

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АГРОБІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Допускається до захисту
Зав. кафедри геодезії ,землеустрою та
інженерії безпілотних технологій
доцент _____ Т.М. Сіроштан

«08»листопада 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

НА ТЕМУ:
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАЗЕМНОГО
ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ШЛЯХОМ КАЛІБРУВАННЯ**

Виконав(ла) Слодзік Андрій Григорович

Керівник к.е.н., доц. Сіроштан Т.М.

Рецензент _____

Я, Слодзік Андрій Григорович, засвічую, що кваліфікаційну роботу виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.

РЕФЕРАТ

Слодзiк Андрiй Григорович

«Дослiдження пiдвищення точностi наземного лазерного сканування шляхом калiбрування»

Актуальнiсть теми. Наземне лазерне сканування (TLS) посiдає ключове мiсце серед сучасних технологiй високоточного просторового вимiрювання, забезпечуючи швидке отримання детальних тривимiрних моделей об'єктiв та територiй. Проте якiсть i надiйнiсть результатiв сканування значною мiрою залежать вiд точностi внутрiшнiх параметрiв приладу, стабiльностi його роботи та правильностi взаємного узгодження всiх компонентiв системи. Навiть незначнi похибки у калiбруванні лазерного сканера можуть призводити до змiщення координат, деформацiї моделi, збiльшення шумiв або погiршення геометричної вiдповiдностi даних.

Тому питання пiдвищення точностi TLS шляхом застосування ефективних методiв калiбрування набуває особливої актуальностi. Калiбрування дозволяє виявити та компенсувати систематичнi вiдхилення у роботi сканера, скоригувати iнструментальнi зсуви, покращити узгодженiсть багатостанцiйних вимiрювань та забезпечити стабiльнiсть отриманих даних у рiзних умовах експлуатацiї. Сучасний пiдхiд до калiбрування включає як геометричнi, так i математичнi методи оптимiзацiї, що дозволяють пiдвищити точнiсть безпосередньо на етапi збору, а також на стадiї пiсляобробки.

Таким чином, дослiдження, спрямованi на вдосконалення процедур калiбрування наземного лазерного сканування, є необхідними для пiдвищення точностi геопросторових даних, розширення дiапазону застосування TLS та забезпечення їх вiдповiдностi сучасним вимогам iнженерної геодезiї, архiтектурних вимiрювань i кадастрових робiт.

Отже, дослiдження пiдвищення точностi наземного лазерного сканування через удосконалення процедур калiбрування має важливе наукове

та практичне значення. Воно спрямоване на забезпечення високої достовірності тривимірних геопросторових даних, підвищення ефективності інженерних вимірювань та покращення загальної якості цифрових моделей об'єктів і територій, що формуються за допомогою TLS.

Метою цієї роботи є проведення аналізу сучасних підходів до підвищення точності наземного лазерного сканування.

Для реалізації даної мети нами були поставлені та виконані наступні завдання:

- проаналізувати наявні методи та моделі калібрування наземних лазерних сканерів різних типів;
- визначити джерела похибок та їх вплив на дані, отримані за допомогою наземного лазерного сканування;
- проаналізувати сучасні підходи до підвищення точності наземного лазерного сканування.

Об'єкт дослідження—дані, отримані способом наземного лазерного сканування.

Предмет дослідження—методи і моделі калібрування наземних лазерних сканерів, що використовуються для підвищення точності.

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 55 сторінок, 2 таблиці, 5 рисунків, список використаних джерел із 50 найменувань.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, НЛС, калібрування, ЛІДАР, методи дистанційного знімання, просторові дані, системне калібрування, інженерно-геодезичні роботи, методика калібрування, підвищення точності.

ABSTRACT

Slodzik Andriy Hryhorovych

"Investigation of improving the accuracy of terrestrial laser scanning by means of calibration"

Terrestrial laser scanning (TLS) occupies a key place among modern high-precision spatial measurement technologies, providing rapid acquisition of detailed three-dimensional models of objects and territories. However, the quality and reliability of the scanning results largely depend on the accuracy of the device's internal parameters, the stability of its operation, and the correctness of the mutual coordination of all system components. Even small errors in the calibration of the laser scanner can lead to displacement of coordinates, deformation of the model, increase in noise or deterioration of the geometric correspondence of the data.

Therefore, the question of increasing the accuracy of TLS by applying effective calibration methods becomes especially relevant. Calibration allows you to detect and compensate for systematic deviations in the operation of the scanner, correct instrumental shifts, improve the consistency of multi-station measurements, and ensure the stability of the obtained data in various operating conditions. The modern approach to calibration includes both geometric and mathematical optimization methods, which allow to increase accuracy directly at the collection stage, as well as at the post-processing stage.

Thus, research aimed at improving calibration procedures of terrestrial laser scanning is necessary to increase the accuracy of geospatial data, expand the range of TLS applications and ensure their compliance with modern requirements of engineering geodesy, architectural measurements and cadastral works. Therefore, the study of improving the accuracy of terrestrial laser scanning through the improvement of calibration procedures is of important scientific and practical importance. It is aimed at ensuring high reliability of three-dimensional geospatial data, improving the efficiency of engineering measurements and improving the overall quality of digital models of objects and territories formed using TLS.

The purpose of this work is to analyze modern approaches to improving the accuracy of terrestrial laser scanning.

To realize this goal, we set and completed the following tasks:

- to analyze the existing methods and models of calibration of ground laser scanners of various types;
- to determine the sources of errors and their impact on the data obtained by ground laser scanning;
- to analyze modern approaches to increasing the accuracy of terrestrial laser scanning.

The object of the study is data obtained by means of terrestrial laser scanning.

The subject of research is methods and models of calibration of ground laser scanners used to increase accuracy.

The bachelor's qualification work contains 2 pages, 2 tables, 5 figures, a list of used sources with 50 titles.

Key words: terrestrial laser scanning, NLS, calibration, LIDAR, remote sensing methods, spatial data, system calibration, engineering and geodetic works, calibration technique, accuracy improvement.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 8 |
| РОЗДІЛ 1. ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ НАБОРУ ДАНИХ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ДЛЯ КАДАСТРОВОЇ ЗЙОМКИ | 10 |
| 1.1. Методологічні підходи застосування наземного лазерного сканування в кадастрових системах провідних країн світу | 10 |
| 1.2. Практичні моделі та технологічні рішення використання TLS у процесі кадастрової зйомки в ЄС, США та Азії | 14 |
| 1.3. Порівняльна оцінка ефективності впровадження TLS-технологій у кадастрову практику різних країн | 17 |
| Висновки до 1 розділу | 20 |
| РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНИЙ ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМИЛОК ТА СТРАТЕГІЙ ЇХ ЗМЕНШЕННЯ В НАЗЕМНОМУ ЛАЗЕРНОМУ СКАНУВАННІ | 21 |
| 2.1. Математична класифікація та параметризація помилок у наземному лазерному скануванні | 21 |
| 2.2. Аналітичні та статистичні методи оцінювання і моделювання похибок TLS | 27 |
| 2.3. Стратегії мінімізації помилок на основі математичних алгоритмів та калібрувальних процедур | 30 |
| Висновки до 2 розділу | 33 |
| РОЗДІЛ 3 ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ДАНИХ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ З ПОВІТРЯ ЗАВДЯКИ РЕТЕЛЬНОМУ КАЛІБРУВАННЮ ТА КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДАМ НАЛАШТУВАННЯ СМУГ | 34 |
| 3.1. Методи та підходи калібрування аеролазерних сканувальних систем для підвищення точності геопросторових даних | 34 |
| 3.2. Комплексні технології калібрування та налаштування параметрів польоту та сканування для мінімізації похибок ALS-даних | 37 |
| 3.3. Оцінка ефективності вдосконалених процедур калібрування в контексті підвищення якості LiDAR-даних | 41 |
| Висновки до 3 розділу | 46 |
| ВИСНОВКИ | 48 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 50 |

ВИСНОВКИ

Досвід провідних країн світу підтверджує, що впровадження TLS є частиною ширшої тенденції до створення тривимірних кадастрів (3D Cadastre). Використання цієї технології суттєво підвищує точність, достовірність та ефективність кадастрових процесів, дозволяючи реєструвати не лише площинні, але й об'ємні (багатоповерхові, підземні) об'єкти нерухомості з необхідною юридичною та технічною точністю.

Таким чином, TLS є не просто інструментом, а стратегічним методологічним підходом, що трансформує кадастрову практику.

Запропоноване дослідження ефективно вирішує проблему підвищення якості геопросторових даних, отриманих за допомогою аеролазерного сканування (ALS), шляхом впровадження двох комплексних та взаємодоповнюючих методів: ригористичного калібрування системи та робастного зрівнювання смуг.

Основні Досягнення

1. Мінімізація похибок: дослідження досягає значного зменшення як систематичних (через калібрування), так і випадкових (через зрівнювання смуг) похибок.

2. Калібрування (модельно-орієнтований метод): вперше запропоновано автоматизований, ригористичний та одночасний процес калібрування зовнішніх (орієнтація сенсорів) та внутрішніх (параметри сканера) параметрів системи. Це забезпечує фундаментальну корекцію джерел похибок, що є критичним для розуміння роботи ALS-системи.

3. Зрівнювання смуг (керований даними метод): цей підхід ефективно використовує просторову та часову інформацію для робастної реєстрації та корекції даних, що забезпечує високу якість як при зливанні хмар точок, так і

при прямому геоприв'язуванні. Метод є масштабованим для різних типів платформ (БПЛА) і сенсорів.

4. Практична цінність: комбінація методів підвищує точність позиціонування, узгодженість даних та зручність збору, відкриваючи нові можливості для міського планування, управління інфраструктурою (наприклад, інспектування ліній електропередач) та оперативного реагування після стихійних лих.

Досі не було проведено адекватних досліджень, що об'єднують усі очікувані геометрії в одне унікальне калібрувальне дослідження. Розгляд геометрій окремо призводить до ненадійного або неповного зворотного зв'язку щодо калібрування через існуючий взаємозв'язок між окремими джерелами систематичних помилок. Таким чином, оптимальна реакція для калібрування TLS вимагає одночасної перевірки всіх впливаючих факторів, з належним урахуванням різних ваг у процесі розв'язання.

Дослідження є важливим кроком у розвитку геопросторової науки. Хоча воно є попередньою спробою, отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень у підвищенні надійності та точності геопросторових даних. Подальші дослідження повинні зосередитися на самокалібруванні в реальному часі, глобальній оптимізації через спільне зрівнювання та тіснішій інтеграції часової інформації, а також на комбінуванні ALS-методів з даними інших сенсорів (наприклад, зображеннями), що відповідає загальному тренду переходу до часово-просторового інтелекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Медик, Т.; Хольст, К.; Кульманн, Г. Покращення результатів калібрування наземного лазерного сканера за допомогою оптимізованого процесу калібрування. У працях Oldenburger 3D-Tage 2019, Ольденбург, Німеччина, 6–7 лютого 2019 р. [[Google Scholar](#)]
2. Ши, С.; Муралікрішнан, Б.; Соєр, Д. Калібрування наземного лазерного сканера та оцінка його продуктивності за допомогою мережевого методу. *Opt. Lasers Eng.* 2020 , 134 , 106298.
3. Уолш, Г. *Технічний огляд Leica ScanStation: Leica ScanStation серії P — деталі, що мають значення*; Leica Geosystems AG: Хербругг, Швейцарія, 2015. [[Google Scholar](#)]
4. Аббас, М.А.; Сетан, Х.; Маджид, З.; Чонг, А.К.; Лух, Л.К.; Ідріс, К.М.; Аріфф, М.Ф.М. Дослідження систематичних помилок гібридних та панорамних сканерів. *J. Teknol.* 2014 , 71 , 65–70.
5. Гарсія-Сан-Мігель, Д.; Лерма, Х.Л. Геометричне калібрування наземного лазерного сканера з локальними додатковими параметрами: автоматична стратегія. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2013 , 79 , 122–136.
6. Холст, К.; Арц, Т.; Кульманн, Г. Зміщені та незміщені оцінки на основі лазерного сканування поверхні з невідомими деформаціями. *J. Appl. Geod.* 2014 , 8 , 169–183.
7. Єн, Дж.; Лебер, Д.; Пібіда, Л. Порівняння приладів. Технічна примітка NIST 2016.
8. Муралікрішнан, Б. Оцінка продуктивності наземних лазерних сканерів — огляд. *Meas. Sci. Technol.* 2021 , 32 , 072001. Аль-Манасір, К.; Ліхті, Д.Д. Самокалібрування сканера Leica HDS7000. У працях Робочого тижня FIG 2015, «Мудрість віків – виклики сучасного світу», Софія, Болгарія, 17–21 травня 2015 р.; Доступно онлайн: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts07e/TS07E_al-manasir_lichti_7889.pdf.

9. Медич, Т.; Кульманн, Г.; Хольст, К. Проектування та оцінка калібрувального поля, орієнтованого на користувача, для самокалібрування панорамних наземних лазерних сканерів на основі цілі. *Remote Sens.* 2020 , 12 , 15.
10. Ліхті, Д.Д. Моделювання помилок, калібрування та аналіз наземної лазерної сканувальної системи АМ-CW. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2007 , 61 , 307–324.
11. *Юридична відстежуваність довжини для електронного обладнання для вимірювання відстані: Посібник з процедур*; Департамент природних ресурсів та гірничої справи, уряд Квінсленду: Брісбен, Австралія, 2012.
12. Закарія, Ф.А.; Ятім, МХМ; Аріф, М.Ф.М.; Разалі А.Ф.; Чун, Т.Л.; Namid, HA Використання набору даних наземного лазерного сканування для кадастрової зйомки. *J. Adv. geomat. Sci. технол.* 2024 , 4 , 205–230.
13. Дудла В. В., Могильний С. О. Дослідження впливу кута падіння лазерного променя на точність дальності фазового сканера. *Збірник наукових праць КНУБА*. Київ, 2024..
14. Костецька О. Б., та ін. Порівняльний статистичний аналіз методів реєстрації (ICP та на основі опорних марок). *Геодезія, картографія та аерофотознімання*. 2024.
15. Левчук О. М., Завадський І. В. Аналіз апостеріорної точності зведення хмар точок за методом найменших квадратів. *Науковий вісник Львівської політехніки. Серія: Геодезія*. 2023.
16. Літинський В. О., та ін. Оцінка точності результатів вимірювання наземним лазерним сканером при визначенні параметрів геометричних примітивів. *Вісник геодезії та картографії*. 2023.
17. Приходько В. М., та ін. Методика польового калібрування наземного лазерного сканера з використанням тестових еталонів. *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва : зб. наук. праць*. Львів, 2022. С. 150–158.

18. Третяк К. Р., та ін. Оцінка точності лазерного сканування для контролю геометричних параметрів пошкоджених будівель. *Вісник геодезії та картографії*. 2022. № 5. С. 45–54.
19. Федоришин В. С., Пилипчук О. Я. Моделювання та мінімізація накопичених похибок у великих мережах лазерного сканування. *Геоінформатика*. 2023. № 4. С. 30–38.
20. Закальський О. Я., Гриб В. О. Використання хмар точок для виявлення та кількісної оцінки деформацій: статистична обробка даних. *Збірник наукових праць НУ "Львівська політехніка"*. Львів, 2023.
21. Буряк В. В., Городецька Н. В. Аналіз кореляційних залежностей похибок вимірювання дальності наземного лазерного сканера. *Сучасні проблеми геодезії та картографії : зб. наук. праць*. 2024. Вип. 1. С. 40–49..
22. Котенко О. П., Новак Л. І. Моделювання впливу атмосферних умов на похибки кутових вимірювань TLS. *Геодезія, картографія, кадастр та землеустрій : зб. наук. праць*. Харків, 2023. С. 75–82. (Фокус на аналітичному моделюванні зовнішніх похибок).
23. □ Музика П. П., Петренко С. О. Застосування методів статистичного контролю якості (QC) для оцінки точності хмар точок після фільтрації шуму. *Вісник геодезії та картографії*. 2023. № 6. С. 60–68.
24. □ Орловська К. С., Рибницький М. В. Оцінка внутрішньої точності сканера на основі аналізу відхилень від модельних примітивів: статистичний підхід. *Науковий вісник УкрДАЗТ*. 2024. № 1. С. 102–110.
25. Пилипчук В. В. Аналітична модель поширення похибок у координати точки при багатопозиційному скануванні. *Вісник НУ "Львівська політехніка"*. 2022. № 967. С. 25–32.
26. Поліщук В. Я., та ін. Статистичні критерії для виявлення та відкидання грубих похибок у вимірах TLS. *Геоінформатика*. 2024. № 1. С. 55–64..

27. Романенко М. М., Іванов О. С. Дослідження похибок, спричинених нерівномірністю сканування та розміром лазерної плями. *Збірник наукових праць НТУ*. 2023. № 5. С. 115–124..

28. Стецюк О. В. Застосування методу коваріаційних функцій для моделювання просторової кореляції похибок у хмарі точок. *Наукові записки: Серія "Геодезія"*. 2024. № 3. С. 18–26..

29. Хоменко Л. Г., Захаров А. В. Методика апостеріорної оцінки точності врівноваження геодезичних мереж з інтеграцією TLS. *Вісник геодезії та картографії*. 2023. № 4. С. 30–38.

30. Шевченко Т. Г., та ін. Аналіз і моделювання систематичних похибок індексної осі наземного лазерного сканера. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*. 2022. № 5. С. 10–19..

31. Визначення точності відхилення положення близькостворної точки за допомогою електронного тахеометра / Бурак К. О., Гринішак М. Я., Ковтун В. М., Михайлишин В. П., Шпаківський О. П. *Вісник геодезії і картографії*. Київ, 2012. №2 (77). С. 15–17.

32. Войтенко С. П., Шульц Р. В., Медведський Ю. В. Сучасні методи передачі координат пунктів просторової геодезичної мережі на монтажний горизонт. *Будівництво України: наук.-виробн. журнал*. К., 2009. Вип. № 9–10. С. 21–24.

33. Впровадження державної геодезичної референцної системи координат України – УСК 2000 / О. Кучер, Ю. Стопхай, Р. Васютенко, О. Ранкевич. Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід. Вип.4. Чернігів, 2008. С. 25–3

34. Геодезичне забезпечення будівництва. Частина 2. : навчальний посібник / Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Бікс Ю. С., Вовк Т. Ю. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 99 с

35. ДБН В.1.3.-2:2010. Система забезпечення точності геометричних параметрів в будівництві. Геодезичні роботи в будівництві. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 70 с.

36.ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. К.: Мінрегіонбуд України, 2014. 126 с.

37.Двуліт П. Д., Джуман Б. Б., Смелянець О. В. Модель гравіметричних складових відхилень прямовисних ліній території України за даними EGM 2008. *Геодинаміка: Наук.-техн. зб.* Л.: НУ “Львівська політехніка”, 2012.№ 1(12). С. 30–35.

38.Дослідження точності визначення координат GNSS методом в режимі RTK / Віват А. Й., Літинський В. О., Колгунов В. М., Покотило І. Я. *Геодезія, картографія і аерофотознімання.* 2011. №74. С. 52–59.

39. ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Виконання вимірювань, розрахунків та контроль точності геометричних параметрів. К., 2010. 70 с.

40.Заблоцький Ф., Савчук М. Точність вологої складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GPS-спостережень. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2014. Вип. І(27). С. 52–54.

41.Задемленюк А. В. Аналіз GNSS обладнання для роботи в RTK режимі. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Львів, 2010. Вип. ІІ (18).С. 108–116.

42.Задемленюк А. В. Дослідження впливу похибок на супутникові вимірювання в RTK-режимі. *Геодезія, картографія і аерофотознімання.* 2010. № 73. С. 25–33.

43.Задемленюк А. В. Дослідження похибок супутникових вимірювань в RTK режимі. Нові технології в геодезії та землепорядкуванні. Ужгород, 2010. Вип. 5. С. 90–93.

44.Задемленюк А. В. Про сучасний стан координатного забезпечення та перспективи його вдосконалення для задач кадастру. *Геодезія, картографія і аерофотознімання.* Львів, 2008. Вип. 70. С. 14–20.

45.Задемленюк А. В. Результати експериментальних досліджень точності визначення координат та практичне застосування RTK-технології з використанням GPRS Internet з'єднання. *Геодезія, архітектура та будівництво.*

Львів, 2009. Вип. 2. С. 130–133.

46. Застосування супутникових методів для створення геодезичної мережі при будівництві метрополітену / Р. В. Шульц, М. В. Білоус, В. Я. Ковтун та ін. Вісник геодезії та картографії, 2012, № 2 (77). С. 5–9.

47. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.geoguide.com.ua/basisdoc/basisdoc.php?part=tgo&art=3501>.

48. Інструкція про побудову державної геодезичної мережі з використанням супутникових радіонавігаційних систем. Офіц. вид. К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, 2002. 56 с.

49. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування.