УДК 528.4 **DOI: 10.33042/2522-1809-2024-3-184-134-138**

А.Г. Батракова, І.С. Гунько, Є.В. Дорожко, Г.С. Саркісян, С.М. Урдзік

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ПОЄДНАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛАЗЕРНОГО 3D-СКАНУВАННЯ З РІЗНИХ СТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛОСКИХ МАРОК

У статті розглянуто технологію поєднання результатів лазерного 3D-сканування з різних станцій з використанням плоских марок. Автоматична прив'язка та зшивання результатів сканування здійснювалися за допомогою програми Trimble RealWorks. Визначено переваги та недоліки розглянутої технології, а також надано рекомендації щодо використання плоских марок різних розмірів.

Ключові слова: *лазерне 3D-сканування, плоскі площинні марки, алгоритм зшивання, хмара точок, Trimble RealWorks.*

Постановка проблеми

Лазерне 3D-сканування є перспективною технологією, що набуває все більшої популярності та активно застосовується у всьому світі. Однією з переваг лазерного 3D-сканування є швидкість процесу сканування і обробки результатів. Як порівняти з іншими геодезичними приладами, ця технологія дозволяє ефективно відобразити великі об'єкти за значно менший часовий проміжок. Наприклад, на етапі будівництва промислового підприємства сканування дозволяє в реальному часі слідкувати за формами та розмірами всіх його елементів, що є критично важливим для контролю та оптимізації будівельних процесів [1, 2].

Важливим аспектом є і геометрична складність об'єктів. Багато об'єктів можуть мати складні форми або однотипні елементи значної протяжності. При об'єднанні результатів сканування з різних станцій необхідно забезпечити точність та правильну геометрію об'єкта. Для поєднання результатів сканування застосовуються спеціальні маркери у формі сфер та плоских площинних марок. Однак, на відміну від сфер, плоскі марки можуть виявитися більш зручним та економічним вибором. Крім того, їх можна залишити на об'єкті на тривалий період, що значно спрощує процеси додаткового сканування чи корекції даних. Також необхідно зазначити, що в наш час розвиток технологій лазерного сканування привів до виникнення нових сканерів, що автоматично можуть зшивати результати сканування шляхом використання передової технології відслідковування характерних точок у навколишньому середовищі [3]. Незважаючи на суттєві переваги цієї новітньої технології щодо ефективності та точності, варто звернути увагу на те, що вона є досить витратною. Відповідно, сканери, які не обладнані цією передовою технологією, спираються на альтернативні методи зшивання результатів сканування, зокрема розміщення плоских площинних марок на об'єкті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних дослідженнях та публікаціях підкреслено актуальність використання плоских площинних марок у лазерному скануванні [4–8]. Проте важливо враховувати, що якість знімання та розпізнавання цих марок напряму залежить від рівності поверхні, на якій вони розміщені. Гладка і рівна поверхня сприяє кращій реєстрації марок та підвищує точність сканування, тоді як нерівності можуть призводити до помилкового розпізнавання марок або зменшення точності вимірювань. Тому вибір місця розміщення марок та дотримання оптимальних умов щодо забезпечення найвищої якості сканування є вкрай важливими.

Об'єкти (плоскі площинні марки), що потрапляють на хмару точок, можна представити простими геометричними примітивами (рис. 1) [9].

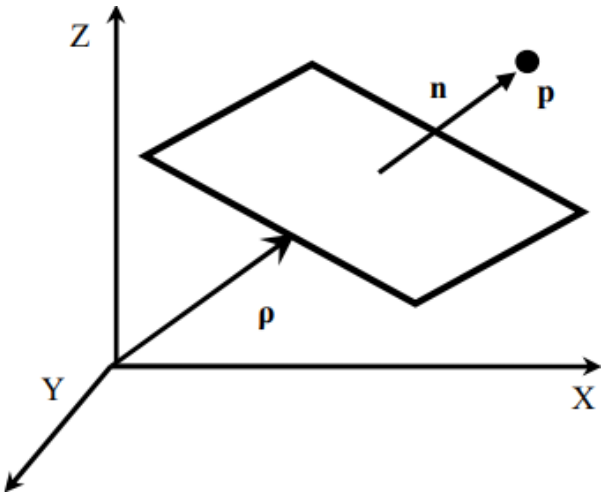


Рис. 1. Основні параметри плоскої марки [9]

 © Батракова А.Г., Гунько І.С., Дорожко Є.В., Саркісян Г.С., Урдзік С.М.

Параметрами плоскої площинної марки є вектор нормалі n, перпендикулярна відстань ρ до початку системи координат і додаткове обмеження на довжину вектора нормалі, що розраховується за формулою [9]:

$$|n| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = 1. \quad (1)$$

Відстань будь-якої точки p від площини визначається за формулою [7]:

$$d = v_p \cdot n - p. \quad (2)$$

Зазначений метод моделювання виправданий у випадках вимірювання інженерних споруд, коли потрібна точна геометрична модель об'єкта або комплексу.

Мета статті

Мета статті полягає у розробці технології поєднання результатів лазерного 3D-сканування з різних станцій з використанням плоских марок. Розглядаються оцінка технічних характеристик лазерного сканера Trimble TX6 [10], аналіз варіантів використання плоских площинних марок для забезпечення точності сканування, а також визначення переваг та недоліків цього методу.

Виклад основного матеріалу

Для проведення експерименту було обрано закрите спортивне приміщення з довжиною 25 м та шириною 15 м. Параметри приміщення обрано з міркувань забезпечення сканування з різних станцій з відомими відстанями.

На різних поверхнях приміщення були розташовані плоскі площинні марки, які виступали як референсні точки для сканування за допомогою сканера Trimble TX6 (рис. 2).



Рис. 2. Приклади розміщення плоских марок

Це дозволить визначити, як сканер реагує на різні кути відбиття лазерного променю, а також оцінити здатність розпізнавання плоских марок в умовах нерівностей поверхонь. У цьому експерименті були задіяні два типи плоских площинних марок з різними розмірами: перший – 10 × 10 см, другий – 15 × 15 см.

На рис. 3 наведено детальну схему розміщення всіх плоских марок, а також позначено місця розташування станцій, де знаходився сканер для проведення зйомок. Усього було використано дві такі станції.

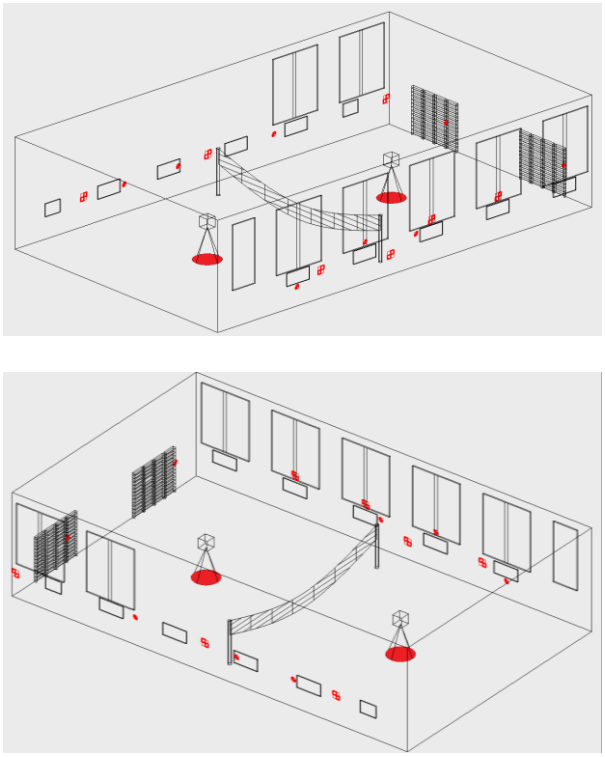


Рис. 3. Схема розташування плоских площинних марок

Сканування було проведено на третьому рівні точності відповідно до параметрів сканера Trimble TX6 тривалістю 20 хвилин на кожній із станцій (з цього часу 19 хвилин відводилося на сканування, а 1 хвилина – на створення панорамного знімка). При такій точності, на перших 30 м крок точок становив 5,7 мм. Зазначений рівень точності дозволяє отримати до 555 мільйонів точок з кожної станції, що являє значний обсяг інформації, необхідний для подальшого аналізу та обробки даних.

Обробка результатів сканування з двох станцій знімання була проведена за допомогою програмного забезпечення Trimble RealWorks. Ця програма призначена для обробки великих обсягів даних і відзначається високою простотою використання. Trimble RealWorks пропонує інтуїтивно зрозумілий та послідовний підхід до вирішення складних завдань управління та аналізу даних, що сприяє отриманню максимально точних результатів [11, 12]. Автоматичне виділення плоских площинних марок в даних сканування та їх подальша зшивка є однією з ключових функцій програми. Крім того, вона пропонує швидкий аналіз і редагування марок за допомогою інструмента Target Analyzer Tool. Цей інструмент дозволяє швидко виявляти та редагувати марки

на сканах, що сприяє полегшенню процесу обробки даних та збільшує ефективність роботи з програмою (рис. 4).

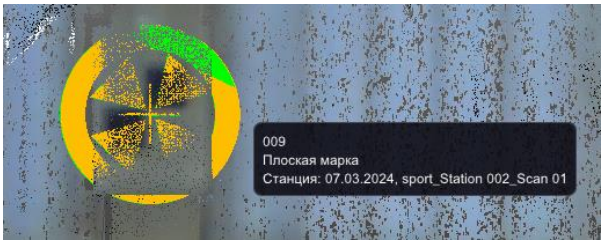


Рис. 4. Виявлена марка з автоматичним призначенням номера

У табл. 1 представлено консолідовані дані щодо прив'язки плоских марок, а на рис. 5 наведено схематичне зображення з відображенням автоматично призначених номерів плоским площинним маркам.

Таблиця 1

Дані зшивання хмари точок

№ сфери	Прив'язка (+ / –)	Кількість точок з 1 станції	Кількість точок з 2 станції
1	+	2489	11236
2	+	4920	8836
3	+	6972	6400
4	+	6320	7056
5	+	8625	4480
6	–	10716	–
7	–	10813	–
8	–	11214	–
9	–	–	10816
10	–	–	6724

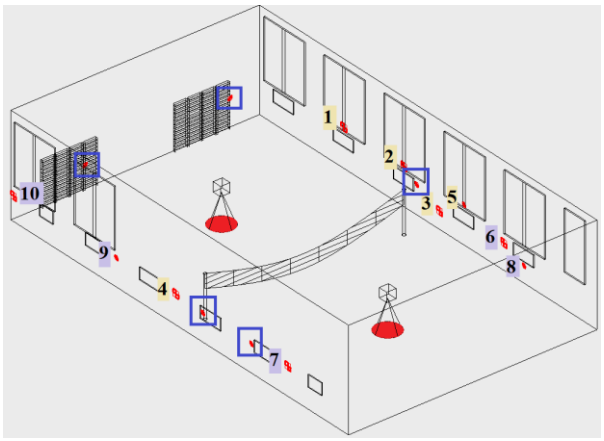


Рис. 5. Нумерація плоских марок

Аналізуючи табл. 1 та рис. 5, встановлено, що виконано прив'язку сканів з двох станцій шляхом розпізнавання 5-ти плоских марок з 10-ти. Марки з 6-го по 10-ий номер теж були розпізнані сканером, але тільки з одного боку. Ще 5 марок не були розпізнані взагалі. На стіні, де частково відшарувалась фарба, Trimble RealWorks розпізнав 2 неіснуючі марки (рис. 6), що свідчить про те, що наявний контраст схожого фону на об'єкті теж може враховуватись програмою. На етапі зшивки необхідно все детально перевіряти, інакше такі моменти можуть стати причиною неякісного зшивання хмари точок та отримання неправильної геометричної форми об'єкта.



Рис. 6. Неіснуючі плоскі марки

Проаналізувавши зшиту хмару точок, було зауважено, що плоским маркам з 6-го по 10-ий номер для повноцінного розпізнання з двох боків завадила перешкода у вигляді волейбольної сітки, зважаючи на саме розміщення марок на певному (занизькому) рівні висоти. Також необхідно зазначити, що кількість виявлених програмою плоских марок розміром 10 × 10 см становила лише 30 % від загальної кількості, що свідчить про перевагу використання плоских марок більшого розміру.

Загалом схема зшивання показана на рис. 7, а повноцінна хмара точок усього приміщення зображена на рис. 8.

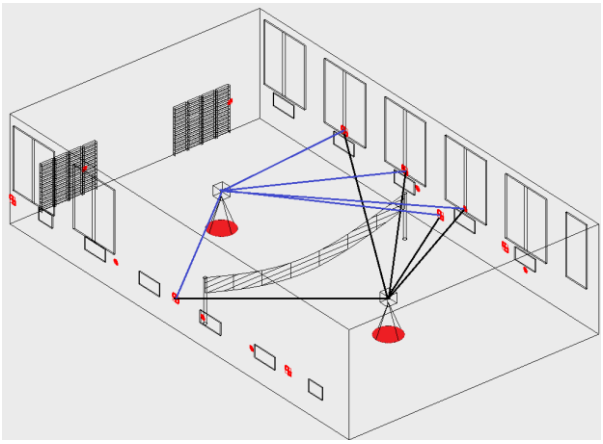


Рис. 7. Схема зшивання за марками

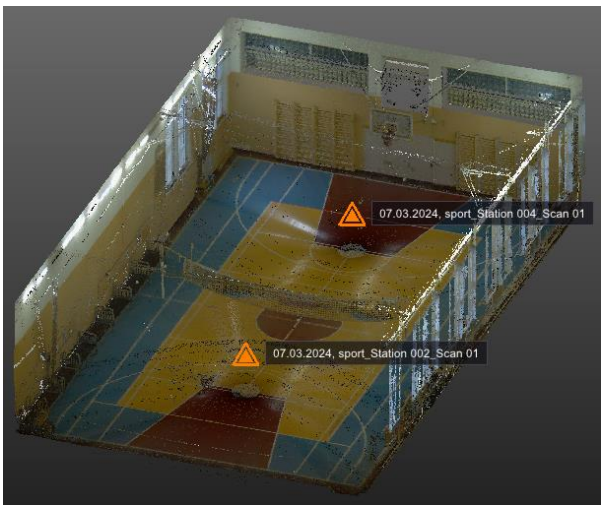


Рис. 8. Зшита хмара точок закритого приміщення

Висновки

Лазерне 3D-сканування об'єктів потребує уважного використання плоских марок для забезпечення максимального покриття поля зору та уникнення спотворень. Важливо враховувати геометричну рівність поверхонь, вплив кута падіння лазерного променю, можливість використання марок з різних станцій, а також необхідність прив'язки до зовнішньої системи координат. Ретельна підготовка та уважне планування забезпечать точні та надійні результати сканування.

Література

1. Сунак П. О., Синій С. В., Мельник Ю. А., Ксьоншкевич Л. М., Крантовська О. М., Орешкович Матіа. Реконструкція інженерних споруд та мереж, ландшафту на основі технології лазерного сканування. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 2022, Вип. 18. С. 147-161.

2. Staffenova, Katarina, Miroslav Rakyta, Vladimira Binasova. The possibility of using 3D laser scanning as support for reverse engineering. International Scientific Journal about Simulation. 2022. Vol. 8. P. 41-45.

3. Тревого І., Четверіков Б., Кілару В., Ванчура О. Інноваційні цифрові технології і нова техніка на «INTERGEO – 2018». Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Видавництво Львівської політехніки. 2019. Вип I (37). С. 11-15.

4. Сосса Богдан. Критерії вибору типу тестових об'єктів для проведення калібрування наземних лазерних сканерів. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2022. Вип. 95. С. 31-38.

5. Becerik-Gerber B., Jazizadeh, F., Kavulya, G., Calis, G. Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy. Automation in construction. 2011. Vol. 20 (5). P. 649-658.

6. Намінат О.С. Аналіз факторів, що впливають на точність результатів вимірювань наземного лазерного сканера. East European Scientific Journal. 2018. № 9 (37). С. 4-12.

7. Shusheng Bi, Chang Yuan, Chang Liu, Jun Cheng, Wei Wang, Yueri Cai. A survey of low-cost 3D laser scanning technology. Applied Sciences, 2021, 11 (9). P. 3938.

8. Hess Mona. 3D laser scanning. Digital techniques for documenting and preserving cultural heritage, 2017. P. 199-206.

9. Шульц Р. Розрахунок параметрів наземного лазерного сканування. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2010. Вип. I (19). С. 166-169.

10. Trimble TX6/TX8. 3D laser scanner: user manual. 2017. 116 с.

11. Trimble RealWorks: веб-сайт. URL: https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-realworks (дата звернення: 01.05.2024).

12. Куліковська О.Є., Атаманенко Ю.Ю. Перспективи використання програм обробки даних лазерного сканування в картографуванні ДТП. Інженерна геодезія. 2015. Вип. 62. С. 91-97.

References

1. Sunak, P. O., Synii, S. V., Melnyk, Y. A., Ksionshkevich, L. M., Krantovska, O. M., & Oreshkovich, M. (2022). Reconstruction of engineering structures and networks, landscape based on laser scanning technology. *Modern technologies and calculation methods in construction*, (18), 147-161 [in Ukrainian]

2. Staffenova, K., Rakyta, M., & Binasova, V. (2022). The possibility of using 3D laser scanning as support for reverse engineering. *International Scientific Journal about Simulation* (8), 41-45.

3. Trevogo, I., Chetverikov, B., Kilaru, V., & Vanchura, O. (2019). Innovative digital technologies and new techniques at «INTERGEO–2018». *Modern achievements of geodetic science and production* , (1), 11-15 [in Ukrainian]

4. Sossa Bohdan. (2022). Criteria for selecting the type of test objects for calibration of ground laser scanners. *Geodesy, cartography and aerial photography*, (95), 31-38 [in Ukrainian]

5. Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Kavulya, G., & Calis, G. (2011). Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy. Automation in construction, 20 (5), 649-658.

6. Naminat, O. S. (2018). Analysis of factors affecting the accuracy of the ground laser scanner measurement results. *East European Scientific Journal*, 9 (37), 4-12 [in Ukrainian]

7. Bi, S., Yuan, C., Liu, C., Cheng, J., Wang, W., & Cai, Y. (2021). A survey of low-cost 3D laser scanning technology. *Applied Sciences*, *11* (9), 3938.

8. Hess Mona. 3D laser scanning. *Digital techniques for documenting and preserving cultural heritage*, 2017, 199-206.

9. Schultz, R. (2010). Calculation of ground laser scanning parameters. *Modern achievements of geodetic science and production*, 1(19), 166-169 [in Ukrainian]

10. Trimble TX6/TX8. (2017). 3D laser scanner: user manual.

11. Trimble RealWorks. (n.d.). Retrieved from https://geospatial.trimble.com/en/products/software/ trimble-realworks [in Ukrainian]

12. Kulikovska, O. Ye., & Atamanenko, Yu. Yu. (2015). Prospects for the use of laser scanning data processing programs in road accident mapping. *Engineering geodesy*, 62, 91-97 [in Ukrainian]

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.О. Бугаєвський, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна.

Автор: БАТРАКОВА Анжеліка Геннадіївна
доктор технічних наук, професор кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – agbatr@ukr.net
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4067-4371

Автор: ГУНЬКО Ірина Сергіївна
асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – irinagunko98@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2562-2175

Автор: САРКІСЯН Гор Саркісович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – gorsar14@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2343-4461

Автор: ДОРОЖКО Євген Вікторович
кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – evgeniy.dorozhko@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2894-2131

Автор: УРДЗІК Сергій Миколайович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – urdzik@khadi.kharkov.ua
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6914-1221

TECHNOLOGY FOR COMBINING THE RESULTS OF 3D LASER SCANNING FROM DIFFERENT STATIONS USING PLANE MARKS

A. Batrakova, I. Hunko, Ye. Dorozhko, H. Sarkisian, S. Urdzik
Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

3D laser scanning is a promising technology gaining popularity and active use worldwide. One of the advantages of 3D laser scanning is the speed of the scanning process and processing of the results. Compared to other geodetic instruments, this technology allows for displaying large objects in a much shorter time and more efficiently. For example, at the construction stage of an industrial plant, scanning enables monitoring the shapes and sizes of all its elements in real time, which is critical for controlling and optimising construction processes.

Another important aspect is the geometric complexity of objects. Many objects can have complex shapes or similar elements of considerable length. When combining scanning results from different stations, it is necessary to ensure the accuracy and correct geometry of the object. To combine scan results, designated markers in the form of spheres and plane marks are used. However, unlike spheres, plane markers can be more convenient and economical. In addition, they can be left on the object for a long time, which significantly simplifies the additional scanning or data correction. It is also notable that in our time, the development of laser scanning technologies has led to new scanners that can automatically stitch together scan results by using advanced technology to track characteristic points in the environment. Despite the significant advantages of this new technology in terms of efficiency and accuracy, it is worth noting that it is rather expensive. Accordingly, scanners that do not have this advanced technology rely on alternative methods of stitching together scan results, such as placing plane marks on the object.

The article aims to develop a technology for combining the results of 3D laser scanning from different stations using plane marks. The article considers the evaluation of the technical characteristics of the Trimble TX6 laser scanner, the analysis of options for using plane marks to ensure scanning accuracy, and the identification of the advantages and disadvantages of this method.

Keywords: *3D laser scanning, plane marks, stitching algorithm, point cloud, Trimble RealWorks.*