

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
СОССИ БОГДАНА РОСТИСЛАВОВИЧА

«Методи і моделі підвищення точності наземного лазерного сканування за даними калібрування»

представлену на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
193 – Геодезія та землеустрій

Детальне вивчення дисертації СОССИ Богдана Ростиславовича «МЕТОДИ І МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ЗА ДАНИМИ КАЛІБРУВАННЯ» та його наукових публікацій дозволяє зазначити наступні результати щодо оцінки їх наукового рівня, актуальності, обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх наукової новизни, практичного значення, а також загальної оцінки роботи.

Актуальність обраної теми

представленого дисертаційного дослідження обумовлюється відсутністю системного підходу до калібрування наземних лазерних сканерів та загальноновживаного алгоритму калібрування.

Основною особливістю інженерно-геодезичних робіт при супроводженні будівництва є підвищені вимоги до їх точності. Проте, попри численні переваги НЛС, точність навіть сучасного обладнання у більшості випадків не задовольняє нормативним вимогам. Отже, постає практичне завдання підвищення точності даних, отриманих способом наземного лазерного сканування.

Для України наразі це є особливо важливим в зв'язку з необхідністю у відбудові післявоєнних руйнувань. За умови підвищення точності даних наземного лазерного сканування до нормативних вимог стане можливим використовувати всі переваги технології НЛС, що сприятиме швидкому відродженню та сталому розвитку країни.

Тому, тема дисертаційного дослідження СОССИ Богдана Ростиславовича є безумовно, актуальною та своєчасною. Проведеними дослідженнями сформовано системний підхід до калібрування з урахуванням впливу переважної більшості чинників, що впливають на точність вимірювань.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційного дослідження

доводить здійснений здобувачем комплексний аналіз чинників, що впливають на точність даних, отриманих способом наземного лазерного сканування та можливість врахування їх впливу. Досліджено та систематизовано значний обсяг із 139 джерел, що містять теоретичні аспекти та практичний досвід калібрування наземних лазерних сканерів. Слід виділити запропоновані СОССОЮ Богданом Ростиславовичем методичні основи проектування калібрувальних полігонів за попередньо заданими мінімальними кутівими відстанями між тестовими

об'єктами та модифікацію математичної моделі калібрування, яка походить з фотограмметрії, що дозволяє уникнути кореляції між параметрами трансформації між системами координат та параметрами калібрування при вирівнюванні.

Належний рівень обґрунтованості запропонованих здобувачем наукових положень забезпечується грамотним використанням загальнонаукових та спеціальних методів, що дало змогу авторові досягти поставленої мети дослідження.

Достовірність основних положень

підтверджується:

- результатами, отриманими автором при здійсненні комплексного критичного аналізу теоретичних робіт і практичного досвіду за обраною тематикою;
- застосуванням для проведення дослідження загальних та спеціальних наукових методів (порівняльного аналізу, узагальнення, систематизації, класифікації, загальної теорії аналітичної фотограмметрії, математичної статистики, теорії похибок вимірювань, методу найменших квадратів, теорії матриць, лінійного чисельного і нелінійного способів параметричного вирівнювання, теорії прямого лінійного перетворення);
- широким оприлюдненням і позитивною оцінкою на міжнародних конференціях та у рецензованих фахових вітчизняних і закордонних виданнях;
- апробацією в навчальний процес кафедри інженерної геодезії Київського національного університету будівництва та архітектури під час підготовки бакалаврів та магістрів спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій», спеціалізацій «Геодезія» і «Геоінформаційні системи та технології» при викладанні курсу інженерної фотограмметрії та інженерної геодезії;
- впровадженням у виробничі процеси ПП «Геодезична інжинірингова агенція» при проведенні перевірки та калібрування наземного лазерного сканера для виконання робіт зі сканування мостового переходу через річку Дніпро.

Отже, наведені аргументи доводять, що отримані основні положення дисертації достовірні і науково обґрунтовані, а також відповідають меті і завданням дослідження. Їх ґрунтовне опрацювання свідчать про високий рівень наукової підготовки дисертанта.

Наукова новизна одержаних результатів

До найбільш важливих досягнень дисертаційної роботи, що мають вагому наукову новизну, слід віднести такі:

- уперше визначено вплив складових систематичної похибки та їх сумарний ефект на точність отриманих даних безвідносно типу інструмента;
- уперше розроблено методичні засади проектування калібрувального полігону за попередньо заданими параметрами, а також досліджено

- залежність між мінімальними розмірами площинних тестових об'єктів та відстанню, на якій можливо проводити калібрування;
- удосконалено математичну модель калібрування, що дозволило уникнути кореляції між параметрами перетворення систем координат і параметрами калібрування;
 - удосконалено метод системного калібрування даних, отриманих способом наземного лазерного сканування, що дозволило підвищити точність отриманих даних.

Практичне значення дослідження

Результати дисертаційного дослідження СОССИ Богдана Ростиславовича мають суттєве практичне значення та можуть бути використані в інженерно-геодезичній практиці для підвищення точності даних наземного лазерного сканування до нормативних вимог, що дозволить використовувати всі переваги технологій НЛС при геодезичному супроводженні будівництва та реконструкції.

На окрему увагу заслуговує проведене комплексне дослідження та розроблені автором на його основі рекомендації з вибору тестових об'єктів калібрування, відстанях і конфігурації їх розміщення з урахуванням факторів, що впливають на точність визначення їх координат. Також, запропонована модифікація математичної моделі калібрування може бути використана при калібруванні фотограмметричних камер.

Повнота викладу матеріалів в опублікованих працях

за темою дисертаційного дослідження є достатньою. Їх зміст відповідає заявленим завданням, об'єкту і предмету дослідження. Основні наукові результати опубліковано в 12-ти наукових публікаціях, з яких 4 є одноосібними, а саме: у 10-ти статтях наукових фахових виданнях України категорії «Б», одна в періодичному науковому виданні, проіндексованому у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus (Q3) та в одній тезі доповідей міжнародних конференцій. Слід зазначити, що якість і кількість здійснених автором публікацій повністю відповідає вимогам п.8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

Оцінка змісту, стилю та мови дисертації, її завершеності, оформлення

Представлена до розгляду дисертаційна робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 192 сторінки, із них: 130 сторінок основного тексту, ілюстрованого 59 рисунками та 28 таблицями, з яких на окремих сторінках 1 рисунок; список використаних джерел зі 139 найменувань на 18 сторінках, 2 додатки на 23 сторінках, з них один акт впровадження.

У **вступі** автором викладено актуальність теми дослідження. Визначена мета відповідає обраній темі і розкрита в завданнях. Предмет дослідження повністю

узгоджений з назвою роботи і з об'єктом дослідження. Є логічними використані методи. Систематизовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Показано їх апробацію.

У першому розділі **«Аналіз сучасних підходів до підвищення точності наземного лазерного сканування»** автором проведено огляд сучасних досліджень калібрування наземних лазерних сканерів та визначено основні напрямки наступних 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 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.

У другому розділі **«Теоретичні основи калібрування наземних лазерних сканерів»** здобувачем було проведено ряд досліджень з метою розроблення системного підходу до калібрування та розроблення універсального порядку калібрування, доступного для користувачів НЛС. Так, автором 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).

Заслугове на увагу дослідження мінімального розміру площинного тестового об'єкту калібрування (ТОК) та встановлення мінімально необхідних розмірів ТОК для однозначного визначення плоскої, сферичної та циліндричної площини з внесенням похибки в одну з точок, що визначають сферу або циліндр та наступним розрахунком кількості точок, необхідних для визначення площини.

Автором розроблено методичні основи проектування калібрувального полігону на основі досліджених типів ТОК та за визначеними максимальними відстанями. За основу проектування ним запропоновано взяти величини мінімальних вертикальних і горизонтальних кутів між тестовими об'єктами.

Здобувачем запропоновано здійснити роздільний розрахунок параметрів трансформації та калібрування, для чого проведено модифікацію математичної моделі. Для пошуку параметрів трансформації між системами координат полігона

та сканера ним пропонується використовувати алгоритм Кабша-Умеями. Цей алгоритм дозволяє визначити оптимальну матрицю обертання та вектор зміщення між двома системами координат навіть у випадку наявності грубих похибок в координатах точок.

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 автором було розглянуто нелінійний спосіб пошуку параметрів калібрування і створено програму в комплексі Mathcad для нелінійного розв'язання цієї задачі.

У третьому розділі «Експериментальні дослідження підвищення точності наземного лазерного сканування шляхом калібрування» автором проведено практичну апробацію проведених досліджень та проаналізовано її результати. За розробленою модифікацією математичної моделі було проведено розрахунки лінійним і нелінійним способом як для окремих станцій, так і одночасно для набору з двох станцій.

Одним з важливих висновків є той, що розв'язання задачі пошуку параметрів калібрування лінійним та нелінійним способом дає практично, однакові результати. 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.

Узагальнюючи оцінку представленої роботи, слід виділити її, на нашу думку, **основні здобутки:**

- проведено докладний аналіз методів і моделей підвищення точності наземного лазерного сканування за даними калібрування; удосконалено метод системного калібрування наземних лазерних сканерів, що дозволить використовувати технології наземного лазерного сканування при більшості робіт під час геодезичного супроводження будівництва;
- проведено дослідження та встановлено залежність між відстанню до сканера та формою і розміром тестового об'єкту калібрування для проведення калібрування; визначено максимально можливі відстані проведення калібрування по стандартним площинним об'єктам; обґрунтовано критерії вибору типу ТОК для проведення калібрування;
- проведено модифікацію математичної моделі калібрування з розділенням її на два етапи: перетворення координат між системами координат за алгоритмом Кабша-Умеями і, безпосередньо, калібрування, що дозволяє суттєво спростити процес розрахунку додаткових параметрів та позбутися кореляції між параметрами перетворення і параметрами калібрування.

Разом з цим, варто зазначити деякі зауваження і побажання:

Автор справедливо і досить часто вказує на подібність калібрування фотограмметричних і сканерних систем. Тому дозволимо собі в нижче поданому тексті називати точки калібрувального полігону "опорними точками", як це прийнято в фотограмметрії.

Зауваження такі.

1. Калібрування сканерів проведено на полігоні обмежених розмірів, так що максимальна відстань від сканера до "опорної точки" становить 14-15 м. Можна допустити, що при більших відстанях параметри калібрування будуть дещо іншими. Таке явище спостерігається при калібруванні фотографічних систем. Зрозуміло, що створення калібрувального полігону великих розмірів надто важка задача, але цікаво було би знати позицію автора .

2. Якщо виходити з концепції, що результатом сканування є просторова модель реального об'єкту, то задача калібрування зводиться до:

- визначення параметрів орієнтації цієї моделі у вибраній системі координат об'єкта та її масштабу ,

- встановлення параметрів деформації цієї моделі.

В такому трактуванні на першому етапі треба визначати сім параметрів абсолютного орієнтування моделі, бо лінійні виміри , на які посилається автор , не визначають масштаб моделі. Це віддалі від сканера до "опорних точок", а не віддалі на моделі між "опорними точками" .

3. Рис. 3.1. не дає схематичного представлення про розміщення станцій сканування та "опорних точок" на калібрувальному полігоні , а, як відомо, геометрія такого взаємного розташування суттєво впливає на кінцевий розв'язок задачі калібрування. Краще було би подати полігон у вигляді паралелепіпеда, а не прямокутника.

4. В формулах зустрічаються описки. Наприклад, у виразі 2.60 в правій частині рівняння фігурує величина "i", але ж це зовсім не визначуваний параметр. В формулах 2.46 та 2.49 неправильно вказані номери точок.

5. Бажано було би в огляді літературних джерел більше уваги приділяти вітчизняним дослідженням з даної проблематики.

Вказані зауваження не впливають на загальний високий науковий рівень представленої дисертаційної роботи, яку виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Відповідність дисертації вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії»

Дисертація СОССИ Богдана Ростиславовича «Методи і моделі підвищення точності наземного лазерного сканування за даними калібрування» повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», зокрема, пунктам 5, 6, 7, 8, 9. Робота є його особистою працею, а отримані теоретичні і практичні результати свідчать про вагомий особистий внесок автора у вітчизняну науку.

Загальний висновок

Дисертаційна робота СОССИ Богдана Ростиславовича «Методи і моделі підвищення точності наземного лазерного сканування за даними калібрування» є завершеною науковою працею, яка має значну наукову новизну та практичну цінність і являється потужним вкладом в теорію досліджень калібрування наземних лазерних сканерів. Дану роботу представлено на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 – Геодезія та землеустрій, вона повністю відповідає «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 та напрямку освітньо-наукової програми КНУБА з зазначеної спеціальності, а її автор – СОССА Богдан Ростиславович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 – Геодезія та землеустрій.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук,
професор кафедри фотограмметрії та геоінформатики
НУ Львівська Політехніка МОН України

О.Л. Дорожинський



Р. Брацелівський