DOI: 10.32347/2076-815x.2023.84.365-375
УДК 528+519.6
Сосса Б.Р.,
bohdan.sossa@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4484-4865,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗРАХУНКУ ПРИ КАЛІБРУВАННІ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ

Розглянуто спосіб уникнення кореляції між параметрами трансформації систем координат сканера і полігона та параметрами калібрування при калібруванні наземних лазерних сканерів. Запропоновано здійснювати роздільний розрахунок параметрів перетворення за допомогою алгоритму Кабша-Умеями та використовувати обернене перетворення з метою спрощення чисельного розв'язання. Експериментально доведено можливість використання оберненої трансформації для оптимізації процесу визначення параметрів калібрування.

Ключові слова: наземна дазерна станція (НЛС); калібрування НЛС; алгоритм Кабша-Умеями; перетворення Гельмерта; чисельне розв'язання; параметричний спосіб зрівнювання.

Постановка проблеми. Кореляція між виміряними величинами при калібруванні має місце і може відрізнятися для кожної конкретної моделі і переважно залежить від типу сканера та способу вимірювання відстані [5]. Проте, використання загальноприйнятої математичної моделі калібрування призводить додатково до кореляції між параметрами перетворення з системи координат (СК) сканера в СК полігона і параметрів сканування через одночасне їх визначення. Автором запропоновано здійснити роздільний розрахунок зазначених параметрів з метою уникнення кореляції між ними та дослідити перспективи запропонованого підходу в перерізі оптимізації процесу розрахунку при проведенні калібрування НЛС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання калібрування наземних лазерних сканерів (НЛС) протягом останніх двадцяти років широко освітлено в зарубіжних і вітчизняних публікаціях. На початку досліджень зазначеної теми цей процес розглядався, як аналог повірок класичних геодезичних приладів, а останнім часом все частіше розглядається, як комбінація повірки і юстування шляхом внесення даних калібрування в отримані виміри. Переважна більшість дослідників при цьому використовує математичну модель, запропоновану в [8]. Дана модель заснована на принципі самокалібрування з фотограмметрії і дозволяє одночасно визначити параметри калібрування і параметри переходу з СК сканера в СК полігону. Сучасні дослідження, що проводяться в університетах Калгарі (Канада), Штутгарта, Ганновера (Німеччина), Стокгольма (Швеція), Цюриха (Швейцарія), Сіднея (Австралія), Шанхаю, Хефею, Їчуню, Цзіаню (КНР), а в Україні — в КНУБА, НУ «Львівська політехніка», та ДП «Укрметртестстандарт», розглядають параметри калібрування, геометричні моделі та моделі похибок, або їх комбінації [6] використовуючи при цьому вказану математичну модель. Як зазначалося вище, одним з недоліків цієї моделі є наявність кореляції між зазначеними величинами під час розрахунку.

Ціллю публікації є формулювання нового підходу до калібрування НЛС, при якому здійснюється роздільний пошук параметрів перетворення між системами координат і параметрами калібрування.

Метою дослідження є удосконалення математичної моделі калібрування через роздільний пошук параметрів перетворення і калібрування для уникнення кореляції між ними та спрощення чисельного розв’язання задачі визначення параметрів калібрування.

Основна частина. Головними питаннями при проведенні калібрування НЛС є вибір типу калібрування, геометричної моделі приладу, моделі похибок та математичної моделі пошуку параметрів.

Калібрування поділяється на інструментальне, з використанням високоточного обладнання для калібрування окремих елементів і системне, коли сканер розглядають як «чорну скриньку» через обмеженість доступу до окремих елементів як фізичного, так і захищеного патентним законодавством [2]. При самокалібруванні використовують системний тип.

Геометричну модель сканера прийнято розглядати подібною до моделі електронного тахеометра [10]. Таким чином, виокремлюють величини, до яких в подальшому шукають параметри: ρ – виміряна відстань, φ – виміряний горизонтальний кут, α – виміряний вертикальний кут. Параметри сканування позначають, відповідно як $\Delta\rho$, $\Delta\varphi$, $\Delta\alpha$.

Модель похибок, що опирається на вказану геометричну модель, найповніше описано в [3]. Основна проблема при використанні зазначеної моделі – це необхідність проведення інструментального калібрування для виокремлення та визначення деяких коефіцієнтів. Також, вплив зазначених коефіцієнтів може значно відрізнятися для різних типів сканерів – панорамних і гібридних та для різних способів вимірювання відстаней – імпульсний чи фазовий. Тому, для практичного використання використовують наступну модель похибок [1]:

$$\Delta\rho = a_0 + \rho s_\rho, \tag{1}$$

де a_0 – константа віддалеміра, ρ – виміряна відстань, s_ρ – масштабний коефіцієнт;

$$\Delta\varphi = \frac{b_1}{\cos\alpha} + b_2 \tan\alpha, \qquad (2)$$

де b_1 – похибка за колімацію, b_2 – похибка за нахил осі обертання або хитання дзеркала; b_3 і b_4 – похибка ексцентриситету за осями

$$\Delta\alpha = C_0, \qquad (3)$$

де c_0 – похибка індекса вертикального круга.

Автор в своїх дослідженнях пропонує додатково розглядати лінійний ексцентриситет в складі похибки горизонтального круга. Тоді вираз 2 набуває виду:

$$\Delta\varphi = \frac{b_1}{\cos\alpha} + b_2 \tan\alpha + b_3 \sin\varphi + b_4 \cos\varphi, \qquad (4)$$

де b_3 і b_4 – похибка ексцентриситету за осями.

Загальноприйнята математична модель калібрування, запропонована в [9] і яка використовується дотепер, передбачає, що калібрування НЛС проводиться на полігоні, який розташований в приміщенні, з використанням тестових об’єктів калібрування (ТОК) точкового типу, розміщених на всіх поверхнях. Вона заснована на базових формулах, сформованих в [7] і має такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underset{6p\times 6p}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underset{u_{ПК}\times u_{ПК}}{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underset{3m\times 3m}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \underset{6p\times 1}{V}_{ЗО} \\ \underset{u_{ПК}\times 1}{V}_{ПК} \\ \underset{3m\times 1}{V}_{ТО} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underset{r\times 6p}{A}_{ЗО} & \underset{r\times u_{ПК}}{A}_{ПК} & \underset{r\times 3m}{A}_{ТО} \\ \underset{6p\times 6p}{-I} & 0 & 0 \\ 0 & \underset{u_{ПК}\times u_{ПК}}{-I} & 0 \\ 0 & 0 & \underset{3m\times 3m}{-I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ЗО} \\ X_{ПК} \\ X_{ТО} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W \\ W_{ЗО} \\ W_{ПК} \\ W_{ТО} \end{bmatrix}, \qquad (5)$$

де B – матриця коефіцієнтів умовних рівнянь, I – підматриця координат отриманих точок, V – вектор поправок, A – матриця коефіцієнтів рівнянь поправок, X – вектор параметрів самокалібрування і W – вектор нев’язок. V, A, X і W розділено на три частини, відповідно до елементів зовнішнього орієнтування (ЗО), параметрів калібрування (ПК) і координат отриманих точок (ТО), p – загальна кількість станцій сканування; m – загальна кількість тестових об’єктів калібрувального полігона, $r = 3pm$; $u = 6p + u_{ПК} + 3m$, $u_{ПК}$ – кількість параметрів калібрування.

Основна проблема цієї математичної моделі полягає у наявності кореляції між параметрами перетворення з СК сканера в СК полігона і параметрів сканування через одночасне їх визначення. В даній роботі запропоновано здійснити роздільний розрахунок зазначених параметрів з метою уникнення кореляції між ними.

При визначенні параметрів перетворення між системами координат сканера і полігона застосовують перетворення Гельмерта з масштабним коефіцієнтом рівним 1 [11]. Для практичного застосування при розрахунку параметрів перетворення між системами координат пропонується використовувати алгоритм Кабша-Умеями [4]. Даний алгоритм дозволяє розрахувати оптимальну матрицю обертання і вектор зміщення між двома наборами координат точок, використовуючи МНК. Він дозволяє отримати зазначені величини навіть у випадку наявності грубих похибок у вимірюваннях [12]. При використанні цього алгоритму спочатку розраховують центроїди для обох наборів даних, потім визначають прирости координат кожної точки відносно центроїдів:

$$\begin{gathered} C_Q = \left(\overline{x_q}, \overline{y_q}, \overline{z_q}\right), C_P = \left(\overline{x_p}, \overline{y_p}, \overline{z_p}\right), \\ dx_{iq} = x_{iq} - \overline{x_q},\ dy_{iq} = y_{iq} - \overline{y_q},\ dz_{iq} = z_{iq} - \overline{z_q}, \\ dx_{ip} = x_{ip} - \overline{x_p},\ dy_{ip} = y_{ip} - \overline{y_p},\ dz_{ip} = z_{ip} - \overline{z_p}, \end{gathered} \tag{6}$$

де індекси q і p позначають СК полігона і сканера, відповідно.

З отриманих матриць приростів координат Q і P формують коваріаційну матрицю H:

$$H = cov(P, Q) = P^T Q.$$

Для подальших обчислень використовують сингулярний розклад матриці H, який є узагальненням розкладу матриці за власними векторами: $H = U\Sigma V^T$,

де U – унітарна матриця ліво-сингулярних векторів, Σ – діагональна матриця з сингулярними числами σ у порядку зменшення, V - унітарна матриця право-сингулярних векторів. Ліво-сингулярні вектори U є множиною ортонормованих головних векторів HH^T, а право-сингулярні вектори V – множиною ортонормованих головних векторів $H^T H$.

Матрицю повороту R і вектор зсуву T визначаємо за виразами [12]:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = VU^T , \tag{7}$$

$$T = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = C_Q^T - RC_P^T. \tag{8}$$

Тепер можемо провести трансформацію координат з СК сканера в СК полігона за виразом:

$$\begin{bmatrix} X_i^P \\ Y_i^P \\ Z_i^P \end{bmatrix} = T + R \begin{bmatrix} X_i^Q \\ Y_i^Q \\ Z_i^Q \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Пошук параметрів калібрування здійснюється шляхом мінімізації функції нев'язки еталонних значень координат X_i^Q Y_i^Q, Z_i^Q з використанням прийнятої моделі коефіцієнтів параметрів калібрування за формулою:

$$F(s_p, a_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0) = \sum_{i=0}^{n}((X_i - \Delta X_i)^2 + (Y_i - \Delta Y_i)^2 + (Z_i - \Delta Z_i)^2) \quad (10)$$

Для визначення параметрів калібрування скористаємося їх складовими, зазначеними у виразах 1, 3, 4. Якщо вплив параметрів калібрування на визначення приростів координат можна виразити так [3]:

$$\begin{bmatrix}\Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}(\rho_i - \Delta\rho_i)cos(\varphi_i - \Delta\varphi_i)cos(\alpha_i - \Delta\alpha_i) \\ (\rho_i - \Delta\rho_i)sin(\varphi_i - \Delta\varphi_i)cos(\alpha_i - \Delta\alpha_i) \\ (\rho_i - \Delta\rho_i)\sin(\alpha_i - \Delta\alpha_i)\end{bmatrix}, \quad (11)$$

то з урахуванням складових або коефіцієнтів параметрів калібрування вираз набуває такої форми:

$$\begin{bmatrix}\Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}(s_\rho\rho_i - a_0)cos\left(\varphi_i - \frac{b_1}{cos\alpha_i} - b_2tan\alpha_i - b_3sin\varphi_i - b_4cos\varphi_i\right)cos(\alpha_i - c_0) \\ (s_\rho\rho_i - a_0)sin\left(\varphi_i - \frac{b_1}{cos\alpha_i} - b_2tan\alpha_i - b_3sin\varphi_i - b_4cos\varphi_i\right)cos(\alpha_i - c_0) \\ (s_\rho\rho_i - a_0)\sin(\alpha_i - c_0)\end{bmatrix}. \quad (12)$$

Знаходження мінімуму функції полягає в лінеаризації виразів (12) за змінними s_ρ, a_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0 для їх значень, що є близькими до очікуваних та в подальшому визначенні поправок до них з системи лінійних рівнянь за умови мінімуму відхилення від даних спостережень.

Нехай маємо деяке початкове значення $s_p^0, a_0^0, b_1^0, b_1^0, b_2^0, b_3^0, b_4^0, c_0^0$. Шукане значення подаємо так:

$$s_p = s_p^0 + \Delta s_p, a_0 = \Delta a_0 + a_0^0, b_1 = \Delta b_1 + b_1^0, b_2 = \Delta b_2 + b_2^0, b_3 = \Delta b_3 + b_3^0,$$

$$b_4 = \Delta b_4 + b_4^0, c_0 = \Delta c_0 + c_0^0,$$

де поправки $\Delta s_p, \Delta a_0, \Delta b_1, \Delta b_2, \Delta b_3, \Delta b_4, \Delta c_0$ отримують з системи рівнянь:

$$A^T AX = A^T b \quad (13)$$

де A – матриця коефіцієнтів рівнянь поправок, X – поправки, що визначаються, b – вектор вільних членів.

Проте, враховуючи, що координати сканера спочатку повинні бути трансформовані в систему координат полігона за виразом (9), можемо записати параметричне рівняння зв'язку так:

$$\begin{aligned} X_i^P &= X_0 + X_i^Q r_{11} + Y_i^Q r_{12} + Z_i^Q r_{13} \\ Y_i^P &= Y_0 + X_i^Q r_{21} + Y_i^Q r_{22} + Z_i^Q r_{23} \\ Z_i^P &= Z_0 + X_i^Q r_{31} + Y_i^Q r_{32} + Z_i^Q r_{33}, \end{aligned} \tag{14}$$

де значення зсуву і розвороту отримуються з вектору зсуву і матриці розвороту з виразів 7 і 8. Після цього розраховуються прирости координат. Як бачимо, при такому підході визначення коефіцієнтів рівнянь поправок і наступне чисельне розв'язання системи рівнянь (12) значно ускладнюється. Розглянемо спосіб спрощення розв'язання системи рівнянь (14) шляхом оберненої трансформації.

При проведенні калібрування, зазвичай, сканування виконують більше, ніж з однієї станції. Тому, у випадку перестановки Q і P у виразах 6-9, ми отримаємо два і більше набори даних в системах координат, що не пов'язані між собою. Таким чином, СК полігону повинна лишитися вихідною для забезпечення зв'язку між координатами, отриманими з різних станцій сканування.

Автором запропоновано використати наступний підхід. Після отримання параметрів трансформації системи координат сканера в систему координат полігону проводиться обернена трансформація за виразом:

$$\begin{bmatrix} X_i^Q \\ Y_i^Q \\ Z_i^Q \end{bmatrix} = R^{-1}\left(\begin{bmatrix} X_i^P \\ Y_i^P \\ Z_i^P \end{bmatrix} - T\right), \tag{15}$$

після чого проводиться розв'язання системи рівнянь (13) за параметричними рівняннями (12). У цьому випадку, після лінеаризації (12), розв'язання системи рівнянь можна записати у матричній формі:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b, \tag{16}$$

$$\text{де } X = \begin{bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta s_\rho \\ \Delta b_1 \\ \Delta b_2 \\ \Delta b_3 \\ \Delta b_4 \\ \Delta c_0 \end{bmatrix}$$

за допомогою яких знаходимо значення a_0, s_ρ, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0.

Для експериментальної перевірки коректності запропонованого способу оберненої трансформації було взято три набори даних, отриманих за допомогою НЛС (P) і високоточного електронного тахеометра (Q). Кожен набір даних складається з точок, отриманих з двох станцій сканування і однієї станції електронного тахеометра. За допомогою алгоритма Кабша-Умеями було визначено параметри переходу між СК сканера і СК полігона. Отримані значення R і T з округленням до восьмого знаку після коми для R і до п’ятого знаку для T наведено в табл.1:

Табл.1.

Отримані параметри перетворення між СК сканера і СК полігона.

Сканер 1							
R1			T1	R2			T2
0.99825556	0.05904092	0.00010757	-0.00216	-0.99988942	-0.01487010	-0.00016954	0.003988
-0.05904093	0.99825556	0.00012165	-0.04529	0.01487012	-0.99988942	-0.00016170	-0.050604
-0.00010020	-0.00012779	0.99999999	0.12941	-0.00016712	-0.00016421	0.99999997	0.125145
Сканер 2							
R1			T1	R2			T2
-0.99978360	-0.02080270	-0.00001371	0.02754	0.99920909	-0.03976426	0.00008459	-0.080890
0.02080270	-0.99978359	0.00016453	-0.01628	0.03976426	0.99920909	-0.00001567	-0.116730
-0.00001713	0.00016421	0.99999999	0.15207	-0.00008390	0.00001902	1.00000000	0.138570
Сканер 3							
R1			T1	R2			T2
0.66772983	0.74440371	0.00002506	-0.05018	-0.10221324	-0.99476251	0.00007843	1.93942
-0.74440371	0.66772983	0.00001217	-0.07972	0.99476251	-0.10221324	-0.00003215	0.12525
-0.00000768	-0.00002678	1.00000000	0.04729	0.00004000	0.00007473	1.00000000	0.04774

Після цього за виразом (9) було отримано координати точок, виміряних НЛС, в СК полігона. Позначимо ці координати $X_i^{P\to Q}, Y_i^{P\to Q}, Z_i^{P\to Q}$. Обернена трансформація проводиться за виразом (15). В результаті отримано координати точок, виміряних електронним тахеометром, в СК кожної з станцій сканування. Позначимо їх $X_i^{Q\to P}, Y_i^{Q\to P}, Z_i^{Q\to P}$. В обох випадках, за рахунок наявності двох станцій сканування, кількість точок, отриманих з електронного тахеометра, подвоювалася, в результаті чого отримувалася однакова кількість точок для всіх СК.

Для оцінки точності прямої та оберненої трансформації і їх порівняння скористаємося різницями координат, отриманих при цьому:

$$\Delta X_i^{PQ} = X_i^{P\to Q} - X_i^{Q}, \Delta Y_i^{PQ} = Y_i^{P\to Q} - Y_i^{Q}, \Delta Z_i^{PQ} = Z_i^{P\to Q} - Z_i^{Q},$$
$$\Delta X_i^{QP} = X_i^{Q\to P} - X_i^{P}, \Delta Y_i^{QP} = Y_i^{Q\to P} - Y_i^{P}, \Delta Z_i^{QP} = Z_i^{Q\to P} - Z_i^{P}.$$

Розрахуємо СКП прямої та оберненої трансформації за виразом:

$$m_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i^{PQ^2}, \Delta Y_i^{PQ^2}, \Delta Z_i^{PQ^2}}{n-1}}, m_{\text{об}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i^{QP^2}, \Delta Y_i^{QP^2}, \Delta Z_i^{QP^2}}{n-1}}, \quad (17)$$

де n – кількість точок.

Для наочності, зведемо отримані дані по СКП прямої та оберненої трансформації в таблицю 2:

Табл. 2.

СКП прямої та оберненої трансформації для різних наборів даних

Сканер 1		Сканер 2		Сканер 3	
$m_{\text{пр}}$, м	$m_{\text{об}}$, м	$m_{\text{пр}}$, м	$m_{\text{об}}$, м	$m_{\text{пр}}$, м	$m_{\text{об}}$, м
0.00174465	0.00174465	0.00190907	0.00190907	0.00274539	0.00274539

Як бачимо, значення СКП для прямої та оберненої трансформації не відрізняються в межах значущих знаків. За результатами розрахунків, розбіжності для зазначених величин починають з'являтися в 14-15 знаку після коми. Отже, експериментально підтверджено можливість використання оберненої трансформації з метою оптимізації розрахунків при калібруванні НЛС.

Висновки. Сформульовано новий підхід до проведення калібрування НЛС, при якому здійснюється роздільне визначення параметрів перетворення між СК сканера та СК полігона і параметрами калібрування, що дозволяє уникнути кореляції між зазначеними величинами. Запропоновано використовувати алгоритм Кабша-Умеями для визначення параметрів трансформації по Гельмерту. З метою спрощення чисельного розв'язання задачі визначення параметрів калібрування, запропоновано проводити обернене перетворення та експериментально підтверджено можливість використання оберненої трансформації для оптимізації розрахунків при калібруванні НЛС.

Література.

1. 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 р. 32 с.
2. 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.
3. Chow J.C.K., Lichti D.D., Glennie C., Hartzell P. Improvement to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods. *SENSORS*. 2013. №6. P. 7224-7249. режим доступу: http://www.mdpi.com/1424-8220/13/6/7224
4. Kabsch, Wolfgang. A Solution for the Best Rotation to Relate Two Sets of Vectors. *Acta Crystallographica*, Sept. 1976. International Union of Crystallography, p.922-923, https://doi.org/10.1107/s0567739476001873
5. Lichti D.D. Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam, 2010. Vol.65. pp. 93-102.
6. Medic, Tomislav & Holst, Christoph & Kuhlmann, Heiner. (2019). Improving the results of terrestrial laser scanner calibration by an optimized calibration process. *Conference: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019*, Oldenburg, Germany, Wichmann Verlag, Berlin, pp. 36-50. https://www.researchgate.net/publication/332979231_Improving_the_results_ of_terrestrial_laser_scanner_calibration_by_an_optimized_calibration_process
7. Mikhail E. W. Observations and Least Squares. New York: IEP Don-Donnelley, 1976. 497 p.
8. Reshetyuk Y. 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, 2009. 174 p.
9. Reshetyuk Yuriy, A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanners, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 65, Issue 5, 2010, P. 445-456, ISSN 0924-2716, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.05.005.
10. Rietdorf A., Gielsdorf F., Gruendig L. A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *FIG Working Week 2004*, TS26 Positioning and Measurement Technologies and Practices II – Laser Scanning and Photogrammetry, Athens, Greece, May 22-27, 2004.Athens, 2004.P. 2-11.
11. Schulz T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences / ETH Zurich. Zurich, 2007. 172 p.
12. Umeyama, Shinji. Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13 (4), 1991. p.376–380, doi:10.1109/34.88573

Bohdan Sossa,
Kyiv National University of Construction and Architecture

SOME ISSUES OF THE CALCULATION PROCESS OPTIMIZATION IN TERRESTRIAL LASER SCANNERS CALIBRATION.

A conventional and widely used mathematical model of laser scanners calibration has such an imperfection as correlation between some of parameters during the adjustment process and quite complex numerical solution. A method of avoiding the correlation between scanner and polygon transformation parameters and calibration parameters as well as calibration numerical solution simplification is considered. It is proposed to implement a separate transformation parameters computation by using Kabsch-Umeyama algorithm that can compute Helmert transformation parameters even in case of gross errors present in data set. But direct transformation before adjustment leads to parametric equations and following numerical solution complication. Therefore it is also proposed to conduct a reverse transformation from polygon coordinate system into scanner coordinate system as it simplifies further equations linearization and allows simplifying the numerical solution in general. As it is more than one station to be scanned during the calibration process, one cannot simply swap coordinate systems. The polygon coordinate system remains as original one but reverse Helmert transformation is conducted. To prove this approach is correct, three datasets using different laser scanners and high-precise total station were obtained. Direct and reverse transformation between scanners and total station coordinate systems was made for all datasets and MSE of transformation was calculated for each case. Thus, the possibility of using the reverse transformation to optimize the process of the calibration parameters determining has been experimentally proven.

Keywords: TLS; TLS calibration; Kabsch-Umeyama algorithm; Helmert transformation; numerical solution; parametric adjustment.

REFERENCES.

1. Shulʹts R.V. Teoriya i praktyka vykorystannya nazemnoho lazernoho skanuvannya v zadachakh inzhenernoyi heodeziyi: avtoref. dys. ... d-ra tekhnichnykh nauk: 05.24.01 / Kyyivsʹkyy natsionalʹnyy universytet budivnytstva i arkhitektury. Kyyiv, 2012 r. 32 s. {in Ukrainian}

2. Shulʹts R.V., Sossa B.R. Systemne kalibruvannya nazemnykh lazernykh skaneriv: modeli ta metodyky. Visnyk heodeziyi ta kartohrafiyi. Kyyiv, 2015. Vyp.2. C. 25-30. {in Ukrainian}

3. Chow J.C.K., Lichti D.D., Glennie C., Hartzell P. Improvement to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods. *SENSORS*. 2013.№6. P. 7224-7249. режим доступу: http://www.mdpi.com/1424-8220/13/6/7224. {in English}.

4. Kabsch, Wolfgang. A Solution for the Best Rotation to Relate Two Sets of Vectors. Acta Crystallographica, Sept. 1976. International Union of Crystallography, p.922-923, https://doi.org/10.1107/s0567739476001873. {in English}.

5. Lichti D.D. Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam, 2010. Vol.65. pp. 93-102. {in English}.

6. Medic, Tomislav & Holst, Christoph & Kuhlmann, Heiner. (2019). Improving the results of terrestrial laser scanner calibration by an optimized calibration process. *Conference: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019*, Oldenburg, Germany, Wichmann Verlag, Berlin, pp. 36-50. https://www.researchgate.net/publication/332979231_Improving_the_results_ of_terrestrial_laser_scanner_calibration_by_an_optimized_calibration_process. {in English}.

7. Mikhail E. W. Observations and Least Squares. New York: IEP Don-Donnelley, 1976. 497 p. {in English}.

8. Reshetyuk Y. 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, 2009. 174 p. {in English}.

9. Reshetyuk Yuriy, A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanners, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 65, Issue 5, 2010, P. 445-456, ISSN 0924-2716, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.05.005. {in English}.

10. Rietdorf A., Gielsdorf F., Gruendig L. A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *FIG Working Week 2004*, TS26 Positioning and Measurement Technologies and Practices II – Laser Scanning and Photogrammetry, Athens, Greece, May 22-27, 2004. Athens, 2004. P. 2-11. {in English}.

11. Schulz T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences / ETH Zurich. Zurich, 2007. 172 p. {in English}.

12. Umeyama, Shinji. Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13 (4), 1991. p.376–380, doi:10.1109/34.88573. {in English}.