

АНОТАЦІЯ

Сосса Б.Р. Моделі і методи підвищення точності наземного лазерного сканування за даними калібрування. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 193– Геодезія та землеустрій.

Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ; Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2023.

Особливістю інженерно-геодезичних робіт при супроводженні будівництва є підвищені вимоги до їх точності. Наявні технології дозволяють забезпечити цю точність різними способами, одним із яких є наземне лазерне сканування. Проте, попри численні переваги НЛС, точність обладнання у більшості випадків не задовольняє нормативним вимогам. Таким чином, постає практичне завдання підвищення точності даних, отриманих способом наземного лазерного сканування. На сьогодні таким методом підвищення точності являється калібрування.

В першому розділі було проведено огляд сучасних досліджень калібрування наземних лазерних сканерів та визначено основні напрямки подальших досліджень. Визначено, які фактори варто розглядати при вирішенні задачі підвищення точності наземного лазерного сканування. Також проведено короткий огляд сфер застосування НЛС, визначено переваги і недоліки технології.

Проведено попередній розрахунок точності НЛС на підставі задекларованих виробником технічних характеристик для сканерів з фазовим та імпульсним способами вимірювання відстаней і різних типів – панорамних та гібридних.

При аналізі інструментальних похибок НЛС було виділено два основних джерела похибок, які впливають з геометричної моделі сканера – кутомірний та віддалемірний блок. Проведено огляд всіх відомих на сьогодні джерел похибок з метою подальшого вирішення задачі уникнення їх систематичної частини.

Проаналізовано способи визначення систематичної складової шляхом проведення калібрування на спеціально влаштованих калібрувальних полігонах. Зроблено огляд наявних моделей полігонів, визначено їх сильні та слабкі сторони.

Розглянуто тестові об'єкти, що використовуються при калібруванні – їх тип, форма, способи визначення координат. Проведено їх попередню класифікацію.

Безпосередньо, калібрування можна визначити, як процес оцінювання параметрів, які мають бути застосовані для виправлення отриманих вимірів до їх вірних значень. Калібрування НЛС може бути виконане двома методами: за допомогою інструментального або системного калібрування. При використанні *системного калібрування*, на відміну від *інструментального калібрування*, розуміння моделі помилок сканера не настільки важливе. Навпаки, модель помилок (або функції поправок) виводиться в процесі калібрування методом найменших квадратів. Отже, можливо оцінити інструментальні похибки безвідносно їх походження.

В Розділі 2 було проведено ряд досліджень з метою розроблення системного підходу до калібрування та розроблення універсального порядку калібрування, доступного для користувачів НЛС.

Виокремлено складові систематичної похибки визначення координат: *складова систематичної похибки за виміряну відстань, за помилку індекса вертикального круга, за нахил горизонтальної осі обертання дзеркала, за колімацію, за ексцентриситет*. Розроблено модель попереднього оцінювання впливу складових систематичної похибки в розрізі універсальної моделі похибок інструмента. Розглянуто вплив зазначених складових на отримані координати шляхом здійснення апріорного симуляційного моделювання отриманих результатів методом Монте-Карло з внесеною систематичною похибкою (дані до калібрування) та з її відсутністю (дані після калібрування). Враховуючи відсутність метрологічних та технічних вимог до лазерних сканерів, автор виходив з того, що геометрична модель сканера приймається подібною до геометричної моделі тахеометра, а самі прилади мають дуже подібну сферу застосування. Отже, значення складових

систематичної похибки отримувалися з нормативної документації, що стосуються електронного тахеометра з такою ж кутовою точністю і вибиралися як максимально допустимі. Визначено вплив кожної із зазначених складових та доведено значний вплив складової за виміряну відстань у точність визначення координат. Отримані дані підтвердили попередній висновок про необхідність калібрування наземних лазерних сканерів для підвищення їх точності до рівня, достатнього для виконання інженерно-геодезичних робіт.

Для отримання діапазону відстаней, на яких можливо проводити калібрування було проведено дослідження мінімального розміру площинного ТОК та було встановлено мінімально необхідні розміри ТОК для однозначного визначення плоскої, сферичної та циліндричної площини. З урахуванням того, що при падінні лазерного променя на край сфери або циліндру, точність визначення координат може погіршитися, було проведено дослідження з внесенням похибки в одну з точок, що визначають сферу або циліндр та наступним розрахунком кількості точок, необхідних для визначення площини. Розглянуто критерії прийнятності в 5%, 10% і 20% зміщення координат центру відносно зміщення координат точки, в яку внесено похибку. Для задач калібрування НЛС запропоновано використовувати критерій прийнятності в розмірі 10%. Також визначено максимальні відстані до площинних ТОК з урахуванням їх стандартних розмірів та найпоширеніших режимів сканування.

Розглянуто критерії вибору тестових об'єктів та запропоновано використовувати точкові ТОК для проведення калібрування як такі, що дозволяють проведення калібрування віддалемірного блока.

Через наявність у різних моделей сканерів як ручного, так і автоматичного режиму визначення координат марок з хмари точок, запропоновано систему статистичного оцінювання вказаних режимів шляхом порівняння СКП відстаней між точками, що дозволить уникнути впливу похибок переходу між системами координат, та розроблено алгоритм оцінки доброякісності вимірювань з метою вибору оптимального режиму при калібруванні.

Враховуючи відсутність системного підходу до проектування полігонів, розроблено методичні основи проектування калібрувального полігону на основі досліджених типів ТОК та за визначеними максимальними відстанями. За основу проектування запропоновано взяти величини мінімальних вертикальних і горизонтальних кутів між тестовими об'єктами. За розробленими методичними основами було розраховано кількість ТОК і запропоновано їх конфігурацію для заданих мінімальних кутів.

Загальноживана *математична модель калібрування* являє собою параметричну модель з додатковими умовами, в якій використовуються матриці коефіцієнтів умовних рівнянь та коефіцієнтів рівнянь поправок, вектор поправок, вектор параметрів калібрування і вектор нев'язок. Після вирішення системи рівнянь отримуються величини, що використовуються для остаточного калібрування сканера, а саме параметри трансформації між системами координат різних станцій і полігона, значення поправок у виміряні величини для тестових об'єктів, наближенні значення поправок за вплив систематичних похибок. Одним з недоліків цієї моделі є наявність кореляції між параметрами трансформації і параметрами калібрування за рахунок сумісного вирівнювання цих параметрів.

Запропоновано здійснити роздільний розрахунок зазначених параметрів, для чого проведено модифікацію математичної моделі. Для пошуку параметрів трансформації між системами координат полігона та сканера пропонується використовувати алгоритм Кабша-Умеями. Цей алгоритм дозволяє визначити оптимальну матрицю обергання та вектор зміщення між двома системами координат навіть у випадку наявності грубих похибок в координатах точок. При використанні цього алгоритму розраховуються центроїди двох систем координат та зміщення кожної точки відносно центроїдів. З двох отриманих матриць зміщень розраховується коваріаційна матриця. Матрицю повороту отримують як добуток право-сингулярних і транспонованих ліво-сингулярних векторів, отриманих в результаті розкладення коваріаційної матриці за сингулярними числами (SVD).

Після формування параметричних рівнянь зв'язку з урахуванням необхідності трансформації координат з СК сканера в СК полігона було запропоновано спрощення чисельного розв'язку задачі калібрування методом найменших квадратів шляхом проведення оберненої трансформації координат з СК полігона в СК сканера і наступним розрахунком параметрів калібрування через визначену модель впливу систематичних похибок. Також було запропоновано спосіб збільшення повноти даних сканування з метою охоплення більшого кутового та лінійного діапазону в разі виникнення неможливості влаштування повноцінного калібрувального полігону за заданими параметрами. За аналогією з вимірюванням горизонтальних напрямків кутовими прийомами, пропонується провести повторне сканування полігону з поворотом сканера. Таким чином, використовуючи запропоновану модифікацію математичної моделі, кількість точок для обробки і, відповідно, кутів та відстаней збільшується вдвічі, втричі і т.д. Аналогічно, збільшується кількість матриць повороту і векторів зміщення по одному для кожної станції сканування. Також було розглянуто нелінійний спосіб пошуку параметрів калібрування і створено програму в комплексі Mathcad для нелінійного розв'язання цієї задачі.

В Розділі 3 наведено практичну апробацію проведених досліджень та проаналізовано її результати. Для проведення калібрування було створено калібрувальний полігон. Через наявність деяких обмежень не вдалося закріпити всі запроєктовані ТОК, тому сканування відбувалося в два етапи з поворотом сканера. Координати тестових об'єктів калібрування визначено з кожної станції сканування і за допомогою високоточного електронного тахеометра. За розробленою модифікацією математичної моделі було проведено розрахунки лінійним і нелінійним способом як для окремих станцій, так і одночасно для набору з двох станцій. На одній зі станцій було виявлено грубі похибки у вимірюваннях, тому пошук параметрів калібрування проводився для різної кількості точок. За результатами оцінки точності даних до та після проведення калібрування було доведено:

- збільшення повноти даних через поворот сканера дозволяє частково вирішити проблему неможливості закріплення запроєктованих марок і покращує точність визначення параметрів калібрування;
- використання алгоритму Кабша-Умеями дозволяє розрахувати оптимальну матрицю повороту і вектор зміщення при наявності грубих помилок у вимірах та просте для чисельного розв'язання;
- розв'язання задачі пошуку параметрів калібрування лінійним та нелінійним способом дає практично, однакові результати;
- запропонований спосіб визначення параметрів калібрування доступний для користувачів систем НЛС в звичайних умовах без використання високоточного обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення.

Також зроблено загальний висновок про те, що внесення параметрів калібрування у дані, отримані способом НЛС, дозволяє підвищити точність цих систем до рівня, що відповідає нормативним вимогам виконання інженерно-геодезичних робіт при супроводженні будівництва.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, НЛС, калібрування, ЛІДАР, методи дистанційного знімання, просторові дані, системне калібрування, тестові об'єкти калібрування, калібрувальний полігон, інженерно-геодезичні роботи, методика калібрування, підвищення точності, параметричний спосіб вирівнювання, метод найменших квадратів.

SUMMARY

Sossa B.R. Models and methods of terrestrial laser scanning accuracy improvement with calibration data.- Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree in the field of technical sciences with a specialization in 05.24.01– Geodesy, photogrammetry and cartography. Specialized academic council D 26.056.09.

Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education

and Science of Ukraine, Kyiv; Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

A feature of engineering and geodetic works during construction support is increased requirements for their accuracy. Available technologies allow to obtain this accuracy in a variety of ways, one of which is terrestrial laser scanning. However, despite the numerous advantages of TLS, the accuracy of the equipment in most cases does not meet regulatory requirements. Thus, there is a practical task of increasing the accuracy of data obtained by the method of terrestrial laser scanning. Today, such a method of increasing accuracy is calibration.

In the first Section, an overview of modern research on the calibration of terrestrial laser scanners was conducted and the main directions of further research were determined. It is determined which factors should be considered when solving the problem of increasing the accuracy of terrestrial laser scanning. A brief review of the areas of TLS application was also conducted, the advantages and disadvantages of the technology were determined.

A preliminary calculation of the accuracy of the TLS was carried out on the basis of the technical characteristics declared by the manufacturer for scanners with phase and pulse methods of measuring distances and of various types - panoramic and hybrid.

During the analysis of the TLS' instrumental errors two main sources of errors were identified, which arise from the geometric model of the scanner - the angle-measuring and distance-measuring blocks. An overview of all currently known sources of errors was carried out in order to further solve the problem of avoiding their systematic part. The methods of determining the systematic component by carrying out calibration on specially arranged calibration polygons were analyzed. An overview of existing polygons models was made, their strengths and weaknesses were determined.

Test objects used in calibration are considered - their type, shape, methods of determining coordinates. Their preliminary classification was carried out.

Directly, calibration can be defined as the process of estimating the parameters that should be applied to correct the obtained measurements to their true values. Calibration

of TLS can be performed by two methods: with instrumental or system calibration. When using system calibration, unlike instrument calibration, understanding the scanner's error sources is not as important. On the contrary, the error model (or correction function) is derived during the calibration process by the method of least squares. Therefore, it is possible to estimate instrumental errors regardless of their origin.

In Section 2, a number of studies were conducted to develop a systematic approach to calibration and to develop a universal calibration procedure available to TLS users.

The components of the systematic error of determining the coordinates are singled out: the component of the systematic error for the measured distance, for the error of the vertical circle index, for the trunnion axis error, for collimation, for eccentricity. A model of the preliminary assessment of the influence of the components of the systematic error in the context of the universal model of instrument errors has been developed. The effect of the specified components on the obtained coordinates was considered by performing a priori simulation modeling of the obtained results using the Monte Carlo method with simulated systematic error (data before calibration) and with its absence (data after calibration). Given the lack of metrological and technical requirements for laser scanners, the author assumed that the geometric model of the scanner is assumed to be similar to the geometric model of the total station, and the devices themselves have a very similar scope of application. Therefore, the values of the components of the systematic error were obtained from the regulatory documentation relating to the electronic total station with the same angular accuracy and were chosen as the maximum permissible. The influence of each of the specified components was determined and the significant influence of the component for the measured distance on the accuracy of coordinate determination was proved. The obtained data confirmed the previous conclusion about the need to calibrate terrestrial laser scanners to increase their accuracy to a level sufficient for engineering and geodetic works.

In order to obtain a range of distances at which it is possible to carry out calibration, a study of the minimum size of the planar CTO was conducted and the minimum necessary dimensions of the CTO were established for the unambiguous determination of a flat,

spherical and cylindrical plane. Taking into account the fact that when a laser beam falls on the edge of a sphere or cylinder, the accuracy of determining the coordinates may deteriorate, a study was conducted with the simulation of an error in one of the points defining the sphere or cylinder and the subsequent calculation of the number of points needed to determine the plane. Acceptability criteria of 5%, 10%, and 20% of the center coordinates offset relative to the offset of the coordinates of the point in which the error was simulated were considered. It is proposed to use a 10% acceptance criterion for TLS calibration problems. The maximum distances to planar CTOs are also determined, taking into account their standard sizes and the most common scanning modes.

The criteria for the selection of test objects were considered and it was proposed to use point targets for calibration as those that allow the calibration of the EDM unit.

Due to the availability of both manual and automatic modes of determining the targets coordinates from the point cloud in various models of scanners, a system of statistical evaluation of these modes is proposed by comparing the MSE of distances between points, which will avoid the influence of transition errors between coordinate systems, and an algorithm for assessing the quality of measurements as well as choose the optimal mode during calibration.

Taking into account the lack of a systematic approach to the design of polygons, methodological bases for the design of a calibration polygon have been developed based on the investigated types of CTO and according to the determined maximum distances. It is proposed to take the values of the minimum vertical and horizontal angles between the test objects as the basis of the design. According to the developed methodical bases, the number of CTO was calculated and their configuration was proposed for the specified minimum angles.

The commonly used mathematical model of calibration is a parametric model with additional conditions, which uses matrices of conditional equations coefficients and coefficients of correction equations, a corrections vector, a vector of parameters for self-calibration, and a residuals vector. After solving the system of equations, the values used for the final calibration of the scanner are obtained, namely the parameters of the transition

between the coordinate systems of different stations, the value of corrections to the measured values for the reference points, the approximate value of the corrections due to the influence of systematic errors. One of the disadvantages of this model is the presence of a correlation between the transition parameters and the calibration parameters due to the compatible alignment of these parameters.

It is proposed to carry out a separate calculation of the specified parameters, for which a modification of the mathematical model was carried out. To find the parameters of the transformation between the coordinate systems of the polygon and the scanner, it is suggested to use the Kabsh-Umeyama algorithm. This algorithm allows one to determine the optimal rotation matrix and transition vector between two coordinate systems even in the presence of gross errors in the coordinates of the points. When using this algorithm, the centroids of two coordinate systems and the displacement of each point relative to the centroids are calculated. The covariance matrix is calculated from the two displacement matrices obtained. The rotation matrix is obtained as a product of right-singular and transposed left-singular vectors obtained as a result of the covariance matrix singular value decomposition (SVD).

After the formation of the parametric equations, taking into account the need to transform the coordinates from the CS of the scanner to the CS of the polygon, it was proposed to simplify the numerical solution of the calibration problem by the method of least squares by carrying out the inverse transformation of the coordinates from the CS of the polygon to the CS of the scanner and then computing for the calibration parameters through the defined errors model. A method of increasing the completeness of the scanning data was also proposed in order to cover a larger angular and linear range in case of impossibility of setting up a complete calibration polygon according to the specified parameters. By analogy with the measurement of horizontal directions using angular techniques, it is suggested to re-scan the polygon with the scanner turned around. Thus, using the proposed modification of the mathematical model, the number of processing points and, accordingly, the angles and distances are doubled, tripled, etc. Similarly, the number of rotation matrices and displacement vectors increases by one for each scanning

station. A non-linear method of finding calibration parameters was also considered and a program was written in the Mathcad software for the non-linear solution of this problem.

Section 3 provides a practical approbation of the conducted research and analyzes its results. A calibration test site was created for calibration. Due to the presence of some limitations, it was not possible to fix all the designed CTOs, so the scanning took place in two stages with the rotation of the scanner. The coordinates of the calibration test objects were determined from each scanning station and with the high-precision electronic total station. According to the developed modification of the mathematical model, calculations were carried out in a linear and non-linear way both for individual stations and simultaneously for a set of two stations. Gross errors in measurements were found at one of the stations, so the computing for calibration parameters was carried out for a different number of points. According to the results of the assessment of the accuracy of the data before and after the calibration, it was proved:

- increasing the completeness of the data due to the rotation of the scanner allows to partially solve the problem of the impossibility of fixing the designed targets and improves the accuracy of determining the calibration parameters;
- the use of the Kabsh-Umeyam algorithm allows one to calculate the optimal rotation matrix and transition vector in the presence of gross errors in measurements and simple numerical solution;
- solving the problem of computing calibration parameters in a linear and non-linear way gives practically the same results;
- the proposed method of determining calibration parameters is available to end-users of TLS systems in normal conditions without the use of high-precision equipment and specialized software.

A general conclusion was also made that using the calibration parameters into the data obtained by the TLS method allows to increase the accuracy of these systems to the level that meets the regulatory requirements for the performance of engineering and geodetic works during construction support.

Key words: terrestrial laser scanning, TLS, calibration, LIDAR, remote sensing, spatial data, system calibration, calibration test objects, calibration test site, engineering surveying, calibration method, accuracy improvement, parametric adjustment, least squares method.