

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

Детальний аналіз дисертаційної роботи СОССИ Богдана Ростиславовича **«МЕТОДИ І МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ЗА ДАНИМИ КАЛІБРУВАННЯ»**, його наукових публікацій, дозволяє зробити висновки щодо актуальності, наукового рівня, обґрунтованості наукових положень, наукової новизни, висновків і рекомендацій, практичного значення і загальної оцінки роботи.

1. Актуальність теми

Актуальність теми дисертаційного дослідження обумовлюється тим, що незважаючи на численні переваги технологій наземного лазерного сканування (НЛС), точність обладнання у більшості випадків не задовольняє нормативним вимогам. В сучасних дослідженнях відсутній системний підхід до калібрування наземних лазерних сканерів.

Враховуючи те, що за умови підвищення точності даних наземного лазерного сканування до нормативних вимог, буде можливість використовувати всі переваги технології НЛС при будівництві та реконструкції, а також для топографічних знімачів різних масштабів, що для нашої держави є особливо важливим. Підвищення точності НЛС дозволить використовувати ці технології в найрізноманітніших галузях, що потребують підвищеної точності, що, в свою чергу, сприятиме швидкому відродженню та сталому розвитку країни.

У зв'язку з цим тема дисертаційного дослідження СОССИ Богдана Ростиславовича є безперечно, актуальною та своєчасною. Проведені дослідження дозволили сформулювати системний підхід до калібрування наземних лазерних сканерів з урахуванням впливу більшості чинників, що складають систематичну похибку вимірювань.

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційного дослідження

У дослідженні проаналізовані фактори, які впливають на точність наземного лазерного сканування, визначено можливість урахування впливу систематичної похибки. Систематизовані та обґрунтовані 139 джерел, які включають теоретичні і практичні положення щодо калібрувань наземних лазерних сканерів.

Автором дисертаційного дослідження запропоновані критерії вибору тестових об'єктів калібрування, відстаней і конфігурації їх розміщення з урахуванням факторів, які впливають на точність визначення їхніх координат, та модифікацію математичної моделі калібрування, що дозволяє зменшити кореляцію між параметрами трансформації систем координат та параметрами калібрування при параметричному вирівнюванні.

Здобувач забезпечив належний рівень обґрунтованості запропонованих наукових положень на основі грамотного використання загальнонаукових та спеціальних методів, що дозволило досягти поставленої мети дослідження.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Вагому наукову новизну мають наступні одержані результати:

- детально досліджено та вперше визначено вплив систематичної похибки на точність отриманих даних без прив'язки до типу інструмента і способу вимірювання відстаней;
- обґрунтовано та запропоновано алгоритм проектування калібрувального полігону за заданими параметрами, досліджена залежність між розмірами тестових об'єктів для калібрування й відстанями, на яких доцільно проводити калібрування;
- удосконалено математичну модель калібрування, що дозволило уникнути кореляції між параметрами перетворення систем координат і параметрів калібрування;
- удосконалено метод системного калібрування наземних лазерних сканерів, що дозволило підвищити точність отриманих даних.

4. Достовірність основних положень

Достовірність основних положень, викладених у роботі, підтверджується наступним:

- висновками, отриманими автором при аналізі теоретичних робіт і практичних напрацювань за обраною тематикою;
- застосуванням у дослідженні загальних та спеціальних наукових методів: порівняльного аналізу, узагальнення, систематизації, класифікації, загальної теорії аналітичної фотограмметрії, математичні статистики, теорії похибок вимірювань, методу найменших квадратів, теорії матриць, лінійного чисельного і нелінійного способу параметричного вирівнювання, теорії прямого лінійного перетворення;
- апробацією результатів досліджень у навчальному процесі 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 перевірці та калібруванні наземного лазерного сканера для виконання робіт зі сканування мостового переходу через річку Дніпро.

Отже, наведені аргументи свідчать про те, що основні положення дисертації достовірні й науково обґрунтовані. Також слід зазначити, що основні положення відповідають меті і завданням дослідження. Про високий рівень наукової підготовки дисертанта свідчить ґрунтовність опрацювання зазначених положень.

5. Практичне значення одержаних результатів

Результати дисертаційного дослідження СОССИ Богдана Ростиславовича можуть бути використані в інженерно-геодезичній, топографічній практиці для підвищення точності даних наземного лазерного сканування до нормативних вимог, що дозволить використовувати всі переваги технологій НЛС при геодезичному супроводженні будівництва та реконструкції, в тому числі, у повоєнному відновленні, зніманнях земної поверхні для різноманітних задач. Робота має високе практичне значення.

До суттєвих практичних досягнень роботи належать:

- обґрунтування алгоритму вибору розміру та типу тестових об'єктів калібрування для різних умов та моделей наземного лазерного сканування, що можуть бути використані для калібрування та реєстрації сканів;
- оптимізація процесу калібрування наземних лазерних сканерів для користувача шляхом використання модифікованої математичної моделі та універсального порядку калібрування.

6. Повнота викладу матеріалів в опублікованих працях

За темою дисертаційного дослідження здобувачем опубліковані 12 наукових публікацій: 10 із них – статті в наукових фахових виданнях України категорії «Б», 1 – в періодичному науковому виданні, проіндексованому в базах даних Web of Science Core Collection та Scopus (Q3) та 1 тези доповідей міжнародних конференцій. Із зазначених публікацій 4 є одноосібними. Кількість публікацій за темою є достатньою. Їхній зміст відповідає заявленим завданням, об'єкту і предмету дослідження. Якість і кількість 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».

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

Представлена до розгляду дисертаційна робота складається з таких частин: анотації, вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел зі 139 найменуваннями і додатками. Загальний обсяг роботи складає 192 сторінки, із яких 130 сторінок основного тексту, 59 рисунків, 28 таблиць, перелік використаних джерел міститься на 18 сторінках, 2 додатки на 23 сторінках. Додаток 1 містить програму для математичного програмного комплексу Mathcad, Додаток 2 – Акт впровадження.

У **вступі** автором обґрунтована актуальність теми дослідження. Визначено мету дослідження, що відповідає обраній темі і яку розкрито в завданнях дослідження. Предмет дослідження узгоджено з назвою роботи та об'єктом дослідження. Визначено наукову новизну дослідження і його практичне значення. Відображено апробацію отриманих результатів.

Перший розділ **«Аналіз сучасних підходів до підвищення точності наземного лазерного сканування»** включає огляд сучасних досліджень, пов'язаних з калібруванням наземних лазерних сканерів. На підставі їхнього аналізу поставлені основні завдання подальших досліджень. Визначені фактори, які необхідно брати до уваги при вирішенні задачі підвищення точності наземного лазерного сканування. Автором проведено огляд сфер застосування НЛС, визначені переваги й недоліки використання технології.

На підставі задекларованих виробником технічних характеристик автором проведено попередній розрахунок точності НЛС, при цьому розглядалися сканери з різними способами вимірювання відстаней.

Проведено аналіз інструментальних похибок, досліджені їхні джерела, що містять основні систематичні похибки – кутомірний та віддалемірний блок. На основі аналізу джерел похибок було визначено завдання для вирішення задачі уникнення їхньої систематичної складової. Проведено аналіз способів визначення систематичної складової на основі калібрування, проведеного на спеціально влаштованих калібрувальних полігонах. Проаналізовані наявні моделі полігонів, визначені їхні позитивні й негативні сторони. Розглянуті тестові об'єкти для калібрування (ТОК), зокрема: тип, форма, способи визначення координат. Проведено попередню класифікацію тестових об'єктів.

Другий розділ **«Теоретичні основи калібрування наземних лазерних сканерів»** включає результати досліджень, проведених з метою обґрунтування системного підходу до калібрування, та можливості розроблення універсального порядку калібрування, доступного для користувачів НЛС. Автором розроблено модель попереднього оцінювання впливу складових систематичної похибки. Розглянуто вплив зазначених складових на отримані координати шляхом здійснення апріорного симуляційного моделювання отриманих результатів методом Монте-Карло. Даними до калібрування визначалися ті, які містили внесену систематичну похибку, дані після калібрування її не мали.

Досліджено мінімальний розмір площинного ТОК, встановлені мінімально допустимі розміри для однозначного визначення плоскої, сферичної та циліндричної площини. Проведено моделювання уведення похибки в одну з точок, що визначає площинний об'єкт та розраховано кількість точок, необхідних для визначення площини. Запропоновано алгоритм проектування калібрувального полігону на основі досліджених типів і розмірів ТОК та за попередньо розрахованими максимальними відстанями.

Заслуговує на увагу пропозиція здобувача проводити роздільний розрахунок параметрів трансформації між системами координат сканера і полігона та параметрів калібрування. Для цього модифіковано загальноновживану математичну модель. Для визначення параметрів трансформації автором запропоновано використовувати алгоритм Кабша-Умеями, який дозволяє отримати параметри трансформації навіть у випадку наявності грубих похибок у вимірах.

Здобувачем запропоновано спрощення чисельного розв'язку задачі калібрування за допомогою методу найменших квадратів на основі зворотної трансформації координат між системами координат сканера і полігона. Розрахунок параметрів калібрування проводився за допомогою запропонованої моделі впливу систематичних похибок. У роботі також досліджений нелінійний спосіб вирівнювання під час пошуку параметрів калібрування. Розроблено програму для математичного комплексу Mathcad, яка дозволяє вирішити цю задачу нелінійним способом.

Третій розділ **«Експериментальні дослідження підвищення точності наземного лазерного сканування шляхом калібрування»** включає практичну апробацію результатів досліджень та аналіз отриманих результатів експерименту. На основі розроблених методичних основ автором запроєктовано калібрувальний полігон, проведено розрахунки лінійним і нелінійним способом з використанням модифікованої математичної моделі. В результаті отримані параметри калібрування, які внесені у вихідні дані.

Позитивним є те, що запропонований спосіб визначення параметрів калібрування доступний для користувачів систем НЛС в звичайних умовах без використання високоточного обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення. Обґрунтований загальний висновок щодо підвищення точності систем НЛС шляхом внесення параметрів калібрування в отримані дані. Таким чином, за допомогою калібрування можна підвищити точність наземних лазерних сканерів до рівня, що відповідає нормативним вимогам виконання інженерно-геодезичних робіт.

8. Узагальнюючи оцінку представленої роботи, доцільно визначити наступні здобутки:

– проаналізовані існуючі методи й моделі калібрування наземних лазерних сканерів різних типів, результати якого визначили необхідність і

доцільність удосконалення математичних моделей похибок НЛС та розроблення універсальної методики калібрування;

– досліджені варіанти впливу складових систематичної похибки. На основі методу математичного моделювання визначено їхній вплив на кінцевий результат; встановлено, що при врахуванні систематичних похибок, як параметрів калібрування, точність сканування істотно підвищується;

– розроблений універсальний порядок калібрування для практичного використання, який дозволяє проводити калібрування незалежно від типу сканера, способу вимірювання відстаней. Автором запропоновано методику внесення параметрів калібрування у результати спостережень.

Зауваження й побажання

Доцільно зазначити певні зауваження та побажання:

1. У дисертаційній роботі проведений аналіз технологій лазерного сканування. Поряд з цим практично відсутній огляд досліджень точності мобільного та повітряного лазерного сканування;
2. Потребує обґрунтування терміну "інструментального калібрування" та порівняння його змісту з існуючим терміном, який використовують в іноземних джерелах як "component calibration";
3. Автором встановлені максимальні відстані до тестових об'єктів калібрування з урахуванням наявності похибки в одній із вимірних точок, що визначають поверхню. Поряд з цим дисертант обмежився лише сферичними й циліндричними поверхнями, не розглянувши плоскі площинні поверхні.

Зазначені зауваження й побажання не зменшують загальний високий науковий рівень представленої роботи. Дисертацію виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Відповідність дисертації вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії».

Незважаючи на окремі дискусійні питання, дисертація **СОССИ Богдана Ростиславовича** «Методи і моделі підвищення точності наземного лазерного сканування за даними калібрування» повністю відповідає вимогам пунктів 5, 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Дисертаційне дослідження є його особистою роботою, а теоретичні й практичні результати дослідження вказують на суттєвий особистий внесок автора в українську науку.

Загальний висновок

Дисертація СОССИ Богдана Ростиславовича «Методи і моделі підвищення точності наземного лазерного сканування за даними калібрування» є завершеною науковою працею, яка містить суттєву наукову новизну та практичну цінність. Дана робота може вважатися вагомим внеском в теорію досліджень калібрування наземних лазерних сканерів. 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 КНУБіА із зазначеної спеціальності, а її автор – **СОССА Богдан Ростиславович** заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 – Геодезія та землеустрій.

Офіційний опонент,
д-р техн. наук, професор,
провідний науковий співробітник
відділу геоінформаційних технологій в дистанційному
зондуванні Землі ДУ «Науковий центр
аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України»

 С.С. Кохан


завідувач
учасник
аерокосмічних досліджень Землі
р.т.н., аспірант


ДУ «Науковий центр
аерокосмічних досліджень Землі ІТН НАН України»
 А.В. Кухменко