notes in Earth Sciences, vol 104. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39918-6_22

5. SlobS, Hack HRGK та Turner AK (2002). Підхід до автоматизації вимірювань розривів суцільності гірських порід за допомогою методів лазерного сканування. Міжнародний симпозіум ISRM з інженерії гірських порід для гірських регіонів. Eurock 2002 Португалія.

6. Zhou, W. та Maerz, N.H. Багатовимірний кластерний аналіз даних розривів: впровадження та застосування механіки гірських порід в

національних інтересах; Матеріали 38-го симпозіуму з механіки гірських порід США, Вашингтон, 7-10 липня 2001 р., с. 861-868.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Використання 3D наземного лазерного сканування при польових дослідженнях і моніторингу різних об'єктів »

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік

(дата)

(підпис студента)

