

УДК 528.7

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ КАЛІБРУВАННЯ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ

Р. Шульц

Київський національний університет будівництва і архітектури

Ключові слова: наземне лазерне сканування, калібрування, джерело похибок, калібрувальний полігон.

Постановка проблеми

Сьогодні системи наземного лазерного сканування відіграють важливу роль серед сучасного геодезичного устаткування. Сфера застосування лазерного сканування постійно розширюється. Розв'язуючи за допомогою сканування задачі інженерної геодезії, важливо досягти максимально високого рівня точності. В такій ситуації виникає необхідність розроблення адекватної методики калібрування наземних лазерних сканерів. Виробники сучасних сканерів переважно не вказують точності визначення координат лазерним сканером. До найпоширеніших характеристик, що наводяться в паспорті приладу, належать точність вимірювання відстаней та точність визначення координат точок для певної відстані. На жаль, більшість досліджень, пов'язаних з точністю лазерного сканування, підтверджують, що точність, зазначена в паспорті приладу, гірша від отриманої за результатами досліджень. Отже, калібрування наземних лазерних сканерів стає важливою та необхідною процедурою. Принцип роботи лазерних сканерів, який пов'язаний з вимірюванням не окремої точки, а хмари точок, істотно ускладнює процедуру калібрування. Кількість сучасних моделей лазерних сканерів досягає 30. За принципом функціонування моделі сканерів різняться, тому досі не існує єдиного підходу до моделей та методик калібрування лазерних сканерів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Аналіз публікацій з питань наземного лазерного сканування показав, що відсутній загальний методичний підхід до калібрування наземних лазерних сканерів. Це викликано особливостями, що наведені в постановці проблеми. Будь-яка система наземного лазерного сканування є "чорним ящиком". Існує дуже багато моделей калібрування лазерних сканерів. Ці моделі калібрування лазерних сканерів подібні до моделей теодолітів або електронних тахеометрів. Найвідомішими роботами, основаними на використанні моделей похибок теодолітів або електронних тахеометрів для лазерних сканерів, є роботи Lichti D.D., Ю. Решетюка [1], в яких виконано узагальнення цих моделей. Для калібрування за такими моделями похибок використовують тестові полігони з калібрувальними марками у вигляді сфер, плоских марок або тестових площин. Складність полягає у створенні полігона, який повинен бути просторовим для пра-

вильного врахування всіх похибок. Другий відомий підхід ґрунтується на калібруванні конструктивних елементів лазерних сканерів. Цей підхід розглянуто в роботах [2, 3]. Недоліком такого методу є можливість його реалізації тільки в лабораторних умовах з використанням спеціального високоточного устаткування. Надалі в роботі цей підхід не розглядається, оскільки його використовують здебільшого виробники лазерних сканерів.

Постановка завдання проблеми

Завданням роботи є аналіз методів та моделей калібрування наземних лазерних сканерів з метою розроблення єдиного методичного підходу до використання методик калібрування наземних лазерних сканерів.

Виклад основного матеріалу проблеми

Поставлена проблема за останні 15 років найповніше висвітлена в публікаціях Міжнародного товариства фотограмметрії та дистанційного зондування (ISPRS) та Міжнародної федерації геодезистів (FIG). Проблему калібрування лазерних сканерів досліджують в університетах Калгарі (Канада), Штутгарта, Ганновера (Німеччина), Стокгольма (Швеція), Цюриха (Швейцарія) тощо. Аналіз цих публікацій дає змогу зробити висновок про відсутність системного підходу до калібрування лазерних сканерів.

Передовсім зазначимо, що треба чітко розмежувати умови, за яких необхідно виконувати калібрування. Основні випадки, в яких слід перевіряти сканер:

- міжсезонна перевірка здійснюється з метою профілактики в міжсезонний період;
- поточна періодична перевірка – перед виконанням польових робіт;
- почергова перевірка – після довгого транспортування у важких умовах або за інших нехарактерних для експлуатації навантажень;
- часткова технологічна перевірка – контроль збереження основних геометричних умов на кожній станції після переходу на неї, а також щоденно перед початком вимірювань.

Очевидно, що термін "калібрування" в повному його змісті можна вжити до першого випадку. Якщо поточна або почергова перевірки дають негативний результат, також необхідне калібрування. Таке розмежування повністю вкладається у комплекс умов, які впливають на точність та якість наземного лазерного сканування. Для повнішого розуміння наведемо на рис. 1 фактори, що впливають на точність та якість лазерного сканування.

З рис. 1 випливає, що процес калібрування необхідно планувати так, щоб інші фактори або не впливали

на якість та точність калібрування, або визначались разом з параметрами калібрування, як, наприклад, рефракція, стан поверхні тощо. Детальний аналіз дав змогу систематизувати методи калібрування лазерних сканерів і подати їх у вигляді єдиної схеми на рис. 2.

Знову зауважимо, що в роботі йдеться про польові та камеральні методи.

Передовсім розглянемо методи калібрування залежно від вигляду тестового полігона. Використовуючи камеральні методи, найчастіше такий полігон створюють в приміщеннях зі стабільними кліматичними умовами. Загальний вигляд полігона такого типу наведено на рис. 3.

Розмір приміщення залежить лише від конкретних умов і коливається в значних межах. В роботі [4], наприклад, вибрано тестовий полігон розміром 90×15 м.

Для калібрування за площинами використовують приміщення, яке, для прикладу [8], має розмір 3×5×9 м з 18 площинними марками та 3×9×12 м з 25 площинними марками. Для кожного полігона процедура калібрування передбачає отримання мінімум 8 сканів, по 4 з двох станцій сканування з розворотом на 90°. Схема такого полігона наведена на рис. 4.

Розглянуті типи калібрувальних полігонів слід зарахувати до камеральних методів калібрування. Реалізуючи польові методи, калібрувальний полігон створюють подібно до камерального. Особливість польових полігонів – те, що можна значно збільшити відстані калібрування. Недоліком польових методів є складність врахування похибок, що найбільше впливають під час сканування в zenіті, а також вплив навколишнього середовища. Оригінальний польовий калібрувальний полігон наведено в роботі [5]. Автор роботи запропонував калібрувальний полігон, зображений на рис. 5.

Для калібрування сканера на великих відстанях і дослідження впливу зовнішніх умов створюють калібрувальні полігони значної протяжності. В роботі [6] наведено методику калібрування імпульсного лазерного сканера MАРTEK I-SiTE, який працює на великих відстанях. Для калібрування створено тестовий базис завдовжки 600 метрів.

Калібрувальним полігоном, який можна реалізувати як в польових, так і в камеральних умовах, є полігон, що складається з тестових об'єктів, що мають точні геометричні розміри. У статті [11] виконано калібрування лазерних сканерів за допомогою тестових об'єктів, геометрія яких відома і є стандартною для програмного забезпечення сканерів. Рекомендується використовувати моделі тестових об'єктів, які утворені з паралелепіпедів і циліндрів.

Для прикладу, основні характеристики, які можна визначити за об'єктами, це – паралельність, площинність, колінеарність, а також циліндричність. Отримані за результатами сканування характеристики порівнюють з еталонними, які в наведеному прикладі визначено фотограмметричним методом. Запропоновано використовувати об'єкти з розмірами: для паралелепіпедів 0,45х0,45х0,25 м та 0,15х0,15х0,25 м, для циліндрів 0,4х0,25 м та 0,18х0,25 м. Калібрування виконували в лабораторних умовах з постійною температурою та освітленням.



Рис. 1. Група факторів, що впливає на якість та точність лазерного сканування

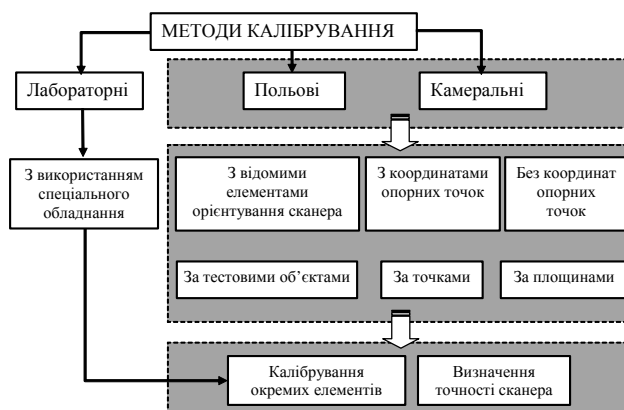


Рис. 2. Методи калібрування наземних лазерних сканерів

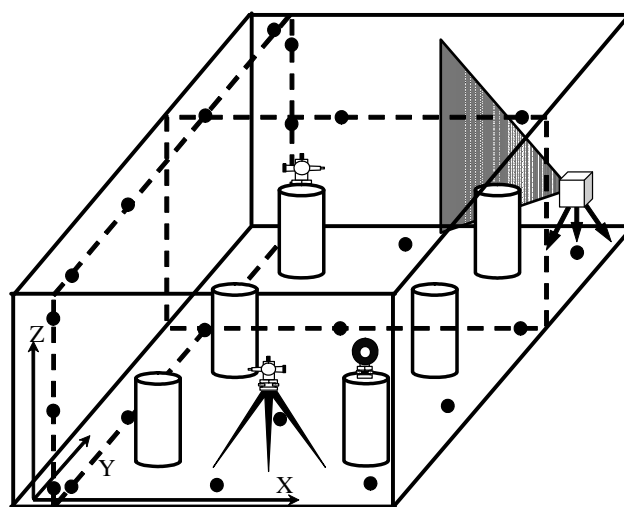


Рис. 3. Схема калібрувального полігона

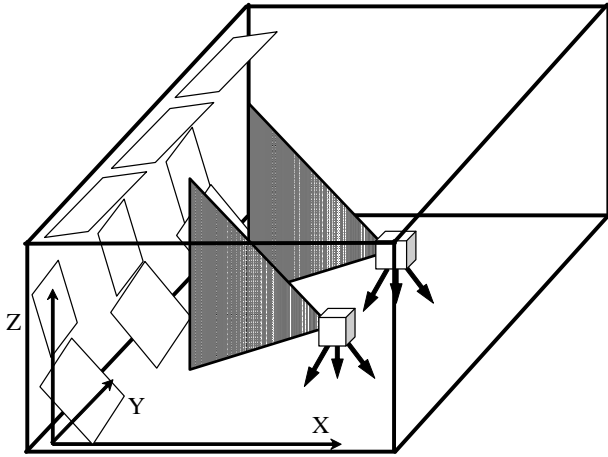


Рис. 4. Схема калібрувального полігона за площинами

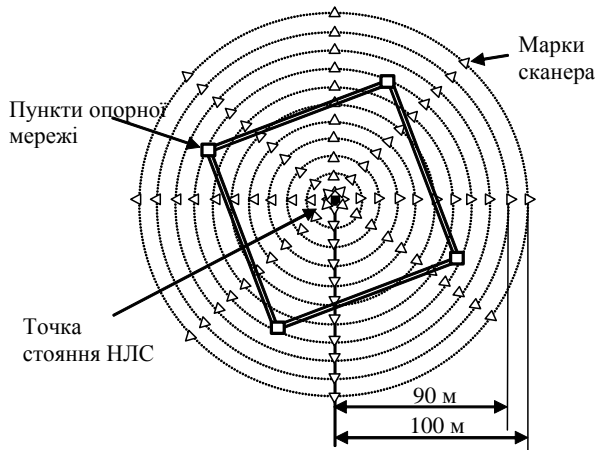


Рис. 5. Польовий калібрувальний полігон

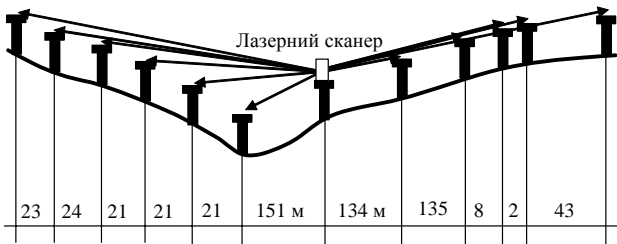


Рис. 6. Польовий калібрувальний полігон значної протяжності

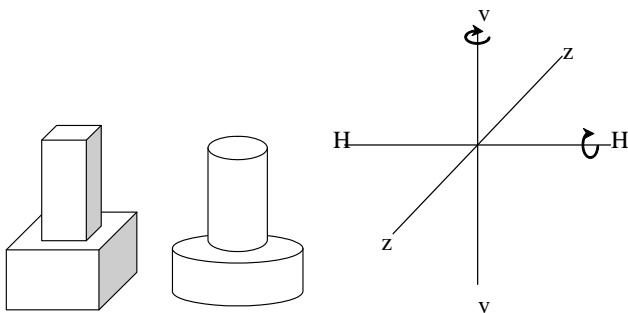


Рис. 7. Тестові об'єкти

Рис. 8. Основні осі лазерного сканера

Перейдемо до аналізу моделей похибок для калібрування лазерних сканерів. Проаналізуємо моделі калібрування похибок залежно від типу калібрувального полігона. Передовсім розглянемо механізм утворення основних похибок лазерного сканера. На нашу думку, доцільно скористатись моделлю, що наведена в роботі [12]. Модель похибок для калібрування прийнята аналогічною до моделі електронного тахеометра (рис. 8), де vv – вертикальна вісь, HH – горизонтальна вісь, zz – візирна вісь зорової труби. Взаємне просторове положення трьох осей визначається через шість параметрів, три з яких лінійні e_{vh} , e_{vz} , e_{hz} – ортогональні відстані між осями; три кутові α_{vh} , α_{vz} , α_{hz} – кути між осями. Кути вимірюються в площині, яка паралельна до двох інших осей.

Для кутів справедливі такі співвідношення: $\alpha_{vh} + v_{vh} = 90^\circ$ – похибка нахилу горизонтальної осі; $\alpha_{vz} = \zeta + v_{\zeta}$ – похибка вертикального круга, виміряна зенітна відстань; $\alpha_{hz} + v_{hz} = 90^\circ$ – колімаційна похибка.

Для калібрування відстані рекомендується така модель похибок:

$$d = a + s \cdot m$$

де s – виміряна відстань; a – стала; m – масштабний коефіцієнт.

Приймаючи наведену модель похибок, розглянемо найпростіший варіант калібрування сканера за калібрувальним полігоном, який наведено на рис. 3. Для калібрування використано кімнату розміром 12,5×7×2,6 м на стінах, стелі та підлозі якої закріплено 100 марок формату А3 з білим колом діаметра 200 мм на темному фоні [7]. Сканування кімнати виконано з двох станцій сканування по 4 скани на кожній з розворотом на 90°. Точне вимірювання центрів марок поділено на два кроки. Перший – апроксимація площиною набору точок. В основу цієї процедури покладено умову (1):

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} = M \left[\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \right], \quad (1)$$

де (x, y, z) – декартові координати точки i в системі координат сканера, (u, v, w) координати в системі координат площини, (x_c, y_c, z_c) координати центра марки. На другому кроці 2D зображення інтенсивності отримують з нерегулярно розміщених координат (u, v) . Щоб точно знайти положення центра марки на площині, виконують згортку зображення за допомогою фільтра Гауса першого порядку для визначення границь. Знайшовши центр, здійснюють зворотне перетворення від координат $(u, v, w = 0)$ до (x, y, z) .

Для точки I , що одержана з станції сканування J , виміряні величини з урахуванням похибок вимірювань можна обчислити за:

$$\begin{aligned} \rho_{ij} + v_{\rho_{ij}} &= \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho \\ \theta_{ij} + v_{\theta_{ij}} &= \arctan\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\theta \\ \alpha_{ij} + v_{\alpha_{ij}} &= \arctan\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Вибрано спрощену модель калібрування, що містить три параметри [7]:

$$\Delta\rho = \varepsilon_{OS} + \varepsilon_{\text{int}}\alpha_{ij}, \quad \Delta\theta = 0,$$

$$\Delta\alpha = \varepsilon_{\text{ecc}} \sin(\alpha_{ij}),$$

де ε_{OS} – постійна систематична похибка; ε_{int} – похибка, що залежить від кута нахилу; ε_{ecc} – похибка ексцентриситету вертикального круга.

Цілком зрозуміло, що така модель не повністю враховує всі похибки сканера.

Адекватніша модель калібрування за калібрувальним полігоном типу рис. 3 наведена в роботі [9], де вказано, що, на відміну від вирівнювання із самокалібруванням у фотограмметрії, самокалібрування в наземному лазерному скануванні не стандартизоване і не досліджене. В роботі розглянуто самокалібрування за точками. Для цього використано два тестові полігони розміром $14 \times 11 \times 3$ м з 162 точками та $5 \times 5 \times 3$ м. Калібрування виконано в лабораторних умовах зі стабільною температурою, тиском та вологістю. Для обчислень використано вирази (1)–(2).

Для зниження кореляції між елементами зовнішнього орієнтування та додатковими параметрами рівняння (2) доповнюють додатковими умовами, які визначають елементи орієнтування сканера. Під час горизонтування сканера кути крену і тангажа повинні дорівнювати нулю, а відповідні умови:

$$\omega_j = 0; \quad \phi_j = 0. \quad (3)$$

Інша умова враховує той факт, що якщо декілька сканів отримано з однієї станції сканування і відсутні систематичні похибки, то елементи зовнішнього орієнтування сканів повинні бути однакові, а відповідні умови є такими:

$$X_{oj} - X_{ok} = 0; \quad Y_{oj} - Y_{ok} = 0; \quad Z_{oj} - Z_{ok} = 0. \quad (4)$$

Якщо сканування виконано з постійним кутом розвороту між сканами, тоді додається додаткова умова:

$$\alpha_j - \alpha_k = \text{const}. \quad (5)$$

Для калібрування після сканування першого полігона використано таку модель:

$$\Delta\rho = a_0 + a_1 \sin(\alpha); \quad \Delta\theta = b_0 \tan(\alpha) + b_1 \cos(\theta), \quad (6)$$

де a_0 – систематична похибка вимірювання відстаней; a_1 – відхилення осі обертання від вертикалі; b_0 – нахил горизонтальної осі обертання; b_1 – ексцентриситет горизонтального круга.

Під час сканування другого тестового полігона використано таку модель:

$$\Delta\rho = a_0 + a_1 \sin(\alpha);$$

$$\Delta\theta = b_1 \cos(\theta) + b_2 \sin(2\theta) + b_3 \cos(2\theta); \quad (7)$$

$$\Delta\alpha = c_0 \cos(2\theta) + c_1 \sin(2\theta),$$

де b_2, b_3 – неперпендикулярність горизонтальної і вертикальної осей обертання.

Для порівняння наведемо модель, яка використовується в роботі [13]. Наведемо моделі калібрування, які вибрано за основу для калібрування. Для відстані:

$$\Delta D = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 + a_3 e^{-a_4 D} \sin\left((D - a_5) \frac{2\pi}{a_6}\right), \quad (8)$$

де a_0 – постійна складова; a_1 – масштабний коефіцієнт (враховує коливання частоти); a_2 – квадратичний коефіцієнт; a_3, a_5, a_6 – поправки в амплітуду, частоту і циклічність (тільки для фазових сканерів); a_4 – зменшення циклічної поправки.

Для горизонтальних кутів:

$$\Delta\theta = b_1 \sec \alpha + b_2 \tan \alpha + [b_3 \sin \theta + b_4 \cos \theta] +$$

$$+ \arcsin \frac{b_5}{D} + [b_6 \sin 2\theta + b_7 \cos 2\theta] + b_8 \cos 3\theta, \quad (9)$$

де b_1 – колімаційна похибка; b_2 – похибка нахилу горизонтальної осі; b_3, b_4 – ексцентриситет горизонтального круга; b_5 – ексцентриситет колімаційної та вертикальної осей; b_6, b_7 – неортогональність площини горизонтального круга і вертикальної осей; b_8 – параметр компенсації залишкових систематичних ефектів колімації та нахилу горизонтальної осі.

Для вертикального кута:

$$\Delta\alpha = c_0 + (c_1 \sin \alpha + c_2 \cos \alpha) + \arcsin \frac{c_3}{D} + c_4 \cos \theta, \quad (10)$$

де c_0 – похибка вертикального круга; c_1, c_2 – ексцентриситет вертикального круга; c_3 – ексцентриситет колімаційної та горизонтальної осей; c_4 – емпіричний параметр для моделювання синусоїдальної похибки як функції горизонтального кута з періодом 120° .

Розглянуті методи та моделі калібрування можна узагальнити за такими ознаками.

1. В основу моделі похибок сканера покладено модель електронного тахеометра, яка не повністю відповідає принципу функціонування лазерного сканера.

2. Калібрувальні марки полігона необхідно вимірювати або в ручному режимі, або з використанням складних і не завжди надійних алгоритмів автоматичного вимірювання.

3. Калібрування віддалемірного блока виконують у камеральних умовах на коротких відстанях.

До певної міри подолати вплив недоліків, вказаних у пунктах 1 і 2, можна, калібруючи не за точками, а за площинами.

У роботі [8] запропоновано метод камерального калібрування наземних лазерних сканерів за допомогою плоских об'єктів, що відобразились на хмарі точок. Першим ідею цього способу запропонував Gielsdorf. Недоліком всіх методів, що використовують опорні замарковані точки, які можуть бути або плоскими, або просторовими (сферичними), є необхідність вручну вимірювати їх положення на хмарі. Моделі похибок мають вигляд, запропонований у роботі Licht D.D.

$$\Delta\rho = A_0 + A_2 \sin(\alpha_{ij}) + A_3 \sin\left(\frac{4\pi}{U_1} \rho_{ij}\right) +$$

$$+ A_4 \cos\left(\frac{4\pi}{U_1} \rho_{ij}\right) + A_5 \sin\left(\frac{4\pi}{U_2} \rho_{ij}\right) +$$

$$+ A_6 \cos\left(\frac{4\pi}{U_2} \rho_{ij}\right) + A_7 \sin(4\theta_{ij}) + A_8 \cos(4\theta_{ij}) \quad (11)$$

$$\Delta\theta = B_1 \sec(\alpha_{ij}) + B_2 \tan(\alpha_{ij}) + B_3 \sin(2\theta_{ij}) + \\ + B_4 \cos(2\theta_{ij}) + B_5 \theta_{ij} + B_6 \cos(3\alpha_{ij}) + B_7 \cos(4\alpha_{ij}) \\ \Delta\alpha = C_0 + C_2 \sin(\alpha_{ij}) + C_3 \sin(3\theta_{ij}) + C_4 \cos(3\theta_{ij})$$

де складова U_1 – половина найкоротшої довжини хвилі модуляції, яка приблизно дорівнює 0,6 м, складова U_2 дорівнює одній другій середньої одиничної довжини, приблизно 4,8 м. Ці параметри особливо важливі для фазових лазерних сканерів.

Запропонований площинний метод самокалібрування оснований на комбінованому методі вирівнювання. У разі його використання мінімізується відстань між точками і відповідними площинами за умови обмежень. Зовнішнє орієнтування, параметри площини та додаткові параметри (11) оцінюють одночасно. Оскільки спостереження та параметри рівнянь точок на площині не можна відокремити і кожна умова передбачає більш ніж одне спостереження, використовують модель комбінованого методу вирівнювання (модель Гаусса–Гельмерта).

Прийmemo $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ – вектор параметрів; $\mathbf{l} \in \mathbf{R}^n$ – вектор спостережень, де u і p – кількість параметрів та спостережень відповідно. Нехай $f_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{l})$ – функція відстані між i^{th} точкою в j^{th} системі сканера \mathbf{p}^{ij} і k^{th} площиною у просторі об'єкта, нормаллю якої і ортогональною відстанню є $\mathbf{n}_k = (a_k \ b_k \ c_k)$ і d_k . Функцію відстані записують:

$$f_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{l}) = \mathbf{n}_k^T (\mathbf{M}_j^T \mathbf{p}_{ij} + \mathbf{Tr}_j) - d_k = 0, \quad (12)$$

де \mathbf{M}_j і \mathbf{Tr}_j – параметри повороту та переміщення між об'єктом та j^{th} системою сканера. Лінеаризоване рівняння для моделі Гаусса–Гельмерта набуде вигляду

$$\mathbf{A}d\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{w}_0 = 0, \quad (13)$$

де m – загальна кількість точок спостережень; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times u}$ і $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{m \times p}$ – яacobіани функції $f_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{l})$ за змінними \mathbf{x} і \mathbf{l} ; u дорівнює сумі u_e , u_{ap} , і u_p . u_e – кількість параметрів трансформування, u_{ap} – кількість додаткових параметрів, u_p – кількість параметрів площини. Обмеження для площини:

$$g_k(a_k, b_k, c_k, d_k) = \mathbf{n}_k^T \mathbf{n}_k - 1 = 0. \quad (14)$$

Після лінеаризації маємо:

$$\mathbf{A}_c d\mathbf{p} + \mathbf{w}_c = \mathbf{v}_c, \quad (15)$$

де $\mathbf{A}_c \in \mathbf{R}^{c \times u_p}$ – яacobіан $g_k(a_k, b_k, c_k, d_k)$ для k^{th} площини; c – кількість обмежень. Функція мінімізації має вигляд:

$$\varphi = \mathbf{v}^T \mathbf{P}\mathbf{v} + \mathbf{v}_c^T \mathbf{P}_c \mathbf{v}_c + 2\mathbf{k}^T (\mathbf{A}d\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{w}_0) + \\ + 2\mathbf{k}_c^T (\mathbf{A}_c d\mathbf{p} + \mathbf{w}_c - \mathbf{v}_c).$$

Мінімізація цільової функції приводить до системи нормальних рівнянь:

$$\mathbf{N}d\mathbf{x} + \mathbf{w} = 0 \\ \mathbf{N} = \mathbf{A}^T (\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_c^T \mathbf{P}_c \mathbf{A}_c \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{A}^T (\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{w}_0 + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{A}_c^T \mathbf{P}_c \mathbf{w}_c \end{bmatrix}.$$

У разі використання площин включення умовних рівнянь площини призводить до нелінійного вигляду цільової функції. Тому треба використовувати нелінійний метод найменших квадратів.

Запропонована методика дає змогу уникнути проблем, що пов'язані з недосконалістю моделі похибок та необхідністю вимірювань в ручному режимі. Проте залишається питання, яке пов'язане з калібруванням віддалемірного блока сканера.

Альтернативою розглянутим методикам можна вважати польові методи калібрування. Найвдалішою, на нашу думку, є методика калібрування лазерних сканерів, запропонована у [5]. Для калібрування використано полігон, зображений на рис. 5

Похибку вимірювання віддалемірним блоком подають:

$$\Delta\rho = a + b\rho_{вим}, \quad (16)$$

де $\Delta\rho$ – похибка вимірювання відстані; $\rho_{вим}$ – відстань, обчислена за даними сканування марок полігона; a , b – коефіцієнти рівняння.

Оскільки координати марок полігона визначено електронним тахеометром, то для виключення систематичних похибок кутових вимірювань електронних тахеометрів в цій роботі запропоновано таку модель кутових вимірювань:

$$v_i = \Delta A + (\Delta_0 + \Delta_1 t_i + \Delta_2 t_i^2) \cos \varphi_i,$$

де ΔA – поправка, що враховує постійну похибку візування та вплив рефракції; $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$ – коефіцієнти, що враховують вплив рефракції, пов'язаний зі зміною температурного та вологого градієнтів у часі; t_i – проміжок часу між моментами початку спостережень та i -м моментом; φ_i – кути, утворені напрямком максимальних градієнтів температури і вологості та вимірним напрямком:

$$\varphi_i = \varphi_0 + A_{вим,i},$$

де $A_{вим,i}$ – вимірний i -й напрямком; φ_0 – постійна величина, що характеризує фазовий зсув максимальних градієнтів температури і вологості. Поправки v_i будуть однакові для всіх напрямків, що виміряні з однієї точки стояння приладу.

Для наземних лазерних сканерів запропоновано таку модель корекції горизонтальних та вертикальних напрямків:

$$\Delta\lambda_i = \sum_{j=1}^k A_j \cos(\omega_j \lambda_j + \lambda_{0,j}), \quad (17)$$

де A_j – амплітуда коливання похибок для гармоніки з номером j ; ω_j – частота коливання похибок для j -ї гармоніки; λ_j – вимірний напрямком; $\lambda_{0,j}$ – початкова фаза; k – кількість гармонік.

За запропонованою методикою можна оцінити вплив зовнішніх умов на точність лазерного сканування

та виконати повноцінне калібрування віддалемірного блока сканера на різних відстанях. Недоліком цієї методики є неможливість калібрування всього поля зору лазерного сканера, оскільки польовий калібрувальний полігон фактично розміщений в одній площині.

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновки:

1. Основну увагу доцільно зосередити на проблемі відсутності стандартів визначення точності та калібрування наземних лазерних сканерів.

2. Для калібрування кутомірної частини лазерного сканера найдоцільніше застосовувати камеральні методи. Вибір моделі калібрування залежить від типу марок полігона та технології їх вимірювання на скані.

3. Для калібрування віддалемірного блока можна рекомендувати використовувати або лабораторні методи з високоточним устаткуванням наприклад, інтерференційним компаратором, або польові методи калібрування. В камеральних умовах оцінити точність роботи віддалемірного блока можна лише наближено.

Загальні висновки та рекомендації.

У роботі проаналізовано методи та моделі калібрування наземних лазерних сканерів та запропоновано методичний підхід до використання відомих методик калібрування наземних лазерних сканерів. Виконане дослідження дає змогу надалі розв'язати дві задачі: вибір найадекватнішої моделі калібрування серед наявних і розроблення універсальної моделі похибок та методики калібрування, які б не залежали від моделі та принципу функціонування наземного лазерного сканера.

Література

- Reshetyuk Y. Self Calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning: Doctoral thesis. – KTH Stockholm, 2009. – 152 p.
- Schulz T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences. – ETH Zurich, 2007. – 141 p.
- Zogg H.M. Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences. – ETH Zurich, 2008. – 144 p.
- Staiger R. The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS) // From Pharaohs to Geomatics. FIG Working Week 2005 GSDI-8. Cairo, Egypt April 16-21, 2005.
- Комиссаров А.В. Методика исследования метрических характеристик сканов: автореф. дис. кандидата техн. наук: 25.00.34 / Сибирская государственная геодезическая академия – Новосибирск. – 2007. – 25 с.
- Lichti D.D., Stewart M.P., Tsakiri M., Snow A.J. Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system // School of Spatial Sciences Curtin University of Technology. – 23 p.
- Lichti D.D., Brustle S., Franke J. Self calibration and analysis of the Surphaser 25HS 3D scanner. Strategic Integration of Surveying Services // FIG Working Week 2007, Hong Kong SAR, China 13–17 May 2007. – 13 p.
- Kwang-Bo Bae, Lichti D.D. On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners // ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and Sivilaser 2007, 2007 Espoo, September 12–14, 2007, Finland.
- Chow J.C.K., Teskey W.F., Lichti D.D. Self-Calibration and Evaluation of the Trimble GX Terrestrial Laser Scanner // Commission I, WG I/3.
- Ingensand H. Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. 3rd IAG // 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006, Germany.
- Zamecnikova M., Kopacik A. Terrestrial laser system testing using reference bodies. 3rd IAG // 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006, Germany.
- Reitdorf A., Gielsdorf F., Gruendig L. A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners // INGE0 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, November 11–13, Slovakia.
- Schneider D. Calibration of a Riegel LMS-Z420i Based on a Multi-Station Adjustment and a Geometric Model With Additional Parameters. Commission V, WG V/3.

Аналіз методів та моделей калібрування наземних лазерних сканерів

Р. Шульц

Проаналізовано методи та моделі калібрування наземних лазерних сканерів та запропоновано методичний підхід до використання різних методик калібрування наземних лазерних сканерів.

Анализ методов и моделей калибровки наземных лазерных сканеров

Р. Шульц

Проанализированы методы и модели калибровки наземных лазерных сканеров и предложен методический подход к использованию известных методик калибровки наземных лазерных сканеров.

Analysis of methods and models of terrestrial laser scanner calibration

R. Schultz

In work the analysis of methods and models for terrestrial laser scanner calibration is executed and methodical approach is offered to the use of existent methods for terrestrial laser scanner calibration.