

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Данищук Максим
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
« Аналіз ефективності дослідження деформацій мостів за допомогою наземного лазерного 3D сканування та традиційних методів »
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

М. Данищук, студент групи ГЗз-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: ст. викладач Віталій Ковтун
(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.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Данищук Максим

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Аналіз ефективності дослідження деформацій мостів за допомогою наземного лазерного 3D сканування та традиційних методів»

керівник роботи: _____ *ст. викладач Віталій Ковтун*

(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. Область дослідження
2. Матеріали та методи
3. Результати роботи

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	1. Область дослідження		
2	2. Матеріали та методи		
3	3. Результати роботи		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ Данищук М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Ковтун В.

Анотація

Нааявні способи встановлення геометричних параметрів мостів, що використовуються для діагностики їх стану та вивчення деформацій, здебільшого ґрунтуються на звичних геодезичних вимірах із подальшим розшифруванням зібраних відомостей.

Але такий спосіб є доволі складним, потребує багато часу та схильний до похибок через людський фактор та обмеження, які накладає використання устаткування.

У цьому дослідженні для здобуття високоточних геометричних відомостей про мостові споруди застосовується альтернативна методика, яка базується на технологіях лазерного сканування.

В межах бакалаврської роботи було виконано практичні дослідження з використанням лазерного сканування для вивчення деформацій мостів, проаналізовано результати та детально розглянуто переваги такого підходу у порівнянні зі звичними методами.

Зокрема, предмет обговорень стосується не лише продуктивності лазерного сканування в питанні відстеження деформацій, а й перспектив його застосування задля оптимізації управління та підтримки мостових споруд.

Як в традиційних методах, так і в технології лазерного сканування, виділяються три ключові стадії: збір, обробка та інтерпретація отриманих даних.

Водночас, результати порівняльних досліджень свідчать про наявність значних відмінностей між цими методами, особливо у контексті досягнутої точності, швидкості виконання робіт та повноти зібраних відомостей.

Лазерне сканування надає можливість формування деталізованої моделі об'єкта з високою роздільною здатністю.

Цей фактор є ключовим для забезпечення точного виявлення деформацій та розробки ефективних подальших планів обслуговування мостових конструкцій.

Ключові слова: деформація мосту, лазерне сканування, геометричні ознаки, геометричне маркування

Abstract

The existing methods for establishing the geometric parameters of bridges used for diagnosing their condition and studying deformations are mostly based on conventional geodetic measurements with subsequent decoding of the collected information.

However, this method is quite complex, time-consuming and prone to errors due to the human factor and the limitations imposed by the equipment used.

In this study, an alternative method based on laser scanning technologies is used to obtain high-precision geometric information about bridge structures.

As part of the bachelor's thesis, practical experiments using laser scanning to study bridge deformations were performed, the results were analyzed and the advantages of such an approach compared to conventional methods were considered in detail.

In particular, the subject of discussion concerns not only the performance of laser scanning in the issue of tracking deformations, but also the prospects for its application to optimize the management and maintenance of bridge structures.

Both in traditional methods and in laser scanning technology, three key stages are distinguished: collection, processing and interpretation of the obtained data.

At the same time, the results of comparative studies indicate the presence of significant differences between these methods, especially in the context of the achieved accuracy, speed of work and completeness of the collected information.

Laser scanning provides the ability to form a detailed model of the object with high resolution.

This factor is key to ensuring accurate detection of deformations and the development of effective further maintenance plans for bridge structures.

Keywords: bridge deformation, laser scanning, geometric features, geometric marking

Зміст

Вступ

1. Методика проведення робіт

2 Методика дослідження

2.1 Збирання геометричних даних для обстеження мосту

2.2 Збирання даних лазерного сканування для мостового обстеження

3. Результати дослідження

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Мости - це ключовий складник транспортної системи, що гарантує безперебійне переміщення машин, потягів та пішоходів.

Гарантування безпеки при використанні мостових споруджень – критично важлива умова їх довготривалого функціонування та міцності.

Постійне спостереження за технічним станом мостів відбувається згідно з вимогами державних будівельних стандартів та охоплює планові огляди конструктивних елементів.

Проте, такі перевірки не завжди передбачають аналіз короткочасних деформацій, що можуть суттєво впливати на здатність мосту витримувати навантаження.

Короткочасні деформації - це зміни у геометричних показниках мосту, що зникають протягом доби.

Не дивлячись на їхню нетривалість, ці деформації спричинюють перевищення допустимих навантажень на окремі елементи конструкції.

Це може мати наслідком пошкодження окремих вузлів моста або ж призвести до аварії.

Враховуючи вищесказане, регулярне спостереження за такими деформаціями представляє собою важливе науково-практичне завдання.

Основними чинниками, які призводять до тимчасових деформацій мостових споруд, є:

- температурні коливання, спровоковані нагріванням складових частин мосту під дією сонячного світла;
- вплив вітрових навантажень;
- додаткове навантаження внаслідок атмосферних явищ (опади, сніг, ожеледиця);
- динамічний вплив транспортних засобів, що рухаються по мосту;

- навантаження від транспортного потоку, котрий пересувається під мостом.

Отже, здобуття чітких геометричних даних має визначальне значення для вчасного виявлення потенційних небезпек і ефективного управління мостовими спорудами.

На сьогоднішній день способи збору геометричної інформації про мости здебільшого використовують традиційні геодезичні вимірювання.

Однак, підхід має низку недоліків:

- Процес знімання потребує тривалого часу для завершення.
- Залежить від досвіду та вмінь спеціалістів, що збільшує ймовірність помилок.

- Вимагає фізичного проникнення до складних для доступу частин мосту, створюючи загрозу для безпеки праці.

- Інформацію можна отримати лише з окремих, розрізнених точок, що обмежує повноцінний аналіз деформацій.

Отже, класичні методи не завжди можуть забезпечити потрібну точність та ефективність під час контролю мостових конструкцій.

За останні роки технологія лазерного сканування здобуває дедалі більшу популярність як ефективний інструмент для здобуття геометричних даних про мости.

Ця технологія дозволяє формувати детальні 3D-моделі об'єктів з високою роздільною здатністю та швидкістю.

Лазерні сканери здатні фіксувати тисячі тривимірних точок щосекунди, гарантуючи міліметрову точність кожного вимірювання.

Основними перевагами лазерних сканерів визначаються так:

- Створення завершеної 3D-моделі моста реалізується без необхідності фізичного дотику до важкодоступних ділянок споруди.

- Значне зменшення часу, потрібного для обстеження, досягається за рахунок швидкості збору інформації.

- Забезпечується підвищена точність та деталізація вимірювань у порівнянні з традиційними методами.

- Автоматичний аналіз віртуальних вимірювань, включно з даними, виявленням відхилень та оцінкою стану конструкції, стає реальністю.

В межах цієї бакалаврської роботи вивчено дієвість лазерного сканування при огляді мостових споруд.

Здійснено аналіз процесу здобування геометричних даних з використанням лазерних сканерів, його переваги та недоліки, а також виконано порівняння з традиційними методами.

Загалом, процес дослідження мостів включає в себе три ключові етапи:

1. Збирання даних: одержання інформації про структуру моста за допомогою спеціалізованої апаратури;

2. Обробка даних: перетворення зібраної інформації у формат, придатний для аналізу;

3. Інтерпретація даних: оцінювання поточного стану моста та виявлення потенційних змін;

4. Аналіз отриманих результатів.

Дослідження підтверджують: технологія лазерного сканування показує набагато вищу точність та інформативність даних, якщо порівнювати з усталеними способами.

Але слід сконцентруватися на розробці дієвих алгоритмів для автоматизованої обробки й аналізу цих відомостей.

Отже, лазерне сканування відкриває значні можливості для нагляду за мостовими конструкціями, покращення ефективності управління та підвищення безпеки під час їх використання.

1. Методика проведення робіт

В межах цього дослідження, з метою отримання геометричних даних про поточний стан наявних мостів (рис. 1), було використано високоточний лазерний сканер Leica RTC360.



Рисунок 1 Сканер Leica RTC360

В межах цього дослідження, з метою отримання геометричних даних про поточний стан наявних мостів (рис. 1), було використано високоточний лазерний сканер Leica RTC360.

Перед тим, як розпочати польові дослідження, було розроблено попередній план сканування.

Він включав у себе наступне:

- Встановлення стратегічних місць розташування сканерів.

Це мало забезпечити максимальне перекриття області мосту та звести до мінімуму неохоплені скануванням ділянки.

- Проведення попереднього аналізу архітектури мосту.

Він був необхідний для вибору оптимальних місць для розміщення сканерів, зважаючи на розташування ключових несучих конструкцій, опор і прогонових елементів.

- Розміщення контрольних точок.

Вони слугували для подальшого прив'язування зібраної інформації до географічної системи координат.

Сканування виконувалося з кількох позицій для забезпечення повного покриття всіх елементів мостової конструкції.

Сканер Leica RTC360 застосовує технологію VIS (візуально-інерційна система), що забезпечує автоматичне поєднання відсканованих частин у режимі реального часу.

Основні шаблі процесу сканування такі:

1. Монтаж сканера на штатив. Значущо, що автоматичне горизонтальне вирівнювання забезпечує вивірене горизонтальне розташування.

2. Запуск сканування. Модель Leica RTC360 виконує кругове сканування на 360 градусів, вражаючи швидкістю – до 2 мільйонів точок щосекунди.

3. Введення кольору. Інтегрована HDR-камера на 36 мегапікселів синхронно фіксує панорамне зображення, дозволяючи створити надзвичайно реалістичну 3D-модель.

4. Переміщення до наступної точки. Завдяки інтелектуальній системі VIS, пристрій автоматично визначає потрібні позиції, що значно спрощує процес збору даних.

5. Повторення описаних вище кроків для усіх намічених точок сканування, в циклічному режимі.

По завершенню етапу збирання даних, отриману хмару точок переносять до програми Leica Cyclone REGISTER 360, де вона проходить аналіз:

- Реєстрація хмар точок відбувається автоматично, спираючись на системи VIS та геодезичні маркери.

- Очищення зібраних даних від різного "сміття" та небажаних елементів (транспорт, особи тощо).

- Фільтрація й оптимізація об'єму інформації, не вдаючись до погіршення геометричної точності.

- Створення експортних файлів у форматах LAS, E57 або PTS для подальшої роботи в спеціалізованих програмах, наприклад, AutoCAD, Revit, ArcGIS.

Застосування Leica RTC360 дало змогу значно скоротити час, необхідний для отримання геометричних даних, якщо порівнювати зі звичними методами геодезії.

Загалом, було виконано 15 сканувальних станцій, що забезпечило повне тривимірне покриття мостової споруди.

Отримані дані можуть бути використані для:

- Відстеження змін деформацій у конструкції.

- Аналізу геометричних параметрів мосту.

- Створення цифрових BIM-моделей для подальшого моніторингу стану об'єкта.

Прилад вражає своєю можливістю зчитувати до 2 мільйонів точок щосекунди, що знаменує собою великий прогрес порівняно з попередніми модифікаціями та забезпечує продуктивність як під час робіт на місцевості, так і в офісних умовах.

Мобільний сканер RTC360 легко вписується в будь-який робочий процес та може застосовуватися для надточного сканування об'єктів на

відстані до 130 метрів, а також для створення кольорових 3D HDR хмар точок менше ніж за 120 секунд.

Інтегрована візуальна інерційна система (VIS), разом із приймачем GNSS, магнітним компасом і висотоміром, надає надзвичайно точну стабілізацію руху сканувального пристрою, автоматично фіксуючи його положення відносно певної точки.

Це суттєво спрощує подальшу роботу з отриманими даними, одночасно скорочуючи час, необхідний для проведення вимірювань безпосередньо на місці подій.

У співпраці з польовим софтом Leica Cyclone FIELD 360 для мобільних пристроїв, котрий дозволяє захоплювати дані сканування в режимі реального часу, а також з Leica Cyclone REGISTER 360 для швидкого та точного вирівнювання хмари точок, тепер можна легко генерувати високоточні 3D моделі.[4]

Швидкість отримання інформації досягає 62 500 точок за секунду, а на сканування певного об'єкта потрібно близько 100 секунд.

Точність визначення розташування сканера сягає до 9 мм на відстані 25 м та до 3 мм на відстані 10 м.

Це повністю узгоджується з вимогами до точності геометричних властивостей інфраструктурних об'єктів, таких як мости.

За кутової роздільної здатності $0,018^\circ$ у вертикальній площині та $0,01^\circ$ у горизонтальній площині, відбувається дискретизація з кроком 3,1 мм по вертикалі та 1,7 мм по горизонталі.

Це гарантує потрібний рівень деталізації, відповідаючи необхідним показникам точності.

На базі результатів сканування автомобільного мосту з використанням Leica RTC360 була створена 3D модель, яку зображено на рисунку 2.[4]

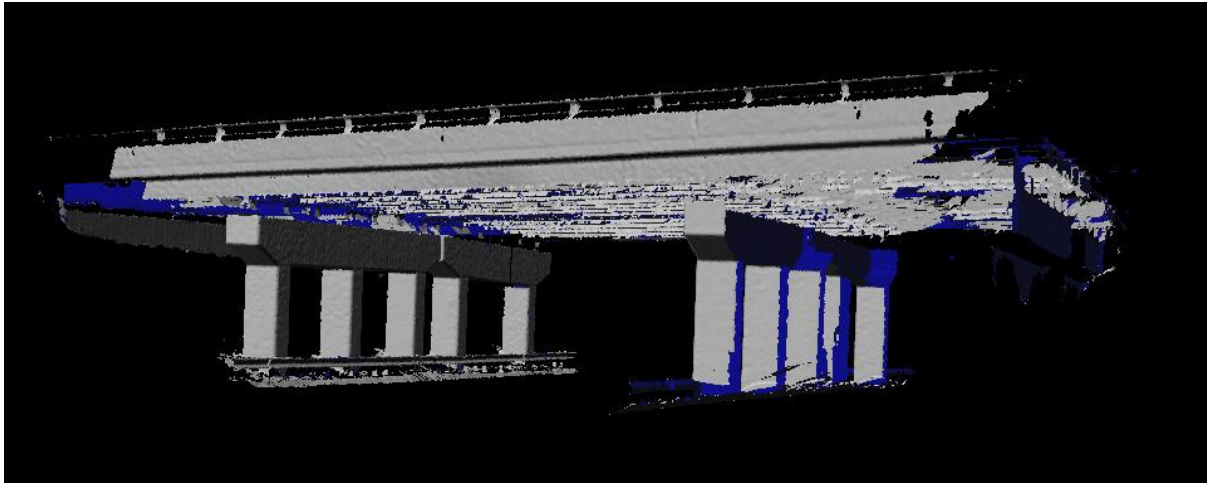


Рисунок 2 3D-моделі, створені на основі даних лазерного сканування.

У процесі дослідження виконано 15 сканувань, завдяки чому отримано вичерпний набір даних для геометричного аналізу мостової конструкції.

Під час кожного сканування бралися до уваги тільки ті точки, що розташовувалися на відстані не більше 10 метрів від місця сканування.

В основу такого обмеження покладено необхідність досягнення похибки вимірювань не більше 5 мм.

Це забезпечує достатню точність для створення детальної 3D-моделі та подальшого вивчення деформаційних змін у споруді.

Первинний огляд мосту проводився інженерною групою із застосуванням традиційних геодезичних методів:

- Тахеометричні виміри для встановлення координат основних точок споруди.

- Нівелювання для визначення можливих вертикальних зрушень опор та прогонових частин.

- Фотограмметричні техніки для фіксації видимих змін у стані мосту.

Первинний огляд мосту проводився інженерною групою із застосуванням традиційних геодезичних методів:

- Тахеометричні виміри для встановлення координат основних точок споруди.

- Нівелювання для визначення можливих вертикальних зрушень опор та прогонових частин.

- Фотограмметричні техніки для фіксації видимих змін у стані мосту.

Основні етапи моделювання:

1. Реєстрація та об'єднання хмар точок у Leica Cyclone REGISTER 360;

2. Відсіювання шумів та усунення небажаних об'єктів, скажімо, тих, що рухаються (автомобілі, люди);

3. Автоматичне та ручне розчленування конструктивних елементів (стійки, балки, прогони);

4. Автоматичне та ручне розчленування конструктивних елементів (стійки, балки, прогони);

5. Точне та правильне розміщення 3D-моделі у геодезичній сітці;

6. Створення 3D-моделей на основі даних лазерного сканування з чітким прив'язуванням до геодезії.

Зготовлену тривимірну модель перетворюють у формат мови для моделювання віртуальної реальності з можливістю застосування для віртуального огляду мостових конструкцій з використанням ліцензійного програмного забезпечення для обробки даних лазерного сканування.[4]

Досягнуто наступних результатів:

- візуалізація геометричних дефектів та потенційних деформацій.

- порівняння згенерованої моделі з доступними проектними та геодезичними даними.

- виявлення невідповідностей у взаємодії конструктивних елементів, що можуть виникнути внаслідок втручань або короткочасних навантажень.

Для оцінки ефективності методу, дані лазерного сканування було нанесено на 3D-моделі, що були створені традиційними методами.[4]

У результаті зіставного вивчення двох моделей, що показано на малюнку 3, було встановлено наступні важливі розбіжності:

- Невелике зсування певних складових частин, що теоретично може свідчити про присутність незначних деформацій.
- Відмінність у якості відтворення геометричних характеристик об'єкта, особливо у зонах з утрудненим доступом.
- Виявлено локальні зміни у структурі діафрагми, котрі не були помічені з використанням попередніх методів дослідження.

Одержані дані чітко показують переваги методу лазерного сканування, який забезпечує більшу точність та повноту геометричної інформації, необхідної для комплексної оцінки стану мостових конструкцій та ефективного їхнього управління.[4]

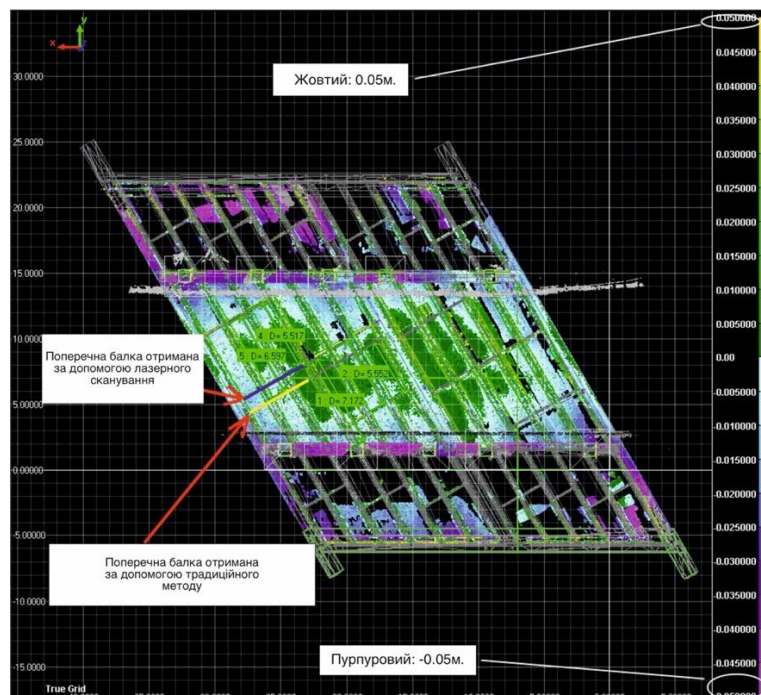


Рисунок 3 Порівняння моделей мостів, зведених на основі лазерного сканування, із моделями, отриманими шляхом застосування традиційних методів дослідження

Дані, отримані за допомогою лазерного сканування, дозволяють виявити та детально дослідити деформації мостової споруди, які неможливо розпізнати, використовуючи традиційні геодезичні підходи.

Вивчення хмари точок продемонструвало, що нижня частина прогінної будови демонструє характерний вигин в центральній ділянці мосту.

Вказаний вигин є прогнозованим та цілковито узгоджується з теоретичними розрахунками еластичних деформацій мостових конструкцій під впливом статичних навантажень.

Однак, традиційні тахеометричні способи вимірювання не дозволяють сформувати безперервне інформаційне поле, що ускладнює детальне картування прогинів.

На відміну від тахеометрів, лазерне сканування надало можливість створення повноцінного 3D-зображення вигину та його кольорової візуалізації для подальшого, глибшого аналізу.[4],[6]

Іншим виявленим недоліком стало неточне накладання поперечних променів, що проявлялось при зіставленні двох тривимірних моделей.

У моделі, сформованій з інформації, здобутої за допомогою традиційного тахеометра, положення поперечних перерізів не відповідало тому, що було згенероване на основі лазерного сканування.

Ця невідповідність пояснюється похибками у вимірюваннях тахеометра, що виникають через неточне визначення реперних точок або через людський вплив під час виконання вимірювань безпосередньо на об'єкті.

Лазерне сканування усуває цю проблему, адже не потребує ручного позначення окремих точок, а забезпечує автоматизований збір даних.

Проведене дослідження акцентувало суттєві переваги лазерного сканування порівняно з традиційними методами, коли важливі детальні геометричні параметри будівлі або споруди.

Безконтактний метод та безпека - інспекція відбувається без фізичного зіткнення з елементами конструкції.

Висока точність та інформативність - спосіб надає повну картину геометричних змін, а не лише окремі показники.

Автоматизований аналіз та зіставлення - дозволяє накладати 3D-моделі та використовувати алгоритми для виявлення найдрібніших відхилень.

Таким чином, лазерне сканування значно підвищує якість та ефективність моніторингу мостових споруд.[4]

2 Методика дослідження

2.1 Збирання геометричних даних для обстеження мосту

Для аналізу та зіставлення наявних методів здобування геометричних даних було використано загальноживану мову моделювання IDEF0.

IDEF0 (Function Modelling) - це методика функціонального моделювання, яка дозволяє структуровано відобразити процес як систему функціональних блоків та взаємозв'язків між ними.[4]

Завдяки такому підходу стає можливим окреслити вхідну та вихідну інформацію, ресурси та механізми контролю, які залучені на кожному з етапів процесу.

Графічне представлення IDEF0 полегшує розпізнавання ключових фаз та розуміння їх взаємодії.

Розглянемо збір інформації як три важливі етапи аналізу:

1. Збір даних – з'ясування геометричних параметрів мосту, використовуючи традиційну геодезію або лазерне сканування;
2. Обробка інформації – коригування зібраних даних, об'єднання сканів та створення тривимірної моделі для формування структурованої інформації, підготовленої до аналізу;
3. Інтерпретація результатів – аналіз деформацій, виявлення критичних змін у конструкції та прийняття рішень щодо технічного стану мосту.[4]

Рисунок 4 ілюструє типовий процес збору даних під час обстеження мостових конструкцій, використовуючи традиційні підходи.

Вхідні дані: геометричні характеристики споруди.

Залучені особи: геодезисти, інженери.

Інструменти: тахеометр, нівелір.

Вихідні дані: координати кожної точки, що потребують подальшої обробки.

Інтеграція лазерного сканування в робочий процес збору даних значно покращує його та дає можливість отримати набагато детальніші та точніші результати.[6]

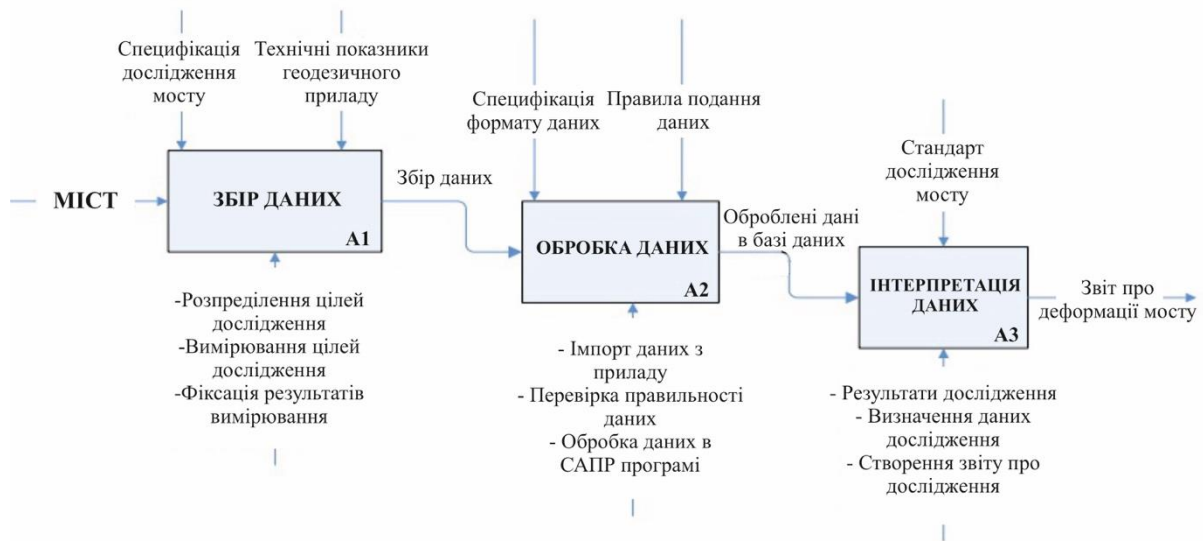


Рисунок 4 Існуючі процеси збору даних обстеження мостів.

Актуальний процес збору геометричних даних можливо поділити на три основні фази:

1. Визначення мети обстеження

На цій стадії чітко формулюються ключові показники, які необхідно виміряти та проаналізувати.

Приклади цілей інспекції:

- Загальна довжина мостової конструкції.
- Мінімальний вертикальний габарит проїзду під мостом.
- Аналіз деформацій критичних складових споруди.

Вихідна інформація:

- Технічна документація на міст.
- Норми експлуатації та вимоги безпеки.

2. План обстеження:

- Спочатку визначаємось, яким методом інформацію збиратимемо (чи то традиційним скануванням, чи, можливо, лазерним).
- Далі ретельно обираємо вимірювальне обладнання, що стане в пригоді (тахеометр, нівелір, а може, лазерний сканер).
- Розміщення точок для обстеження чітко плануємо так, щоб здобути якомога більше важливих даних.
- Не забуваємо про зовнішні умови, які здатні вплинути на роботу (скажімо, вітер, вібрації, доступ до конкретних конструкцій).

3. Звіт обстеження:

- Збирання відомостей, їхнє опрацювання та аналіз приводять до складання звіту.
 - Визначається відповідність будівлі проектним умовам.
- Результат роботи:
- Звіт із зафіксованими виміряними геометричними показниками.
 - Тривимірна модель об'єкта.
 - Рекомендації для подальшого моніторингу та виконання ремонтних заходів.

На рис. 5 подано приклад цілей обстеження мосту, зокрема довжину конструкції і найменший простір по вертикалі.[5]

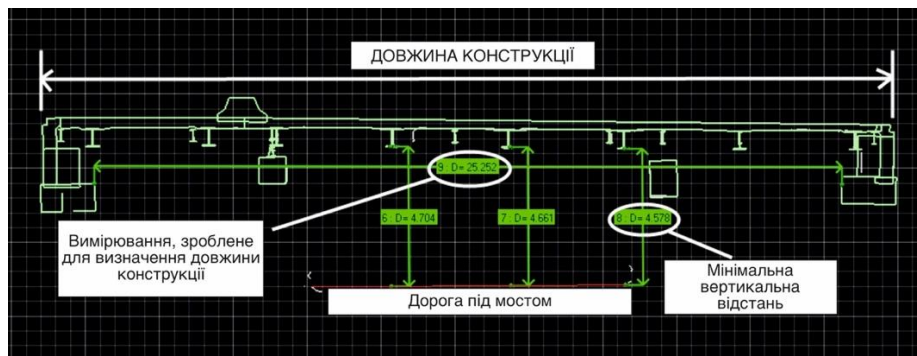


Рисунок 5 Розклад огляду об'єкта: довжина споруди та найменший вертикальний простір.

Під час вивчення деформацій наріжно важливо визначити, котрі саме виміри знадобляться, аби отримати точні параметри, котрі потім підлягатимуть перевірці.

Цей етап описується як розчленовування об'єкта випробування, скажімо, мосту.

На прикладі автомобільного мосту поздовжній розріз дає візуальну уяву про конструкцію, втім фундаменти опор сховані під землею, що унеможлиблює прямі вимірювання задля обчислення справжньої довжини споруди.[5]

У зв'язку з цим, аби отримати необхідний показник, мету перевірки, тобто визначення «довжини конструкції», розподіляють на окремі виміри видимих складових частин.

Довжина обчислюється, виходячи з розмірів, вказаних у проєкті мосту, і з урахуванням положення та спрямування видимої частини.

Подібно, завдання визначити «мінімальний вертикальний проміжок» можна розбити на вимірювання нижньої частини прогонової будови та дорожнього полотна під мостом.

Відповідний мінімальний вертикальний зазор розраховують на основі цих вертикальних вимірів.

Графік обстеження об'єкта напряду залежить від наявних інструментів.

Якщо в наявності лише один тахеометр для вимірювань, задачу "виміряти поверхню" варто розбити на фіксацію ключових точок, що дозволить досягти максимальної точності.[4]

Після розділення, інспектор визначає конкретні виміри, що потрібні для якісного обстеження мостів безпосередньо на місці.

Наприклад, потрібно визначити найкраще розташування тахеометра для найточнішого фіксування потрібних точок.

Цей процес прийнято називати планом обстеження.

Зважаючи на особистий досвід, фахівці розробляють докладний план обстеження, здійснюють заміри та фіксують інформацію у спеціально розробленому бланку, призначеному для збору відомостей про стан мостової споруди.

Цей процес також передбачає складання звітності на основі зібраних даних. Для спрощення цього етапу та автоматизації формування звітів безпосередньо в польових умовах, часом вдаються до використання портативних комп'ютерів.

Проте, на багатьох етапах зібрані дані потребують ручного перенесення у необхідний формат для подальшого імпортування у базу даних.

Водночас, для збору даних на місці дедалі частіше застосовують комп'ютерні пристрої.

Але навіть за таких обставин спостерігачі зобов'язані неухильно дотримуватися форматів даних, а також перевіряти їхню відповідність.

Після обробки геометричних даних, інтерпретація результатів має на меті отримання семантичної інформації, що використовується для прийняття рішень щодо управління деформаціями.

Наприклад, для визначення мінімальної висоти, що дозволяє проїзд транспорту під мостом, спостерігачі вимірюють всі точки біля основи мосту, а також на дорожньому покритті, потім розраховують дозволену висоту проїзду, враховуючи розташування опор мосту.[4]

Цей процес трактування даних в корені протилежний об'єктивному аналізу, адже він зводить до спільного знаменника результати вимірювань для прийняття рішення щодо можливості безпечної експлуатації мостової споруди.

Проте, з огляду на те, що даний процес здійснюється в ручному режимі, під час інтерпретації інформації можуть виникати похибки.

2.2 Збирання даних лазерного сканування для мостового обстеження

Використовуючи наші знання з лазерного сканування, ми пропонуємо таку послідовність отримання геометричних даних для мостових споруд:

1. Збір геометричних даних – на цьому етапі міст сканується безпосередньо лазерним сканером, що фіксує 3D координати кожної точки на його структурі.

Процедура передбачає вимірювання і збереження координат точок в заданому радіусі від місця розташування сканера.

Завдяки високій точності та швидкості сканування на цьому етапі формується детальна хмара точок, яка точно відображає геометрію об'єкта.

2. Обробка даних про форму - зібрана інформація обробляється для створення детальної 3D моделі.

На даному етапі здійснюється об'єднання даних, зібраних з різних джерел, а також відкидається надлишкова чи неправдива інформація.

Хмара точок підлягає подальшій обробці: вирівнюванню, коригуванню та усуненню шумів.[4]

Це робиться для досягнення максимальної точності отриманих результатів.

3. Геометричний аналіз даних: після обробки дані візуалізуються у вигляді інтерпретацій.

Вони представляють значення верифікованих показників моста, зокрема: його конфігурацію, рівень деформації та загальний стан конструкції.

На цьому етапі здійснюється детальний розбір сформованої моделі, після чого її зіставляють з вихідними параметрами проекту, а також

оцінюють можливі деформації та зміни, що могли вплинути на міцність мосту.

Цей спосіб забезпечує коректний збір та обробку інформації, що сприяє детальному вивченню мостової конструкції та прийняттю обґрунтованих рішень щодо її експлуатації та обслуговування в майбутньому.

Візуалізацію процесу представлено на (Рис. 6).[4]

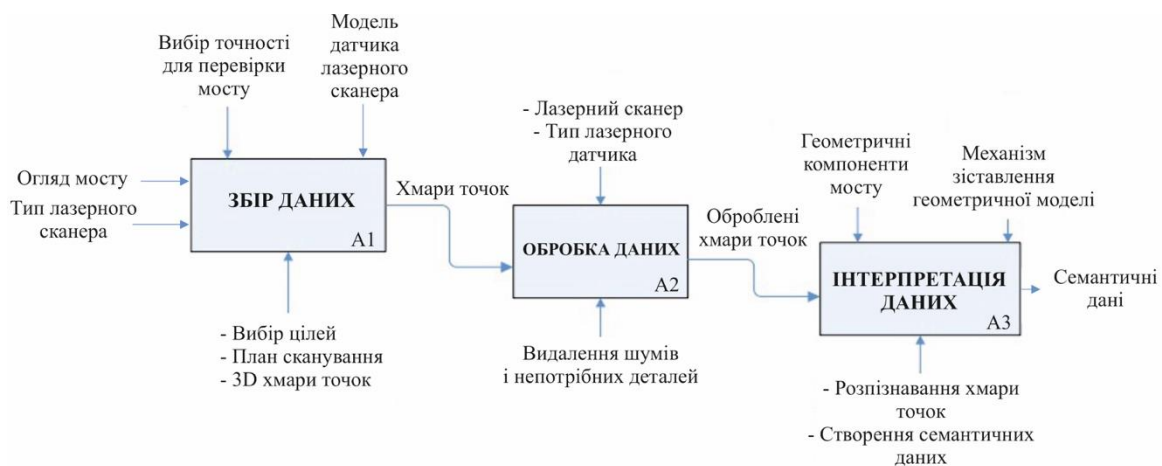


Рисунок 6 Збір геометричних даних мостів за допомогою лазерного сканування.

Застосовуючи лазерне сканування, ми не лише маємо змогу швидко отримати тривимірну інформацію, а й значно оптимізуємо більшість процесів обстеження.

Це зводить до мінімуму роль людського впливу та зменшує вірогідність помилок, які притаманні традиційним методам вимірювання.

Процедура здобуття геометричних даних з використанням лазерного сканування включає в себе не тільки підготовку об'єкта для сканування та створення плану робіт, але й взаємодію з різноманітним програмним забезпеченням, котре автоматизує ці етапи.

Завдяки цьому досягається прискорене надходження правдивої інформації, що вкрай важливо для проєктів з чітко окресленими строками виконання.

Наприклад, лазерне сканування дозволяє миттєво зафіксувати координати та відстані від безлічі точок на об'єкті, що дає змогу згодом безпосередньо інтегрувати ці дані у систему планування.

Ще одним вагомим чинником, який збільшує ефективність процесу, є поєднання з суміжними технологіями, такими як GPS, інерціальні системи та фотограмметрія.[4]

Вищевказане мінімізує ймовірність похибок, зумовлених людським впливом, та забезпечує отримання більш точних і надійних показників.

На етапі аналізу вже стає зрозумілою ціль контролю, а лазерний сканер чітко визначає потрібні розміри вимірювань, спираючись на геометричні особливості об'єкта.

Це гарантує автоматизовану обробку даних, фіксуючи такі показники, як довжина, висота, ширина та інші важливі структурні характеристики.

Дослідження результатів на основі зібраної інформації може значно пришвидшити процеси, які раніше вимагали багато ручної праці.

Оскільки дані лазерного сканування представлені як тривимірне хмарне скупчення точок, програмне забезпечення для обробки інформації, що базується на цих точках, автоматично здійснює всі необхідні обчислення і генерує наступні візуалізації, які дають змогу швидко оцінити стан об'єкта.

Це мінімізує вірогідність помилок, гарантуючи надзвичайну точність на кожному етапі обробки даних.

Що найважливіше, цей інструмент взаємодіє з різними системами управління проєктами, надаючи автоматичну перевірку та підтвердження геометричних характеристик об'єкта у реальному часі.[4]

Отже, весь процес, від збору даних до фінального результату, стає продуктивнішим, стрімкішим та точнішим, оптимізуючи витрати часу і підвищуючи загальну якість робіт.

Відповідно до поставлених задач, геодезисти мають змогу розробляти розширені плани обстеження, які включають всі ключові точки вимірювань з необхідною точністю та детальним опрацюванням, беручи до уваги тимчасові обмеження на об'єкті.

Згідно з аналітичними висновками, що стосуються розробки плану сенсорної зони, автоматизоване планування обстеження є одним з найбільш ефективних методів забезпечення найкращих результатів.

Цей підхід забезпечує урахування всіх факторів, що впливають на точність збору даних, а також мінімізує вплив людського чинника в процесі планування.

Наприклад, дослідження оптимального вибору сенсора для наступного сканування показали, що передові технології можуть оцінювати цілісність та якість даних у реальному часі.

Це підвищує адаптивність процесу та дозволяє швидко вносити зміни до стратегій збору інформації, щоб досягти бажаної точності.

Таким чином, розкладання на складові цілей перевірки та формалізація планування лазерного сканування є технічно обґрунтованими та ключовими для ефективного збору даних у реальних умовах.

Проте, для отримання результатів високої якості, дослідники повинні попередньо обробити "сирі" дані, перш ніж перейти до аналізу 3D хмари точок.[4],[7]

Цей крок є критично важливим, оскільки вихідні дані часто містять різні перешкоди та неточності, і потрібен для забезпечення точності та повноти кінцевого висновку.

Шуми, що виникають у даних тривимірного сканування, проявляються як невеличкі відхилення координат точок.

Вони можуть бути зумовлені обмеженими можливостями сканувального устаткування або впливом сторонніх факторів, здатних впливати на сам пристрій та загальний процес сканування.

Для виправлення цих даних використовуються різні фільтри, зокрема фільтри Гаусса.

Мета таких фільтрів – згладити шуми та покращити загальну якість зібраної інформації.

Однак, існує ризик втрати дрібних деталей об'єкта через надмірне згладжування.

Це може призвести до труднощів у побудові точних моделей та негативно позначитися на розумінні кінцевих результатів.

Крім того, у процесі лазерного сканування хмари точок можуть містити похибки, викликані дефектами устаткування або перешкодами під час сканування.

Для виявлення та усунення таких проблем розроблено спеціальні алгоритми комп'ютерного зору.

Вони автоматично фільтрують ці зайві дані.

Важливим аспектом для збереження цілісності інформації є необхідність об'єднання даних з кількох сканувань.

Це необхідно для отримання більш деталізованого зображення об'єкта.

Завдяки такому підходу, забезпечується наявність усіх необхідних елементів, що будуть потрібні для подальшої роботи.

Завдання полягає у створенні точної 3D-моделі та перевірці ключових параметрів мостової конструкції.

Тільки такий метод гарантує вірну оцінку та коректність використовуваних даних.[4]

Ці відомості є основою для подальших інженерних розрахунків та прийняття рішень щодо експлуатаційного стану та безпеки об'єкту.

Даний процес, відомий як агрегація даних, є критичним етапом при роботі з тривимірними масивами точок, що виникають після лазерного сканування.

Оскільки кожен етап сканування фіксує лише фрагмент інформації про предмет, а хмари точок, здобуті з різних місць, функціонують у власних локальних координатних системах, фахівці вимушені проводити зведення даних, щоби об'єднати ці хмари точок в єдине координатне середовище.

Це надзвичайно важливо для точного визначення геометричних характеристик даних, і вимагає використання відомостей, зібраних з багатьох точок сканування.

Методи автоматизованого зведення даних невпинно вдосконалюються, і одним з найбільш багатообіцяючих способів обробки хмар точок є застосування підходів, заснованих на обмеженнях.

Це суттєво автоматизує процес та збільшує його ефективність.

Після успішного оцифрування хмари точок, очищення від небажаного фону та видалення сторонніх елементів, настає етап інтерпретації зібраної інформації.

Цей процес розподіляється на три основні фази: виокремлення геометричних особливостей, ідентифікація елементів мостової конструкції та формування семантично наповненої хмари точок.

Першим кроком є розпізнавання геометричних параметрів.

На цьому кроці дослідник має поділити хмару точок на ділянки, які відповідають окремим геометричним примітивам, серед яких площини, циліндри, еліпсоїди, або конуси.

В арсеналі для цього існують різноманітні алгоритми сегментації, як-от алгоритми інтервальної обробки зображень, що демонструють добрі результати.

Однак, навіть автоматизовані системи сегментації вимагають втручання людини для досягнення ідеальних результатів.

Після поділу хмари точок алгоритм зіставлення з моделлю може самостійно виділяти геометричні фігури та визначати складові мостів.

Цей процес ґрунтується на точній геометричній візуалізації ключових компонентів мостової конструкції, ідентифікованих за їх характерними рисами.

Метод зіставлення з моделлю не лише визначає геометричні елементи, але й збагачує хмару точок семантичною інформацією.

Як наслідок, утворюються семантично наповнені хмари точок, де кожна точка прив'язана до конкретної категорії, скажімо, до певного елемента мосту, та зберігає значення геометричних параметрів цього елемента.[4]

На основі такої семантичної інформації спостерігач має можливість встановити розміри інспекційних цілей мосту, вдаючись як до ручного підходу, так і до автоматизованої допомоги з використанням механізмів семантичного виведення.

Це значно полегшує процес створення інспекційних цілей, оскільки дані, здобуті з хмари точок, можуть бути негайно застосовані для оцінки параметрів мостової конструкції.

Такий процес є оберненим по відношенню до етапу синтаксичного аналізу інспекційних цілей.

Спостерігач має змогу отримати доступ до семантично наповненої хмари точок, щоби витягувати потрібну інформацію, наприклад, "північну межу устою". Далі, видобуті геометричні властивості можна об'єднати для створення цільових показників інспекції.

Впорядковані семантичні дані, які містяться у хмарі точок, презентуються як формалізований опис геометрії мостової конструкції.

З цього опису автоматично отримують ключові геометричні параметри, на основі яких формулюються висновки.

Це суттєво пришвидшує та збільшує точність процедур обстеження мостів та інших інженерних об'єктів.

Подальше вдосконалення автоматизованих систем збору й аналізу даних відкриває перспективи інтегрування різноманітної інформації.

Наприклад, це можуть бути фотографії з дронів, теплові зображення та інші дані, отримані з сенсорів, що є надзвичайно цінними для діагностики мостових конструкцій.

Термографія, зокрема, надає змогу виявляти приховані дефекти, що є недоступними для звичайного лазерного сканування.

Маємо на увазі тріщини чи зміни температури, які вказують на наявність дефектів у матеріалах.

Використовуючи різноманітні підходи, можна створити комплексну систему нагляду, яка значно покращить чіткість та обсяг оцінки технічного стану об'єкта.

Скомбінувавши інформацію, отриману різними способами, вдасться збудувати більш реалістичні мостові моделі, що дадуть змогу прогнозувати майбутній стан та потреби у сервісі.

Такий підхід становить базу для розвитку інтелектуальних систем керування інфраструктурою, в яких автоматизовані рішення здатні оптимізувати графіки обслуговування, визначити пріоритетність ремонтних робіт та спрогнозувати термін служби споруд.[5]

Він також дає можливість ретельніше планувати фінансові затрати та ресурси, контактуючи з базою даних, яка зберігає попередні відомості про інспекції, відновлення та покращення.

Щоб збільшити продуктивність та комфорт моніторингу за допомогою лазерного сканування, можна спроектувати додаткові інтерфейси для швидкого отримання даних на мобільних пристроях та хмарних сервісах.

Це надасть інженерам і технічним працівникам змогу миттєво отримувати усю потрібну інформацію під час перевірок на місцях, оптимізує взаємодію між різними підрозділами та сприятиме прийняттю більш обґрунтованих рішень.

Проте, хоча лазерне сканування і автоматизована обробка даних досягли вражаючого прогресу, людський нагляд та верифікація даних все ще необхідні, особливо у випадку нестандартних або складних обставин.

Оператори повинні мати змогу прискіпливо аналізувати отримані результати та вчасно виправляти помилки або неточності, які можуть виникнути через некоректні параметри обладнання або програмні збої.[4]

Відтак, людський контроль відіграє критичну роль у гарантуванні достовірності та відповідності отриманих даних.

Передбачається, що у зв'язку з прогресом у технологіях лазерного сканування та аналізу інформації, з часом ці процеси стануть ще більш автоматизованими.

У найближчому майбутньому ймовірно з'являться нові алгоритми, здатні автоматично сортувати та обробляти дані з вищою точністю, а також використовувати штучний інтелект для передбачення технічного стану устаткування.

Це не лише поліпшить результативність перевірок, але й сприятиме зменшенню витрат на сервісне обслуговування та збільшенню терміну служби інфраструктури.

3. Результати дослідження

На основі сучасних досліджень деформацій мостових споруд та опису методів отримання геометричних даних про мости з застосуванням лазерного сканування проведено порівняльний аналіз двох наборів інформації, які стосуються цих процесів.

Такий аналіз дозволяє оцінити ефективність та правильність кожного з підходів у розрізі вивчення деформаційних змін у мостових об'єктах.

Візуалізація результатів порівняння представлена у таблиці 1, яка містить основні параметри кожного методу, включаючи точність, час збору даних, рівень автоматизації та необхідне обладнання.[4]

Таблиця 1 Порівняння методів на основі тахеометричне вимірювання проти лазерного сканування.

Характеристики	Тахеометрична зйомка	Лазерне сканування
Точність однієї точки	Кутова точність 5" Точність відстані: 3мм \pm 2ppm	Кутова точність 72" Точність відстані: від 3 до 9мм в залежності від поверхні відбивання
Точність 3D моделі	Не застосовується: точки не використовуються для створення сітки на основі геометричних даних	Алгоритми генерації сітки можуть зіставляти поверхні із щільними хмарами точок, щоб отримати 3D модель з вищою точністю
Повнота даних	Розріджені зібрані точки не можуть захопити деталі поверхні для ефективного виявлення деформацій або вимагають визначення спеціальних геодезичних цілей для захоплення очікуваного геометричного малюнку	Щільні хмари точок можуть фіксувати деталі поверхні мосту та виявляти зміни форми без необхідності визначати будь – які об'єкти зйомки оскільки поверхня що досліджується знаходиться в полі зору сканера
Потенціал для інтерпретації даних	Розріджені зібрані точки вимагають від спостерігачів вручну призначати семантичне значення кожній точці для інтерпретації даних	Багато алгоритмів комп'ютерного зору можуть розпізнавати 3D об'єкти з хмари точок за допомогою сегментації хмари точок, виділення геометричних ознак і зіставлення

		моделі, тому можна автоматизувати процес інтерпретації даних
Час дослідження в польових умовах	Автомобільний міст використаний в даній роботі вимагає проведення спостережень на протязі цілого дня	Враховуючи планування сканування для забезпечення збору всіх даних за допомогою невеликої кількості сканувань, автомобільний міст потребує 2 год для виконання польових робіт
Камеральна обробка результатів	Декілька тижнів для введення даних і ручне геометричне моделювання	Враховуючи семантично багаті хмари точок, необхідно кілька днів для обробки та аналізу даних. Але правильна попередня обробка даних, наприклад видалення шуму даних і сегментація хмари точок, необхідна і потребує додаткового часу на обчислення

Цей зведений огляд розкриває плюси та мінуси кожної техніки, допомагаючи визначити найпрактичніший підхід.

У таблиці 1 чітко видно ключові відмінності між традиційними способами вимірювання деформацій мостів та методами, що використовують лазерне сканування.

Зокрема, лазерне сканування забезпечує вищу точність збору інформації та дає можливість миттєво створити деталізовану 3D модель об'єкта, суттєво зменшуючи тривалість обстеження.

Окрім вимірів геометрії, лазерне сканування дає змогу формувати надзвичайно інформативні семантичні хмари точок.

Це, в свою чергу, створює сприятливе середовище для автоматизації процесу аналізу даних та їх подальшої взаємодії з різними системами, серед яких BIM (Інформаційне моделювання будівель).[4]

Власне, така здатність відкриває широкі перспективи для автоматизації операцій з даними та їхньої інтеграції з іншими системами, наприклад, BIM (Інформаційне моделювання будівель).

Це суттєво полегшує огляд мостових конструкцій та мінімізує ризик помилок, зумовлених людським фактором, при аналізі отриманих даних.

З представленої таблиці 1 стає очевидним, що лазерне сканування виглядає як багатообіцяючий сенсорний підхід для автоматизації вимірювань геометричних параметрів мостів.

Передусім, невелика залежність кутової точності від точності позиціонування точки на близьких відстанях зумовлює порівнянність точності даних із точністю тахеометрів на відстанях до кількох десятків метрів.

Окрім цього, на відміну від тахеометрів, котрі не можуть збирати значні обсяги інформації за короткий проміжок часу, лазерні сканери здатні оперативно генерувати масиви даних з високою щільністю.[4]

Також, 3D-моделі, що базуються на інформації високої щільності, характеризуються значно вищою геометричною точністю, ніж набір окремих точок.

Лазерні щільні масиви точок несуть значно більше даних, ніж розріджені масиви, які збирають тахеометри.

Щільні хмари точок мають здатність виявляти неочікувані деформації мостів, оскільки вони фіксують поверхню з меншими відстанями між точками.

Як приклад, особливості деформації мосту, зображеного на рисунку 2, були раніше невідомі, але завдяки 3D моделі, побудованій на основі щільного масиву точок, цю деформацію вдалось зафіксувати.

Існують технологічні можливості для ідентифікації тривимірних об'єктів за допомогою густих точкових хмар, а також реалізації автоматичної генерації семантично наповнених точкових хмар.

На сучасному етапі розвитку, професійні програмні засоби, такі як AutoCAD, знаходять застосування у процесі відновлення 3D-моделей мостових споруд, а також для ручного виділення геометричних характеристик.

Однак, враховуючи відсутність семантики в хмарах точок, ручне опрацювання стає тривалим і вразливим до помилок процесом.

Алгоритми розпізнавання об'єктів дозволяють спостерігачам автоматично визначати об'єкти та збагачувати дані семантичною інформацією, як-от, скажімо, інформацією про висоту колон.

Досить лише обробити 3D-складові частини мосту, розпізнаного системою, а геометричні характеристики цих елементів будуть автоматично вилучені з масиву даних.

Створення автоматизованих алгоритмів збору, обробки та інтерпретації даних на основі комп'ютерного зору суттєво економить час і людські ресурси.[4]

Висновки

У даній бакалаврській роботі проведено дослідження та порівняльний аналіз двох методик отримання геометричних даних про мостові споруди: традиційне обстеження мостів та сучасний метод лазерного сканування.

Основною перевагою лазерного сканування виступає значна швидкість та висока точність збору інформації, що сприяє суттєвому прискоренню процесу визначення геометричних параметрів мостів.

Застосування лазерних сканерів відкриває можливості для створення деталізованих тривимірних моделей об'єктів, забезпечуючи набагато точніші геометричні дані у порівнянні з традиційним геодезичним обладнанням, наприклад, тахеометрами.

Лазерні сканери демонструють унікальну здатність обробляти декілька об'єктів одночасно, фіксуючи деталізовані відомості про їх поверхні.

Це відкриває широкі горизонти для проведення комплексного аналізу отриманих даних.

Однак, використання цієї технології для інспекції мостових споруд висуває певні виклики.

Першочергове завдання – це забезпечення автоматизованого розгортання та налаштування сканувального обладнання в реальних умовах.

Дані, що отримуються, повинні відповідати жорстким вимогам щодо точності для кожного елемента моста, що підлягає контролю.

Другим важливим аспектом є автоматичне визначення окремих складових моста з масиву точок та присвоєння їм семантичної інформації для полегшення подальшої роботи.

Нарешті, необхідна автоматизована система підтримки для обробки та інтерпретації інформації, зібраної інспекторами, а також формування конкретних завдань з огляду мостових конструкцій, враховуючи вимоги до кожного окремого об'єкта контролю.

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. Tang, Pingbo, Akinci, Burcu, Garrett, James. (2007). Laser Scanning for Bridge Inspection and Management. IABSE Symposium Report. 93. 17-24. 10.2749/222137807796120283.
5. Гордон, С. Дж., Д. Ліхті, Д., стюарт, М. П., франке, Дж., «Моделювання хмар точок для точного вимірювання структурної деформації», представлено на XX-му конгресі ISPRS, Стамбул, Туреччина, 2004.
6. Ясельскіс, Е. Дж., гао, З., волтерс, Р. К., «Покращення транспортних проектів за допомогою лазерного сканування», Журнал будівельної інженерії та управління, 2005, 131, 377.
7. Фукс, П. А., Вашер, Г. А., Чейз, С. Б., Мур, М., «Застосування лазерних приладів для автомобільних мостів», Журнал мостобудування, 2004, 9, 541.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Аналіз ефективності дослідження деформацій мостів за допомогою наземного лазерного 3D сканування та традиційних методів ».

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)