

КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ТИПУ ТЕСТОВИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ КАЛІБРУВАННЯ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ

Калібрування наземних лазерних сканерів дає змогу підвищити точність отриманих даних із метою дотримання нормативних вимог до проведення інженерно-геодезичних робіт. Для калібрування використовують два типи тестових об'єктів: точкові та площинні. Метою цієї роботи є оцінка, узагальнення та класифікація критеріїв вибору типу та підтипу тестових об'єктів для проведення калібрування (ТОК) наземних лазерних сканерів. Калібрувальний полігон влаштовують із урахуванням мінімізації можливих похибок, можливості захоплення максимального поля зору і діапазону відстаней тощо. Тому розглянуто критерії вибору, систематизовано їх та на основі виконаного аналізу, розроблено рекомендації щодо вибору типу ТОК для практичного використання. Визначено основні критерії, що впливають на метричну якість даних калібрування. Критерій наявності площинних елементів або можливості встановлення точкових прийнято як другорядний, що розглядається після оцінювання всіх інших критеріїв і визначення необхідних умов. Основними критеріями визначено незалежність від геометричної рівності поверхонь; незалежність від кута падіння лазерного променя; влаштування перекриття сканів; можливість калібрування як кутомірного, так і віддалемірного блока сканера; можливість прив'язки до зовнішньої системи координат. Розглянуто усі зазначені критерії та проаналізовано їх вплив на результати калібрування. Для коректнішої оцінки критеріїв рекомендовано використовувати *t*-критерій Стюдента для визначення складових систематичної похибки, що найбільше впливають на дані калібрування. Визначено перспективний напрям досліджень – точне обчислення координат центроїда сферичного площинного ТОК, що дасть змогу повною мірою скористатися перевагами як точкового, так і площинного об'єкта калібрування. Наукова новизна проведеного дослідження полягає у систематизації критеріїв вибору тестових об'єктів калібрування наземних лазерних сканерів та попередній оцінці їх впливу на результати калібрування. Отримані результати дають змогу попередньо врахувати вихідні дані та наявні умови під час оцінювання критеріїв вибору типу ТОК для калібрування з метою оптимізації процесу калібрування і подальшого покращення метричної якості отриманих даних.

Ключові слова: наземне лазерне сканування; калібрування; тестові об'єкти калібрування (ТОК); точкові ТОК; площинні ТОК; плоскі ТОК; сферичні ТОК; циліндричні ТОК; вибір ТОК для калібрування.

Вступ

Особливістю інженерно-геодезичних робіт із супроводження будівництва є підвищені вимоги до їх точності. Наявні технології дають змогу забезпечити цю точність різними способами, одним із яких є наземне лазерне сканування (НЛС). Проте, попри численні переваги НЛС, точність здебільшого не задовольняє нормативні вимоги. Отже, постає завдання підвищення точності даних, отриманих способом наземного лазерного сканування. Сьогодні таким методом підвищення точності вважається калібрування. Питання калібрування наземних лазерних сканерів за кордоном досліджують в університетах Калгарі (Канада), Штутгарта, Ганновера (Німеччина), Стокгольма (Швеція), Цюріха (Швейцарія),

Сіднея (Австралія), а в Україні – в Київському національному університеті будівництва і архітектури і Національному університеті “Львівська політехніка”.

Для здійснення калібрування влаштовують калібрувальний полігон із тестовими об'єктами калібрування (ТОК). Існує два типи ТОК – точкові та площинні. Вони описуються різними математичними і геометричними моделями і тому їх використовують окремо один від одного.

Дослідження калібрування за точковими тестовими об'єктами розпочалися на початку 2000-х років [Lichti et al., 2000] й активно здійснювалися протягом десятиліття [Reshetyuk, 2009]. У роботі [Rietdorf et al., 2004] досліджено

можливість використання площин для калібрування, що пізніше розвинено в роботах інших дослідників [напр. Lichti & Licht, 2006; Lichti, 2007; Bae & Lichti, 2007]. Уже на початку 2010-х років почалися дослідження використання циліндричних поверхонь для калібрування [Chan & Lichti, 2012] а також продовжувалися дослідження з порівняння даних калібрування, отриманих за різними типами об'єктів [напр. Chow et al., 2013].

Сьогодні вчені, зазвичай, досліджують якийсь один тип або підтип тестових об'єктів. Автори низки робіт, наприклад [Chow et al., 2011], порівнюють характеристики точності та кореляції параметрів двох типів або [Cossa, 2018] обґрунтовують мінімальні розміри площинних ТОК чи [Шульц, 2012] необхідну точність еталонного приладу для вимірювання координат точкових ТОК. Однак все ще відсутні критерії вибору типу ТОК для проведення калібрування НЛС залежно від конкретних умов та очікуваного результату.

Мета

Мета роботи – оцінювання, узагальнення та класифікація критеріїв вибору типу тестових об'єктів для здійснення калібрування наземних лазерних сканерів.

Методика дослідження.

Вибір типу ТОК не залежить від типу використовуваного полігона, а від можливості/наявності влаштування ТОК різних типів, мінімізації можливих похибок, можливості захоплення максимального поля зору і діапазону відстаней тощо.

Ми розробили модель попереднього оцінювання впливу складових систематичної похибки відповідно до універсальної моделі похибок інструмента і розглянули вплив зазначених складових на отримані координати, здійснивши апріорне симуляційне моделювання отриманих результатів із внесеною систематичною похибкою (дані до калібрування) та за її відсутності (дані після калібрування). Ця модель дає змогу оцінити як вплив окремих складових, так і їх сумарний вплив на точність отриманих координат для подальшого аналізу критеріїв вибору типу

ТОК та точності виконаного калібрування. Отже, необхідно розглянути критерії вибору, систематизувати їх та на основі виконаного аналізу розробити рекомендації щодо вибору типу ТОК для практичного використання.

Результати дослідження

Принципова відмінність між точковими і площинними ТОК полягає у тому, що, використовуючи точкові ТОК, визначають координати центра марки, а у разі використання площинних – точки, що визначають площину (плоску, сферичну або циліндричну). Крім того, під час калібрування за допомогою точкових ТОК необхідно додатково визначити координати марок еталонним приладом із точністю, не менш ніж втричі вищою, ніж нормативна точність НЛС, що калібрується [Шульц, 2012]. Як площинні тестові об'єкти використовують наявні або спеціально підготовані площини: конструктивні елементи в приміщенні або на вулиці, спеціальні сферичні марки тощо.

Як зазначено вище, математичні моделі тестових об'єктів для калібрування відрізняються.

Положення точкових марок згідно з [Chow et al., 2011; Lichti, 2007] визначають у полярних координатах:

$$\begin{aligned} \rho_{ij} &= \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho, \\ \varphi_{ij} &= \arctan \frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} + \Delta\varphi, \\ \alpha_{ij} &= \arctan \frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} + \Delta\alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

де ρ_{ij} , φ_{ij} , α_{ij} – відстань, горизонтальний кут та вертикальний кут, відповідно, точки i в системі координат сканера j ; x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} – прямокутні координати точки i в системі координат сканера j ; $\Delta\rho$, $\Delta\varphi$, $\Delta\alpha$ – додаткові систематичні поправки у, відповідно, відстань, горизонтальний і вертикальний кут.

У разі використання площинних ТОК усі виміряні точки повинні відповідати умовному рівнянню належності точки площині [Chow et al., 2011; Lichti, 2007]. Використовуючи комбіноване перетворення Гауса – Гельмерта, параметри

площини, зовнішнього орієнтування та калібрування підставляють у рівняння найменших квадратів:

$$n_k^T (M_j^T p_{ij} + P_{cj}) - d_k = 0, \quad (2)$$

де n_k – вектор нормалі до площини k ; M_j – матриця повороту, що визначає обертання сканера j як функцію від кутів Ейлера; p_{ij} – результуючий вектор $x_{ij}y_{ij}z_{ij}$; P_{cj} визначає тривимірне положення сканера j ; d_k – нормальна відстань від початку координат (перетину осей сканера) до площини k .

Ця модель широко використовується у фотogramметрії та докладно описана в [Förstner, 2004].

Одним із недоліків використання площин як ТОК – це можлива відсутність геометрично правильних поверхонь. Наприклад, поверхні в приміщенні (стіни, підлога, стеля) доволі часто мають “вкраплення” у вигляді вентиляційних отворів, пристроїв освітлення тощо. Крім того, неякісні будівельні та монтажні роботи можуть призвести до того, що поверхня буде нерівною, що унеможливить здійснення калібрування за ними. Аналогічно, поверхні не в приміщенні, які використовують для калібрування, перебувають під впливом зовнішніх умов та зазнають температурних та інших деформацій. У цьому випадку можна розглянути альтернативні форми поверхонь, такі як циліндричні.

Крім того, що циліндричні поверхні також доволі поширені – труби, пілони (в приміщенні), стовпи, опори, знаки (на відкритому повітрі), їхні переваги в тому, що їх, зазвичай, виготовляють фабричним способом, витримуючи геометричну точність циліндричної поверхні доволі точно.

Принцип калібрування за циліндричними марками такий самий, як за плоскими, відрізняється тільки геометрична модель площини. Це дає змогу застосувати метод найменших квадратів для одночасного оцінювання елементів зовнішнього орієнтування, параметрів моделі циліндра та додаткових параметрів системи. Спочатку хмара точок із НЛС трансформується у систему координат об’єкта за допомогою строгого перетворення. Потім координати в цій системі перевіряють на максимальну відповідність координатам циліндричної поверхні методом найменших квадратів.

Наведений вираз дає змогу перетворити координати із системи координат сканера $(X \ Y \ Z)^T$ у систему координат об’єкта $(x \ y \ z)^T$:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} R_3(\kappa_k) \\ R_2(\varphi_k) \\ R_1(\omega_k) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} X_{sk} \\ Y_{sk} \\ Z_{sk} \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

де $\omega_k, \varphi_k, \kappa_k, X_{sk}, Y_{sk}$ та Z_{sk} – елементи зовнішнього орієнтування розташування сканера k .

Для площинних марок, незалежно від того, як вони орієнтовані у просторі, потрібна одна геометрична модель, тоді як для вертикальних і горизонтальних циліндричних об’єктів – три геометричні моделі, що позначають як f_V, f_{Hx} і f_{Hy} [Chan & Lichti, 2012]. Залежно від орієнтації наявних циліндричних поверхонь на полігоні, можна виконувати зрівнювання за однією, двома або трьома моделями одночасно.

Складові систематичної похибки описують [Bae, & Lichti, 2007; Chan, & Lichti, 2012; Chow, et al., 2011; Chow, et al., 2013; Lichti, & Licht, 2006; Lichti, 2007], спираючись на універсальну модель похибок інструмента.

Складову за виміряну відстань визначають залежно від умов або як константу:

$$\Delta\rho = a_0, \quad (4.1)$$

або з урахуванням константи та масштабного коефіцієнта:

$$\Delta\rho = a_0 + s_{\rho} \rho_{вим}. \quad (4.2)$$

Складова за помилку індексу вертикального круга, аналогічно до місця нуля, визначається константою:

$$\Delta\alpha = c_0. \quad (5)$$

Складова за нахил горизонтальної осі обертання дзеркала, аналогічно до нахилу горизонтальної осі обертання зорової труби, визначається через тангенс вертикального кута:

$$\Delta\varphi = b_2 \tan(\alpha). \quad (6)$$

Складова за колімацію визначається через секанс вертикального кута:

$$\Delta\varphi = b_1 \sec\alpha. \quad (7)$$

Можна узагальнити наведені вище вирази за підтипами калібрування: (4.1), (4.2) використовуються для калібрування віддалемірного блока сканера, а (5), (6), (7) – для калібрування кутомірного блока сканера.

Розглянемо критерії вибору тих чи інших ТОК для здійснення калібрування.

1. Наявність площинних елементів або можливості для їх встановлення, щоб забезпечити

перекриття максимально можливого діапазону поля зору сканера. Можливість встановлення точкових марок для забезпечення перекриття максимально можливого діапазону поля зору сканера.

2. Залежність/незалежність від геометричної рівності поверхонь.

3. Вплив кута падіння лазерного променя на результати визначення координат точок.

4. Можливість/неможливість сканування з іншої станції (влаштування перекриття сканів).

5. Можливість/неможливість калібрування як кутомірного, так і віддалемірного блока сканера.

6. Можливість/неможливість прив'язки до зовнішньої системи координат.

У цьому переліку відсутній критерій оцінювання точності калібрування. Ще у [Lichti, 2006; Lichti & Licht, 2010] висловлено припущення, що у результаті калібрування за точковими і площинними мішенями отримують схожі результати. Дані подальших досліджень це підтверджують. Порівнявши результати використання точкових і площинних марок під час моделювання та проведення реальних знімачь [Chow et. al, 2011], бачимо, що, незважаючи на різні математичні моделі, дані приблизно однакові. Всі істотні складові похибки показують однакові тренди у разі калібрування із використанням як точкових, так і площинних марок, причому це стосується і панорамних, і гібридних сканерів. Винятком є складова похибки за колімацію у гібридних сканерах, яка відрізняється від загальних тенденцій у разі використання площинних марок [Chow et. al, 2011]. Насправді відтворення колімаційної похибки в гібридних сканерах – давно відома проблема, поки що не вирішена. Проте у площинних марок є одна перевага – за їх допомогою нескладно виконати калібрування у разі низької щільності точок скану, на відміну від точкових марок. Хоча, враховуючи швидкість набору даних сучасними НЛС (в середньому 500 000 точок за секунду), ця перевага не видається переконливою. Отже, цей критерій в цій роботі не розглядатимемо.

Для аналізу першого критерію, насамперед, треба урахувати умови і можливості для влаштування калібрувального полігона. Полігон може бути камеральним або польовим. Переваги

камерального полігона – можливість підтримання стабільних температури, вологості та тиску для мінімізації впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань, а також можливість розташування тестових об'єктів по всьому полю зору сканера, який у більшості сучасних моделей становить 360° по горизонталі й до 330° по вертикалі. Приклади класичних камеральних полігонів наведено на рис. 1–2.

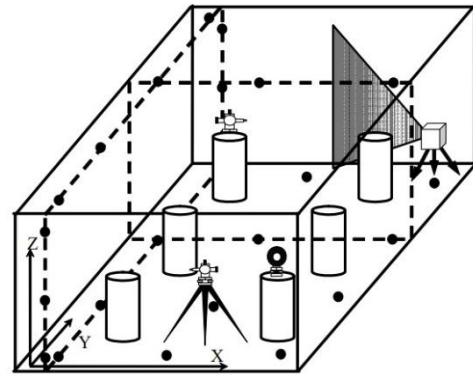


Рис. 1. Камеральний полігон із точковими TOK [Reshetyuk, 2009]

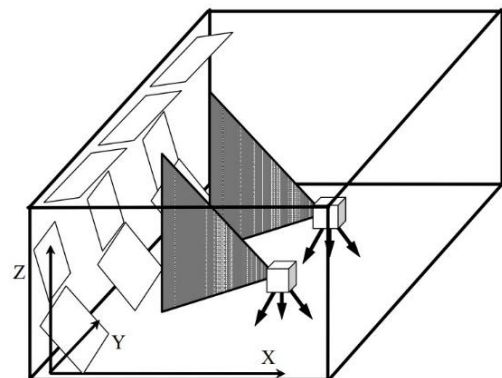


Рис. 2. Камеральний полігон із площинними TOK [Bae & Lichti, 2007]

Проте недоліком камеральних полігонів є обмеженість приміщень і, відповідно, неможливість здійснення калібрування на всіх діапазонах відстаней, що становлять у сучасних моделях 200–400 м. Крім того, є моделі з можливістю вимірювання відстаней до 4000–6000 м, що однозначно свідчить про неможливість їх калібрування у приміщенні. Отже, виникає необхідність влаштування польового полігона. Принципи його влаштування аналогічні, за винятком очевидних обмежень щодо розташування TOK для сканування на великих кутах нахилу. Зразок

такого полігона наведено на рис. 3. Цифрами позначено відстані в метрах.

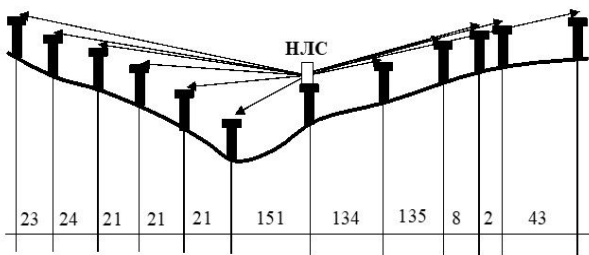


Рис. 3. Польовий полігон великої протяжності [Lichti et al., 2000]

Як видно з рис. 3, на такому полігоні можна використовувати як точкові, так і площинні ТОК. Необхідно також зауважити, що в стандартних умовах міської забудови існує доволі велика кількість геометрично рівних площин. Тому, вдало вибравши станцію (підвищене місце, наявність багатоповерхової забудови тощо), можна виконати калібрування на достатньо довгих відстанях і за достатньо великих кутів нахилу. Необхідною умовою є сталість погодних умов упродовж усього здійснення вимірювань і відсутність вітру.

На думку автора, цей критерій є другорядним і залежить від бажаного результату калібрування. Тому планувати влаштування калібрального полігона потрібно після оцінювання всіх інших критеріїв і визначення необхідних умов.

Аналізуючи критерій 2, потрібно зазначити, що залежність від рівності поверхні справедлива тільки для площинних тестових об'єктів. Наприклад, пофарбований металевий стовп вже не можна використовувати для калібрування як циліндричний ТОК через нерівномірність нанесення фарби. Це ж стосується інших площинних об'єктів, як плоских, так і сферичних. Дослідження італійських вчених [Alba et al., 2008] виявили збільшення похибки визначення площини (т. зв. шум) із відстанню навіть для фабрично виготовлених площинних ТОК.

На рис. 4 подано зразок сферичної марки діаметром 200 мм, що використовується для зшивання сканів, але може бути використана також під час калібрування.

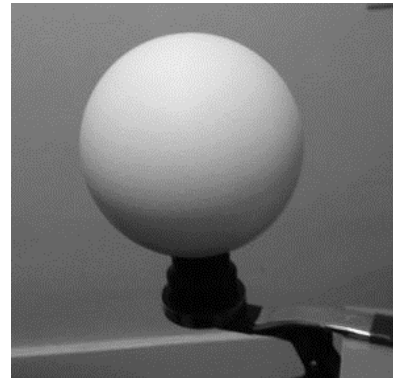


Рис. 4. Зразок сферичної площинної марки

За класичного підходу до калібрування критерій 3 стосується точкових об'єктів. Незважаючи на назву, такі об'єкти схожі на плоскі площинні, за однією відмінністю: завдяки чергуванню областей із різним альбедо (рис. 5) можна визначити центр такої марки з високою точністю.

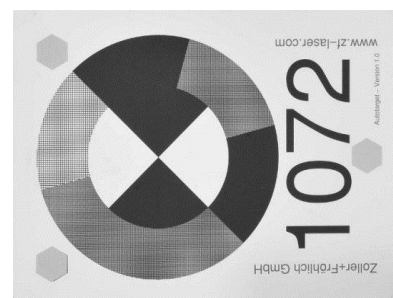


Рис. 5. Зразок точкової марки

Крім того, у більшості сучасних моделей наявна функція автоматичного визначення координат центра такої марки, яке значно точніше за ручне визначення координат із хмари точок [Cossa, 2015]. Проте у разі повторного сканування з іншої станції кут падіння лазера може істотно змінитися, утворивши так званий нахил ТОК. Дані досліджень [Miri & Varshosaz, 2011] плоских точкових марок показують, що точність визначення координат за допомогою НЛС залежить не тільки від відстані до точки, але й від кута нахилу ТОК.

Отже, з цього випливає, що точність визначення координат точок на площині знижуватиметься зі збільшенням кута нахилу. Як видно з рис. 2, плоскі площини можна розмістити так, щоб мінімізувати вплив нахилу. Проте, використовуючи площини з кривизною, також доведеться зіткнутися із проблемою нахилу, адже

навіть на сферичній поверхні наявна лише одна точка, нормальна до поля зору.

Четвертий, п'ятий і шостий критерії можна умовно об'єднати, оскільки вони стосуються калібрування віддалемірного блока. Таке калібрування можна виконати, використовуючи площинні ТОК, у яких можна розрахувати координату центроїда, за допомогою повторного сканування з іншої станції. З цього випливає, що для плоских площинних ТОК влаштування перекриття не є обов'язковою умовою.

Також зазначимо, що у разі калібрування на невеликих відстанях, що стосується, передусім, камеральних полігонів, оцінити або виконати калібрування віддалемірного блока можна лише наближено [Шульц, 2011]. Отже, для аналізу цієї групи критеріїв необхідно визначити ступінь впливу похибки віддалемірного блока на результати отриманих даних. Це вчергове приводить до класичної проблеми влаштування калібрувальних полігонів: можливості розташування тестових об'єктів на всьому діапазоні вимірювання відстаней і кутів. Для часткового вирішення цієї проблеми запропоновано обмежити відстань виконання робіт максимальною відстанню, на якій здійснювалося калібрування. Додатково виникає питання щільності ТОК, а саме кутового розміру зон, на які розподіляється поле зору сканера. Адже сам принцип системного калібрування, за якого сканер розглядають як "чорну скриньку" [Шульц & Сосса, 2015], передбачає, що точні параметри калібрування визначаються лише для ТОК, а між ними – лише

наближено, наприклад, за допомогою інтерполяції. У разі дуже складного розподілу похибок, який може виникнути в системах НЛС, для обчислення параметрів перетворення координат усіх сканів та моделювання похибок бажано застосовувати автоматизований розрахунок, наприклад, із використанням нейронних мереж [Шульц, 2012]. Автор пропонує основним критерієм визначити умову, за якою після внесення поправок у виміряні величини для опорних точок точність визначення їх координат достатня для виконання необхідних геодезичних робіт, а також у випадку, коли апроксимація для конкретної ділянки поля зору сканера дає змогу досягти вказаної точності для проміжних точок. У цьому випадку результати калібрування вважають прийнятними.

Також варто відзначити, що завдяки прив'язці до зовнішньої системи координат та наявності достатньо великих відстаней з'являється можливість обчислити масштабний коефіцієнт, що підвищить точність калібрування віддалемірного блока. Цей критерій стосується тільки точкових ТОК.

Окреме питання – точне визначення координат центроїдів сферичних площинних ТОК. Ще в роботі [Schultz, 2007] поставлено питання такого визначення, проте його досі помітно не розвинено. На думку автора, вирішення зазначеного питання дасть змогу сповна використати всі переваги калібрування як за точковими, так і за площинними ТОК.

Підсумовуючи викладене, критерії вибору типу ТОК зведемо у таблицю.

Відповідність типів і підтипів ТОК критеріям їх вибору

Критерій/тип ТОК	точкові	площинні		
		плоскі	сферичні	циліндричні
Незалежність від геометричної рівності поверхонь	+	–	–	–
Незалежність від кута падіння лазера	–	+	–	–
Відсутність необхідності повторного сканування (перекриття)	–	+/-	–	–
Можливість калібрування віддалемірного блока	+	–	+	+
Можливість прив'язки до зовнішньої системи координат	+	–	–	–

Користуючись основними критеріями, не можна однозначно віддати перевагу якомусь одному типу. Тому, як зазначено вище, на підставі аналізу критеріїв, наведених у таблиці, потрібно визначити необхідні умови, а вже на основі відповідності критеріїв цим умовам здійснювати проектування та влаштування

калібрувального полігона. Для цього доцільно використовувати [Abbas et al., 2014] *t*-критерій Стьюдента для оцінювання впливу складових систематичної похибки, які обчислюють для визначення додаткових систематичних поправок у відстань, горизонтальний і вертикальний кути.

Наукова новизна та практичне значення

Наукова новизна висвітленого дослідження полягає у систематизації критеріїв вибору тестових об'єктів калібрування наземних лазерних сканерів та попередній оцінці їх впливу на результати калібрування. Завдяки розробленій моделі оцінювання впливу як складових систематичної похибки, так і їх сумарного впливу можна виконати аналіз за t -критерієм Стьюдента окремих складових і оцінити точність калібрування.

Отримані результати дають змогу попередньо врахувати вихідні дані та наявні умови під час оцінювання критеріїв вибору типу ТОК для калібрування із метою оптимізації процесу калібрування і покращення надалі метричної якості отриманих даних. Запропонована систематизація критеріїв дає змогу уникнути невизначеності та зменшує ризик здійснення невдалих спроб під час проєктування та влаштування полігонів для калібрування наземних лазерних сканерів.

Висновки

Узагальнено та систематизовано основні критерії вибору типу ТОК під час здійснення системного калібрування наземних лазерних сканерів. Досліджено вплив зазначених критеріїв на виконання безпосередніх вимірювань та на якість кінцевого результату. Визначено, що проєктування калібрувального полігона необхідно здійснювати після всебічного оцінювання критеріїв. Крім того, рекомендовано попередньо проаналізувати складові систематичної похибки, що найбільше впливають на точність отриманих даних. Встановлено, що перспективним напрямом досліджень є комбінація двох типів ТОК з можливістю точного визначення координат центроїда площинного (сферичного) об'єкта та коректне визначення складових систематичної похибки сканування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Сосса Б. Р. Визначення оптимального типу і розміру площинних марок, що застосовуються під час калібрування наземних лазерних сканерів. *Інженерна геодезія: наук.-техн. зб.* Київ, 2018. Вип. 65. С. 227–238. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/2155>
- Сосса Б. Р. Порівняльне оцінювання точності координат точкових марок, отриманих способом наземного лазерного сканування. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету.* Чернігів, 2015. Вип. 2(78). С. 165–171.
- Шульц Р. В. Аналіз методів та моделей калібрування наземних лазерних сканерів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.* Львів, 2011. Вип. 2. С. 128–133. <https://vlp.com.ua/node/7735>
- Шульц Р. В. Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.24.01. Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2012. 32 с.
- Шульц Р. В., Сосса Б. Р. Системне калібрування наземних лазерних сканерів: моделі та методики. *Вісник геодезії та картографії.* Київ, 2015. Вип.2. С. 25–30.
- Abbas, M. A., Setan, H., Majid, Z., K. Chong, A., Chong Luh, L., M. Idris, K., & Mohd Ariff, M. F. (2014). Investigation of Systematic Errors for the Hybrid and Panoramic Scanners. *Jurnal Teknologi*, 71(4). <https://doi.org/10.11113/jt.v71.3827>
- Alba, M., Roncoroni, F., Scaioni, M. (2008). Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Beijing, Vol. XXXVII. Part B5, 1053–1059.
- Bae, K., Lichti, D. On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Espoo, Finland, 2007. No. 36 (Part 3/W52), 14–19. https://foto.aalto.fi/ls2007/final_papers/Bae_2007.pdf
- Chan, T., Lichti, D. Cylinder-based self-calibration of a panoramic terrestrial laser scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Melbourne (Australia), 2012. Vol. XXXIX-B5, 169–174. https://www.researchgate.net/profile/Ting-Chan-6/publication/282158208_Cylinder-based_self-calibration_of_a_panoramic_terrestrial_laser_scanner/inks/5605ceef08ae5e8e3f332ab7/Cylinder-based-self-calibration-of-a-panoramic-terrestrial-laser-scanner.pdf
- Chow, J. C. K., Lichti, D. D., Glennie, C., Hartzell, P. (2013). Improvement to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods. *Sensors*, 6, 7224–7249. <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/6/7224>.
- Chow, J., Lichti, D. D., Glennie, C. (2011). Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Calgary (Canada), Vol. XXXVIII-5/W12, 121–126. https://scholar.google.ca/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=ZQvSJPYAAAAJ&citation_for_view=ZQvSJPYAAAAJ:qjMakFHdy7sC
- Förstner, W., B. Wrobel, McGlone, J. C., Mikhail, E. M. J. Bethel, R. Mullen (2004). "Mathematical concepts in photogrammetry." In: *Manual of Photogrammetry*,

- 5th ed. Bethesda, MD, USA: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1151 p.
- Lichti, D. D., Stewart, M. P., Tsakiri, M., Snow, A. J. (2000). Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system. School of Spatial Sciences Curtin University of Technology, 23 p.
- Lichti, D. D. (2010). Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam, Vol. 65, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.09.002>.
- Lichti, D. D., Licht, M. G. (2006). Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Newcastle upon Tyne (UK), Vol. 36 (Part 5), 155–160. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.222.4332&rep=rep1&type=pdf>
- Lichti, D. (2007). Modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam, Vol. 61(5), 307–324. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004>
- Miri, M., Varshosaz, M. (2011). Evaluating parameters affecting the georeferencing accuracy of terrestrial laser scanners. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Trento (Italy), Vol. XXXVIII-5/W16, 387–390. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-387-2011
- Reitdorf, A., Gielsdorf, F., Gruendig, L. (2004). A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, Bratislava, November 11–13, Slovakia, TS2 – Terrestrial laser scanning. Bratislava, 11 p. https://m.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/athens/papers/pdf/ts_26_2_gielsdorf_et_al_ppt.pdf
- Reshetyuk, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning: Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy. Stockholm, 174 p. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A139761&dswid=9099>
- Schulz, T. (2007). Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences/ETH Zurich. Zurich, 172 p. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005368245>.

Bohdan SOSSA

Department of Engineering Geodesy, Kyiv National University of Construction and Architecture, 5, Osvity Str., Kyiv, 03037, Ukraine, e-mail: bohdan.sossa@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0003-4484-4865>.

CRITERIA FOR CHOOSING TEST OBJECTS TYPE FOR TERRESTRIAL LASER SCANNERS CALIBRATION

Calibration of terrestrial laser scanners allows increasing the accuracy of the obtained data in order to comply with regulatory requirements for engineering geodesy works. Two types of test objects (TCO) are used for calibration: point-based and plane-based. The aim of this work is to evaluate, summarize and classify the criteria for selecting the type and subtype of test objects for terrestrial laser scanners calibration. The arrangement of the calibration polygon is performed by taking into account the minimization of possible errors, the ability to capture the maximum field of view and range of distances, and so on. Therefore, the selection criteria are considered, systematized, and recommendations for choosing the type of TCO for practical use are developed based on its analysis. The main criteria influencing the metric quality of calibration data are determined. The criterion of the presence of planar elements or the possibility of installing point elements is set as secondary, which is considered after evaluating all other criteria and determining the necessary conditions. The main criteria are independence from the geometric quality of surfaces; independence on the laser beam angle of incidence; arrangement of overlapping scans; the ability to calibrate both the angular and rangefinder scanner unit; the ability to link to an external coordinate system. All these criteria are considered and their impact on the calibration results are analyzed. For a more accurate assessment of the criteria, it is recommended to use Student's t-test to determine the components of systematic error that most affect the calibration data. A promising area of research has been identified – the exact spherical planar TCO centroid's coordinates determination, which will allow one to take full advantage of both point-based and planar-based calibration objects. The scientific novelty of the study is to systematize the criteria for selecting test objects for calibration of terrestrial laser scanners and preliminary assessment of their impact on the calibration results. The obtained results allow taking into account the initial data and the existing conditions when evaluating the criteria for selecting the type of TCO for calibration in order to optimize the calibration process and further obtained data metric quality improvement.

Key words: terrestrial laser scanning; calibration; test calibration objects (TCO); point-based TCO; plane-based TCO; planar TCO; spherical TCO; cylindrical TCO; TCO type choosing.

Надійшла 12.04.2022 р.