

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури

**Гончерюк Олеся Михайлівна**

УДК 517

**МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ НАЗЕМНОГО  
ЦИФРОВОГО ФОТОГРАММЕТРИЧНОГО ЗНІМАННЯ ДЛЯ  
МОНІТОРИНГУ ПАМ'ЯТОК АРХІТЕКТУРИ**

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ-2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор **Шульц Роман Володимирович**, Київський національний університет будівництва і архітектури, декан факультету Геоінформаційних систем та управління територіями.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, доцент **Уль Анна Володимирівна**, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, завідувач кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру;

кандидат технічних наук **Малік Тетяна Миколаївна**, ПВНЗ Університет новітніх технологій, доцент кафедри геодезії, землеустрою і екології.

Захист відбудеться «25» жовтня, о 10<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.09 в Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: Повітрофлотський проспект, 31, ауд.319, м. Київ, 03037.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: Повітрофлотський проспект, 31, м. Київ, 03037.

Автореферат розісланий «24» вересня 2019 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент



О.П. Ісаєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблема моніторингу пам'яток архітектури відноситься до однієї з найактуальніших у сучасному світі. Розвиток великих міст в яких пам'ятки архітектури знаходяться під загрозою знищення вимагає розроблення сучасної і ефективної технології їх документації та моніторингу стану. Створення такої технології можливе із використанням недорогих засобів отримання цифрових зображень та дешевих програмних засобів, які у сукупності отримали назву low-cost фотограмметрії.

Широке впровадження у сферу наземної фотограмметрії недорогих цифрових фотокамер призвело до появи та розроблення принципово нових методик та технологій фотограмметричних робіт. Якщо для цифрових аерофотознімальних комплексів геометрія фотокамери є або відомою, або параметри геометрії є достатньо стабільними в часі, то для наземної цифрової фотограмметрії характерним є використання цифрових неметричних камер, а в теперішній час камер, що вбудовані у смартфони та планшети. Вартість цифрових аерофотознімальних комплексів та об'єми виконуваних ними робіт дозволяють виробникам використовувати складні багатокомпонентні об'єктиви, високоякісні ПЗЗ-матриці або ПЗЗ-лінійки та високоякісні корпуси для аерофотокамер. У випадку вирішення завдань моніторингу незначних за розміром об'єктів, таких якими здебільшого є об'єкти архітектури, вартість знімального обладнання дуже часто є одним з вагомих факторів, тому для знімання у переважній більшості випадків використовують тільки цифрові неметричні камери. В такому випадку на перше місце виходить проблема калібрування цифрових неметричних камер. На теперішній час розроблено величезну кількість варіантів калібрування. Ці варіанти відрізняються за: методом калібрування; типом тестового об'єкту; методом калібрування; математичною моделлю врахування дисторсії та ін. Отже актуальним є завдання вибору оптимальної технології калібрування з урахуванням перерахованих вище факторів.

Особливості цифрових неметричних камер не дозволяють використовувати відомі математичні моделі попереднього розрахунку точності та обчислення параметрів фотографування. У випадку моніторингу пам'яток архітектури питання точності та оптимального проектування робіт мають особливе значення, оскільки доволі часто знімання доводиться проводити у стиснених умовах, а геометрія знімання характеризується наявністю екстремальних значень елементів зовнішнього орієнтування (кутів).

Проблемі моніторингу пам'яток архітектури засобами наземної фотограмметрії приділено уваги у роботах вітчизняних та закордонних вчених, а саме: В.М. Сердюкова, О.Л. Дорожинського, В.М. Глотова, В.А. Середовича, А. Вайнаукаса, Л.І. Іванової, Г.А. Патиченко, В.О. Катушкова, С.Г. Могильного, А.В. Шостак, A. Grun, S.F. El-Hakim, F. Remondino, T. Luhmann. Особливо слід відмітити роботи закордонних вчених, що займаються дослідженням саме low-cost фотограмметрії: F. Menna, T. Kersten, L. Barazzetti, M. Scaioni, P. Patias, A. Capra, P. Grussenmeyer, G. Tucci, A. Georgopoulos та ін. Серед відомих організацій, діяльність яких співпадає з головним напрямком дослідження, слід виділити: The International Committee for Documentation of Cultural Heritage (CIPA), International Council of Monuments and Sites (ICOMOS) та ISPRS WG II/8 - Data Acquisition and Processing in Cultural Heritage.

Вищенаведені проблеми у сукупності дозволяють визначити головне науково-практичне завдання роботи та її актуальність, що полягає у розробленні нових та удосконаленні існуючих технологій, математичних моделей та методик моніторингу пам'яток архітектури із використанням сучасних досягнень наземної цифрової фотограмметрії, зокрема можливостей сучасних цифрових неметричних камер.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано у рамках державних, галузевих і науково-дослідних програм на підставі таких документів:

1. Закон України «Про охорону культурної спадщини», № 1805-14.
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 р. N 1760 "Про затвердження Порядку визначення категорій пам'яток для занесення об'єктів культурної спадщини до Державного реєстру нерухомих пам'яток України".
3. Нової концепції державної політики реформування сфери охорони нерухомої культурної спадщини.
4. Міської цільової програми "Охорона та збереження культурної спадщини м. Києва на 2019 - 2021 роки", затвердженої рішенням Київської Міської Ради від 18 грудня 2018 року N 463/6514.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вирішення науково-прикладного завдання розроблення методичних основ використання технології наземного цифрового фотограмметричного знімання для моніторингу пам'яток архітектури із використанням цифрових неметричних камер та технологій low-cost фотограмметрії. Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні завдання:

- аналіз предметної сфери сучасного застосування наземної цифрової фотограмметрії в задачах моніторингу пам'яток архітектури;
- розроблення методики розрахунку параметрів фотографування з використанням цифрових неметричних камер.
- удосконалення математичної моделі та методики попереднього розрахунку точності наземного цифрового фотограмметричного знімання;
- систематизація та аналіз існуючих підходів до калібрування цифрових неметричних камер та на основі аналізу побудова класифікації методів та методик калібрування;
- дослідження методу прямого лінійного перетворення для завдання калібрування цифрових неметричних камер з метою визначення оптимальної моделі калібрування;
- аналіз та дослідження існуючого програмного забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер;
- дослідження впливу різних моделей врахування дисторсії цифрової камери на точність визначення координат пам'яток архітектури;
- розроблення технології моніторингу пам'яток архітектури засобами цифрової наземної фотограмметрії.

*Предметом дослідження є пам'ятки архітектури.*

*Об'єктом дослідження є методи та технології наземної цифрової фотограмметрії.*

**Методи дослідження** дозволяють повністю вирішити поставлені завдання. Дослідження базуються на загальній теорії аналітичної фотограмметрії. Для аналізу та інтерпретації отриманих результатів використано методи цифрового оброблення зображень. Дослідження точності калібрування цифрових неметричних камер виконано з використанням статистичних методів, теорії похибок вимірювань та методу найменших квадратів. Калібрування цифрових неметричних камер виконано із використанням теорії прямого лінійного перетворення.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в отриманні теоретичних і практичних результатів щодо вирішення науково-прикладного завдання використання методів наземної цифрової фотограмметрії у вирішенні завдань моніторингу пам'яток архітектури. Отримані результати дозволяють сформулювати наступні наукові положення:

- удосконалено математичну модель та методику попереднього розрахунку точності фотограмметричного знімання, що враховує джерела похибок властиві цифровим неметричним камерам;
- запропоновано методику та математичну модель розрахунку параметрів фотографування з використанням цифрової неметричної апаратури для знімання пам'яток архітектури, що дозволяє розрахувати параметри із урахуванням фізичних характеристик цифрових неметричних камер;
- запропоновано технологію вибору оптимальної моделі та методики калібрування цифрових неметричних камер при вирішенні завдань моніторингу пам'яток архітектури, що базується на використанні методу прямого лінійного перетворення.

**Практична цінність одержаних результатів** роботи полягає в розробленні технології та практичних рекомендацій щодо виконання робіт з моніторингу пам'яток архітектури. Отримані практичні результати, можуть бути використані для:

- розроблення методики та технології виконання польових і камеральних робіт при вирішенні завдань моніторингу пам'яток архітектури;
- розроблення технологічних схем калібрування, алгоритмів для розрахунку параметрів фотографування та практичного дослідження різного програмного забезпечення для калібрування.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри інженерної геодезії Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці курсів навчальних дисциплін «Фотограмметрія і дистанційне зондування» та «Інженерна фотограмметрія».

Отримані результати можуть бути використані при розробленні та вдосконаленні відповідного програмного забезпечення. Результати дослідження рекомендовані до застосування в практиці фотограмметричного виробництва для вирішення завдань моніторингу пам'яток архітектури.

**Особистий внесок здобувача.** Результати досліджень, що викладено в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно, що підтверджується одноосібними публікаціями з ключових аспектів проблеми, а саме: [2] – удосконалення методики розрахунку параметрів наземного фотограмметричного знімання при використанні цифрової неметричної камери; [4] – дослідження програмних засобів та моделей для автоматичного калібрування цифрових

неметричних камер; [5] – розроблення методики виконання попереднього розрахунку точності фотограмметричних моделей створених за даними low-cost фотограмметрії; [9] – фотограмметричне моделювання пам'яток архітектури.

У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [1] – виконання аналітичного розрахунку крену історичної споруди; [3] – аналіз методів моніторингу пам'яток архітектури; [6] – виконання аналітичного огляду цифрових фотограмметричних камер для археологічного знімання; [7] – статистичне дослідження результатів зшивання лазерних сканів; [8] – аналіз технічних можливостей методу наземного лазерного сканування.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень, практичних розробок та їх впровадження доповідались та обговорювались на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі: Міжнародній науково-технічній конференції «Геопростір 2016» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Геопростір 2017» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції Перезавантаження будівництва: економіка, організація, менеджмент (м. Київ, 2016 р.) та Міжнародній конференції GEORES 2019 – 2nd International Conference of Geomatics and Restoration (Milan, Italy, 2019 р.). Результати дослідження апробовано на всіх представлених конференціях, що підтверджується наявністю друківаних тез доповідей та програм конференцій.

Результати дослідження впроваджено в навчальний процес кафедри інженерної геодезії Київського національного університету будівництва і архітектури під час підготовки магістрів спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій», спеціалізацій «Геодезія» і «Геоінформаційні системи та технології».

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з них 5 – у вітчизняних виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань з технічних наук, визначених МОН України; 1 – у міжнародному науковому виданні, що входить до наукометричної бази даних (Scopus та Web of Science) та 3 – у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг роботи становить 187 сторінок, у тому числі 128 сторінок основного тексту, 113 рисунків, 22 таблиці, список використаних джерел із 134 найменувань на 18 сторінках та додатків на 8 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено наукову новизну одержаних результатів та їх практичну цінність, стисло розкрито основний зміст роботи.

У першому розділі «**Наземна цифрова фотограмметрія в задачах моніторингу пам'яток архітектури**» виконано огляд методів наземної фотограмметрії в задачах моніторингу пам'яток архітектури, розглянуто загальні вимоги та підходи до реалізації методів наземної цифрової фотограмметрії та проаналізовано сучасний стан проблеми застосування даних наземного цифрового фотограмметричного знімання для моніторингу пам'яток архітектури.

Виконано аналіз предметної сфери дослідження. За даними багатьох фахівців встановлено, що фотограмметричні роботи в архітектурі складають понад 90% всіх

наземних фотограмметричних робіт. Найбільшу популярність методи наземної цифрової фотограмметрії мають при відновленні втрачених креслень, реконструкції і реставрації споруд, вивченні архітектурних пам'яток, реставрації інтер'єрів, створенні тривимірних моделей для ГІС та довідкових систем. Для вказаних завдань було порівняно наземні методи вимірювань, що можуть бути використані для моніторингу пам'яток архітектури. До таких методів належать: безпосередні вимірювання; геодезичний; фотограмметричний та наземного лазерного сканування. Методи безпосередніх вимірювань не витримують конкуренції з іншими методами. При значних об'ємах робіт та високих вимогах до точності, найбільш раціональними є фотограмметричний або лазерний методи. При порівнянні двох останніх, вирішальним фактором стає вартість робіт. За таких умов, використовуючи технологію low-cost фотограмметрії перевагу слід віддати фотограмметричному методу.

Відомі вчені в галузі наземної цифрової фотограмметрії, такі як: А. Grun, Т. Luhmann, М. Scaioni, L. Varazetti, Т. Kersten та ін. ще на початку століття довели можливість застосування технології low-cost фотограмметрії для моніторингу та збереження пам'яток архітектури. Водночас ними були сформульовані основні проблеми, що виникають при застосуванні даної технології.

Проведений аналіз включає більшість робіт відомих у світі вчених в напрямку дисертаційного дослідження. В Україні даний напрямок розвивається не досить інтенсивно. Варто відмітити роботи В.О. Катушкова, С.Г. Могильного, А.О. Луньова, В.М. Глотова та О.Д. Пашетник, які займаються питаннями калібрування цифрових камер. Комплексний підхід щодо використання цифрової low-cost фотограмметрії до проблеми моніторингу пам'яток архітектури у роботах вітчизняних вчених відсутній.

Підсумовуючи результати виконаного у розділі аналізу, використовуючи досвід багатьох користувачів та враховуючи появу нових потужних комп'ютерів, можна стверджувати, що наземна цифрова фотограмметрія дає змогу більш вдало використати можливості класичної фотограмметрії. За результатами комплексного аналізу отримано наступні висновки:

- вартість високоточного фотограмметричного обладнання залишається високою, при тому, що найближчим часом не варто очікувати появи революційних розробок в галузі цифрової фотограмметрії, у той же час цифрова low-cost фотограмметрія іноді взагалі не вимагає наявності спеціалізованого устаткування;
- завдяки low-cost фотограмметрії сфера застосування наземної цифрової фотограмметрії значно розширилась і потребує подальшого дослідження та удосконалення технології, що пов'язано із вимогами користувачів;
- одночасно із розширенням сфери застосування підвищилась рентабельність наземної цифрової фотограмметрії, однак залишається невирішеним питання технології виконання робіт, особливо у випадку моніторингу великих архітектурних об'єктів;
- технологія автоматизованого оброблення цифрових фотографічних зображень значно покращилась, проте вимагає подальшого удосконалення та дослідження;
- при правильному підході до проектування фотознімальних робіт, наявності каліброваного обладнання та строгому обробленні даних фотознімання, методи

фотограмметрії мають переваги перед іншими методами і дозволяють досягти необхідної точності.

Ці висновки вказують на головні напрямки в яких необхідно вести дослідження в наземній цифровій фотограмметрії для підвищення ефективності її використання при вирішенні завдань моніторингу пам'яток архітектури.

У другому розділі «Розроблення математичних моделей розрахунку точності та параметрів фотографування з урахуванням особливостей цифрових неметричних камер» наведено основні математичні залежності в наземній цифровій фотограмметрії, удосконалено математичну модель та методику виконання попереднього розрахунку точності фотограмметричних робіт та математичну модель і методику розрахунку параметрів фотографування в наземній цифровій фотограмметрії.

З метою удосконалення математичної модель та методики виконання попереднього розрахунку точності визначення координат за даними наземного цифрового фотограмметричного знімання було використано математичну модель прямої фотограмметричної засічки.

Сутність удосконаленої методики попереднього розрахунку точності полягає у виконанні розрахунку точності у два кроки. На першому кроці виконується розрахунок точності вимірювання координат на цифровому знімку. Цей розрахунок є вихідним для розрахунку точності визначення координат точок.

Точність вимірювання координат точок на цифровому знімку залежить від похибок: геометричного спотворення зображення, дискретизації зображення, похибки розфокусування та роздільної здатності. В роботі наведено вирази для розрахунку вказаних похибок. Розрахунок виконано за вихідними даними, що представлені в табл. 1, де наведемо основні параметри цифрових камер сучасних смартфонів.

Таблиця 1

**Параметри цифрових камер**

Камера	Розмір пікселя, мкм	Фокусна відстань, мм	Розмір матриці	Фізичний розмір матриці, мм	Відносний отвір об'єктиву $D/f$
камера 1	1,12	5	4208x3802	4,71x4,26	1:2,0
камера 2	1,25	4	4208x3802	5,26x4,75	1:1,4
камера 3	1,3	4	4208x3120	5,47x4,06	1:2,2
камера 4	1,4	3	4032x3024	5,64x4,23	1:1,8

Результати розрахунку за вихідними даними табл. 1 наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Сумарні похибки викликані дискретизацією цифрового зображення**

Камера	$m_d$ , мкм
камера 1	1,05
камера 2	1,17
камера 3	1,21
камера 4	1,31

Похибки роздільної здатності та розфокусування на місцевості розраховано за виразами (1) та (2) відповідно:



$$m_{x,z} = Y\Delta\gamma/f; m_y = m_{x,z}Y/B \quad (1)$$

$$m_{x,z(F)} = \Delta F \times Y/F, m_{y(F)} = m_{x,z(F)} \times Y/B. \quad (2)$$

Графіки залежності похибок роздільної здатності та розфокусування від відстані знімання  $Y$ , представлено на рис. 1 і рис. 2.

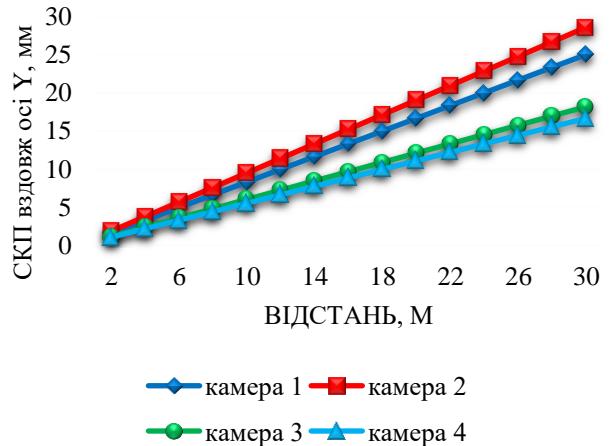
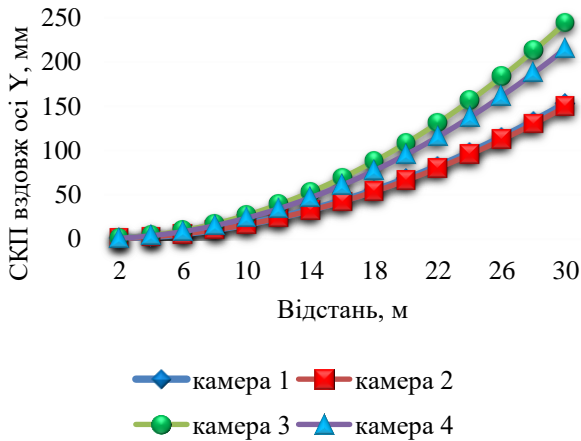


Рис. 1. Графіки похибки роздільної здатності вздовж осі  $Y$

Рис. 2. Графіки похибки розфокусування вздовж осі  $Y$

Результати розрахунку сумарного впливу похибок вимірювань на цифрових знімках наведені у табл. 3.

Таблиця 3

**Сумарний вплив похибок вимірювань на цифрових знімках**

$Y, \text{ м}$	2	10	20	30	2	10	20	30
	$m_{xd}, m_{zd}, \text{ МКМ}$				$m_p, \text{ МКМ}$			
камера 1	8	5.2	5.0	5.0	11.2	7.3	7.0	7.0
камера 2	7.3	4.6	4.5	4.5	10.2	6.4	6.3	6.3
камера 3	5.6	4.3	4.2	4.2	7.8	6.0	5.9	5.9
камера 4	4.4	3.6	3.6	3.6	6.2	5.0	5.0	5.0

Дані табл. 3 є вихідними для обчислення точності знімання.

Загальний вираз для розрахунку впливу похибок кутових елементів зовнішнього орієнтування та похибок координат точок на знімку має наступний вигляд:

$$\mathbf{M}_m = \mathbf{M}_\theta + \mathbf{M}_\delta, \quad (3)$$

де  $\mathbf{M}_\theta$  - коваріаційна матриця похибок кутових елементів;  $\mathbf{M}_\delta$  - коваріаційна матриця похибок координат на знімку.

На рис. 3 графічно представлено геометрію утворення похибки просторового визначення координат точки  $P$ .

Матрицю  $\mathbf{M}_\theta$  обчислюють як:

$$\mathbf{M}_\theta = \mathbf{F}_{L,R} \mathbf{M}_\alpha \mathbf{F}_{L,R}^T, \quad (4)$$

де  $\mathbf{F}_{L,R}$  - матриця частинних похідних від виразу  $\mathbf{A}_{L,R}r$ ;  $\mathbf{A}_{L,R}$  - матриці напрямних косинусів лівого і правого знімків;  $\mathbf{M}_\alpha = \text{diag}(m_\alpha^2, m_\omega^2, m_\kappa^2)$  - діагональна матриця похибок кутових елементів.

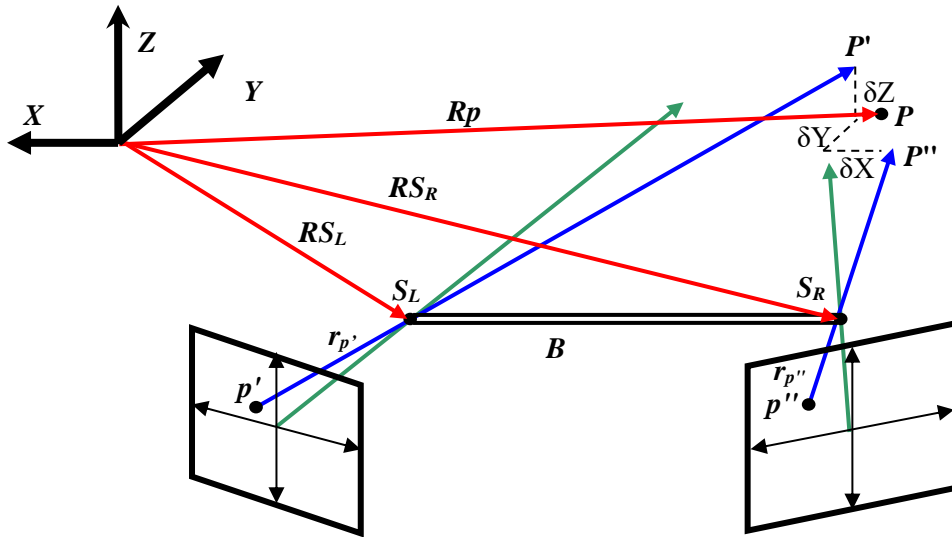


Рис. 3. Геометрія утворення похибки прямої фотограмметричної засічки  
Матрицю  $\mathbf{M}_\delta$  обчислюють як:

$$\mathbf{M}_\delta = \mathbf{A}_{L,R} \mathbf{M}_n \mathbf{A}_{L,R}^T. \quad (5)$$

Матриця  $\mathbf{M}_n$  діагональна матриця похибок,  $\mathbf{M}_n = \text{diag}(m_x^2 \quad m_f^2 \quad m_z^2)$ .

$$m_x^2 = m_{x_0}^2 + m_r^2 + m_t^2 + m_{xd}^2; \quad m_z^2 = m_{z_0}^2 + m_r^2 + m_t^2 + m_{zd}^2; \quad m_f^2, \quad (6)$$

де  $m_{x_0}, m_{z_0}$  - похибки визначення головної точки;  $m_r$  - похибка визначення радіальної дисторсії;  $m_t$  - похибка визначення тангенціальної дисторсії;  $m_{xd, zd}$  - похибки вимірювання на цифровому знімку, що наведені у табл. 3.

Для випадку фотографування цифровою неметричною камерою, вираз для обчислення похибки визначення координат є наступним:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{S_L} + \mathbf{M}_{S_R} + \mathbf{M}_{r_l} + \mathbf{M}_{r_r}, \quad (7)$$

де  $\mathbf{M}_{S_R}$  - коваріаційна матриця похибок визначення координат правого центру фотографування.  $\mathbf{M}_{S_L}$  - коваріаційна матриця похибок визначення координат лівого центру фотографування;  $\mathbf{M}_{r_l}$  - коваріаційна матриця похибок визначення координат точки на лівому знімку;  $\mathbf{M}_{r_r}$  - коваріаційна матриця похибок визначення координат точки на правому знімку.

Коваріаційні матриці похибок визначення координат точки на лівому та правому знімках обчислюють як:

$$\mathbf{M}_{r_l} = \mathbf{C}_l \mathbf{M}_m \mathbf{C}_l^T, \quad \mathbf{M}_{r_r} = \mathbf{C}_r \mathbf{M}_m \mathbf{C}_r^T, \quad (8)$$

де  $\mathbf{C}_l$  та  $\mathbf{C}_r$  - матриці частинних похідних за координатами точки на лівому та правому знімках відповідно.

Коваріаційні матриці похибок визначення координат лівого та правого центрів фотографування обчислюють як:

$$\mathbf{M}_{S_L} = \mathbf{C}_{S_L} \mathbf{M}_S \mathbf{C}_{S_L}^T, \quad \mathbf{M}_{S_R} = \mathbf{C}_{S_R} \mathbf{M}_S \mathbf{C}_{S_R}^T, \quad (9)$$

де  $\mathbf{C}_{S_L}$  та  $\mathbf{C}_{S_R}$  - матриці частинних похідних за координатами лівого та правого центрів фотографування.

За отриманими виразами виконано розрахунок очікуваної точності визначення координат точки в залежності від відстані знімання та різних значень кутових елементів зовнішнього орієнтування. Результати представлено на рис. 4 і рис. 5.

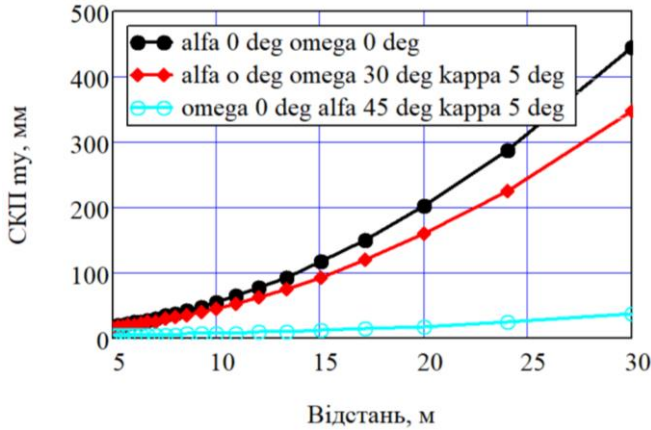


Рис. 4. Графіки похибок вздовж координатної осі  $Y$

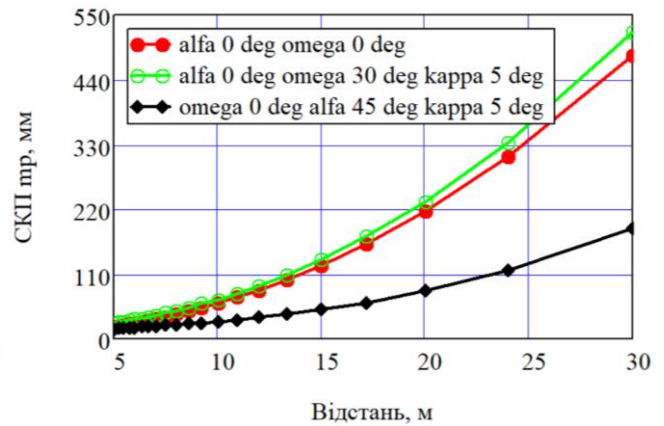


Рис.5. Графіки похибок просторового визначення місцеположення

Для удосконалення методики та математичної моделі розрахунку параметрів знімання, враховано, що при використанні цифрової неметричної камери із попереднім калібруванням відбувається багаторазове відображення однієї області об'єкту на різних частинах знімка. Отримано залежність для розрахунку максимальної допустимої відстані знімання:

$$Y_{\max} = \frac{m_y \sqrt{r}}{\sqrt{2m_{dist}^2 + 0.5l_{pix}^2}} \cdot 0.5l_{pix} \cdot N \quad (10)$$

де,  $m_{dist}$  - СКП залишкової похибки дисторсії зображення, після калібрування;

$N$  – кількість пікселів по горизонталі;  $l_{pix}$  - розмір пікселя;  $r = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  - кількість вимірювань окремої точки на парах знімків;  $k = 2$ ;  $n$  - загальна кількість знімків на яких відобразилась точка.

Виконано розрахунок максимальної відстані знімання в залежності від заданої СКП визначення координат та кількості знімків. Результати розрахунку наведено на рис. 6 та рис. 7.

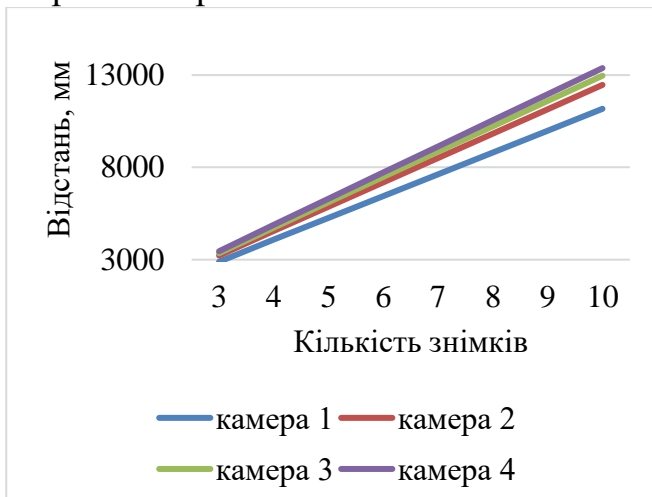


Рис. 6. Допустимі відстані для СКП визначення координат  $m_y = 20$  мм

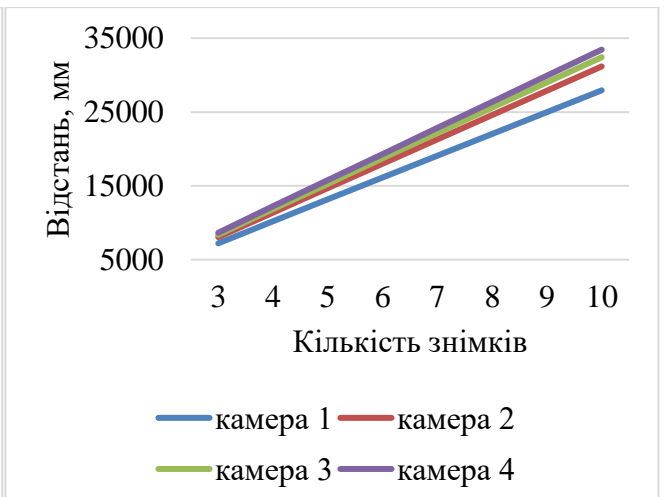


Рис. 7. Допустимі відстані для СКП визначення координат  $m_y = 50$  мм

У третьому розділі «Дослідження моделей калібрування цифрових неметричних камер для моніторингу пам'яток архітектури» викладено загальну теорію калібрування цифрових неметричних камер методом прямого лінійного перетворення, виконано аналіз та дослідження моделей калібрування цифрових неметричних камер та дослідження програмних засобів для калібрування цифрових неметричних камер.

Для врахування параметрів дисторсії використано метод прямого лінійного перетворення. Математична модель методу має вигляд:

$$u - \Delta u = \frac{L_0 X + L_1 Y + L_2 Z + L_3}{L_8 X + L_9 Y + L_{10} Z + 1}; \quad v - \Delta v = \frac{L_4 X + L_5 Y + L_6 Z + L_7}{L_8 X + L_9 Y + L_{10} Z + 1}, \quad (11)$$

$$\Delta u = (u - u_0)(L_{11} r^2 + L_{12} r^4 + L_{13} r^6) + L_{14} (r^2 + 2(u - u_0)^2) + L_{15} (u - u_0)(v - v_0);$$

$$\text{де,} \quad \Delta v = (v - v_0)(L_{11} r^2 + L_{12} r^4 + L_{13} r^6) + L_{14} (u - u_0)(v - v_0) + L_{15} (r^2 + 2(v - v_0)^2),$$

$r^2 = (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2$ ,  $L_{11}, L_{12}, L_{13}$  - коефіцієнти радіальної дисторсії,  $L_{14}, L_{15}$  - коефіцієнти тангенціальної дисторсії.

Виконано аналіз існуючих моделей для калібрування та встановлено, що за відсутності інформації про характер спотворень викликаних об'єктивом камери, необхідно проводити дослідження моделей калібрування для вибору оптимальної моделі. Відповідно до виконаного аналізу, для дослідження було обрано наступні моделі:

*Фізичні моделі*

*Модель 1*

$$\begin{aligned} \Delta x &= \bar{x}(L_1 r^2 + L_2 r^4) + L_3 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2L_4 \bar{x}\bar{y}; \\ \Delta y &= \bar{y}(L_1 r^2 + L_2 r^4) + 2L_3 \bar{x}\bar{y} + L_4 (r^2 + 2\bar{y}^2). \end{aligned} \quad (12)$$

*Модель 2*

$$\begin{aligned} \Delta x &= \bar{x}(L_1 r^2 + L_2 r^4 + L_3 r^6) + L_4 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2L_5 \bar{x}\bar{y}; \\ \Delta y &= \bar{y}(L_1 r^2 + L_2 r^4 + L_3 r^6) + 2L_4 \bar{x}\bar{y} + L_5 (r^2 + 2\bar{y}^2). \end{aligned} \quad (13)$$

*Модель 3*

$$\begin{aligned} \Delta x &= \bar{x}(L_1 r^2 + L_2 r^4 + L_3 r^6) + L_4 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2L_5 \bar{x}\bar{y} + L_6 \bar{y} + L_7 \bar{x}; \\ \Delta y &= \bar{y}(L_1 r^2 + L_2 r^4 + L_3 r^6) + 2L_4 \bar{x}\bar{y} + L_5 (r^2 + 2\bar{y}^2). \end{aligned} \quad (14)$$

*Алгебраїчні моделі*

*Модель 1*

$$\begin{aligned} \Delta x &= L_1 \cos \lambda + L_2 r + L_3 r \cos 2\lambda; \\ \Delta y &= L_4 \sin \lambda + L_5 r + L_6 \sin 2\lambda. \end{aligned} \quad (15)$$

*Модель 2*

$$\begin{aligned} \Delta x &= L_1 \cos \lambda + L_2 r + L_3 r \cos 2\lambda + L_4 r^2 \cos \lambda; \\ \Delta y &= L_5 \sin \lambda + L_6 r + L_7 \sin 2\lambda + L_8 r^2 \sin \lambda. \end{aligned} \quad (16)$$

*Гібридна модель*

$$\begin{aligned} \Delta x &= \bar{x}(L_1 r^2 + L_2 r^4 + L_3 r^6) + L_4 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2L_5 \bar{x}\bar{y} + L_6 \bar{x}^2 + L_7 \bar{x}^4 + L_8 \bar{x}^6; \\ \Delta y &= \bar{y}(L_1 r^2 + L_2 r^4 + L_3 r^6) + 2L_4 \bar{x}\bar{y} + L_5 (r^2 + 2\bar{y}^2). \end{aligned} \quad (17)$$

Дослідження вказаних моделей виконано методом математичного моделювання за методом прямого лінійного перетворення. У програмному середовищі MATLAB було складено програми для моделювання впливу дисторсії об'єктива та

розрахунку параметрів дисторсії методом прямого лінійного перетворення. Приклад результатів моделювання наведено на рис. 8 і рис. 9.

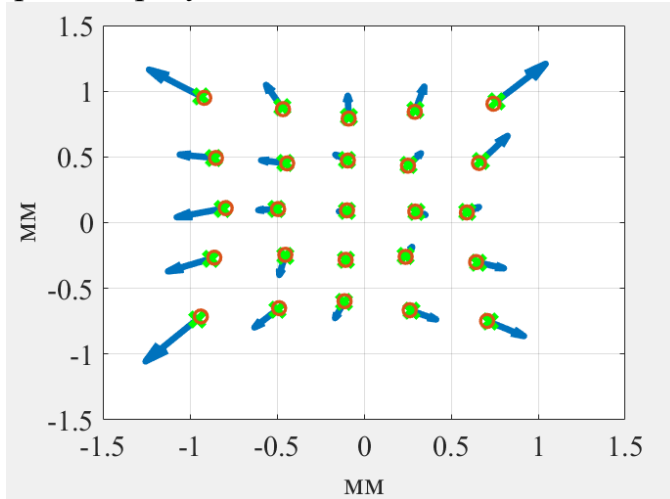


Рис. 8. Графік векторів поправок за вплив дисторсії, модель (16)

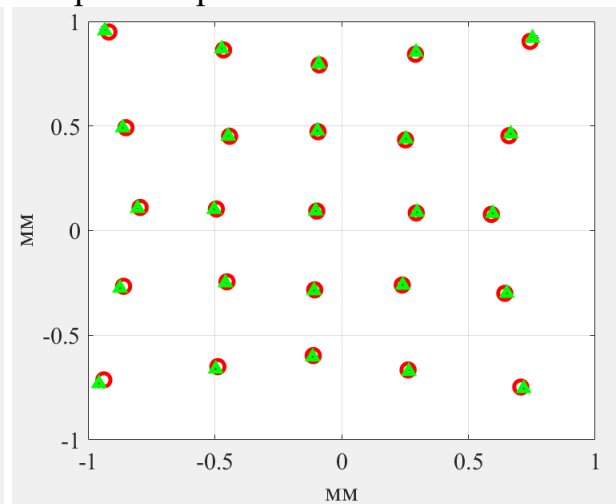


Рис. 9. Фактичне та виправлене положення точок на знімку, модель (16)

За результатами дослідження встановлено, що за умови відсутності даних про характер спотворень, найкращих результатів дозволяють досягти алгебраїчні моделі другого порядку та гібридні моделі. Результати моделювання у вигляді розподілу поправок після корегування дисторсії об'єктиву представлено на рис. 10 і рис. 11.

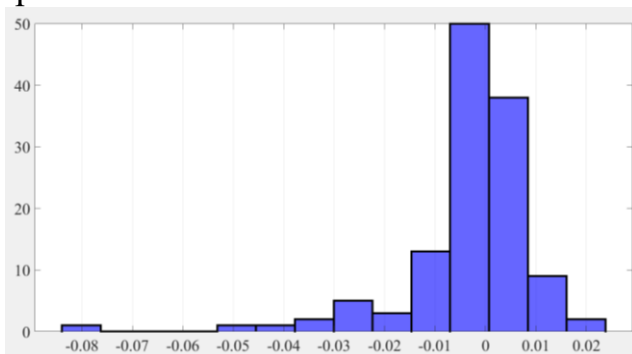


Рис. 10. Гістограма розподілу поправок вздовж осі X.

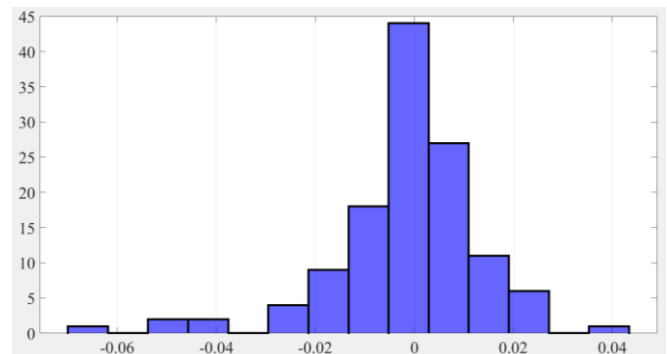


Рис. 11. Гістограма розподілу поправок вздовж осі Y.

Виконано дослідження програмного забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер. Побудовано класифікацію сучасних програм для калібрування за такими ознаками як: автоматизація калібрування, математична модель калібрування, можливість калібрування за власною моделлю, набір параметрів та їх оцінювання та вартість програми. Всі програми було розділено на три групи. Дослідження було виконано для, програм другої групи, що мають невисоку вартість та розвинений інтерфейс і програм третьої групи, що мають невисоку вартість та надають можливість модифікувати моделі дисторсії.

Для програм другої групи (DigiCad 3D, PHIDIAS, iWitness, Australis, AgiSoft Metashape, Elcovision, PhotoModeler, 3D Image Master TOPCON) дослідження було виконано за тестовим об'єктом, що зображений на рис. 12. Дослідження програм третьої групи (Faussal, Camera Calibration TOOLBOX) було виконано за тестовим об'єктом, що має вигляд шахової дошки (рис. 13).

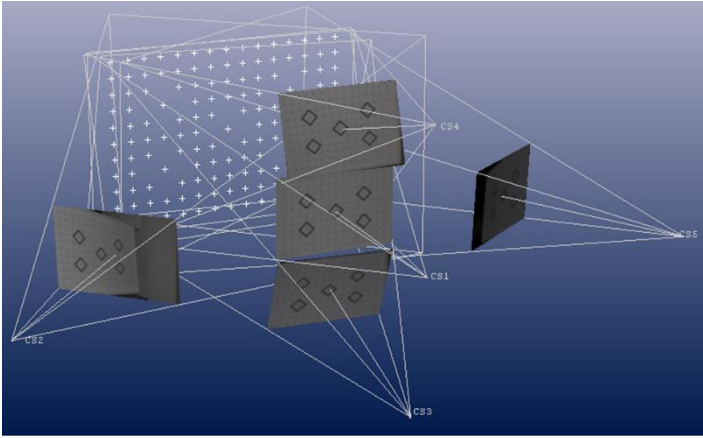


Рис. 12. Зображення тестового об'єкту з опорними точками

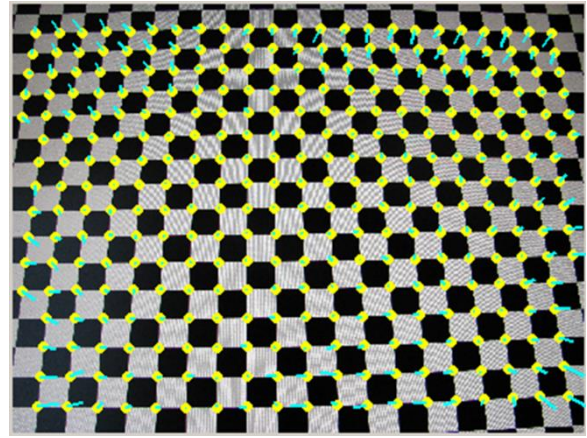


Рис. 13. Зображення тестового об'єкту типу шахова дошка

Встановлено, що при виборі програми для калібрування серед другої групи варто звертати увагу не тільки на математичну модель калібрування, а й на можливість оцінювання розміру ПЗЗ-матриці та коефіцієнтів кореляції між параметрами. Наявність розширеної математичної моделі калібрування з додатковими параметрами в програмах другої групи не гарантує кращого результату. Доцільність використання таких моделей може бути підтверджена тільки за результатами додаткових досліджень. При калібруванні цифрових неметричних камер, що мають велику за розміром матрицю та відносно якісний об'єктив доцільно користуватися програмами із простими моделями, найчастіше фізичного типу, які дають можливість поглибленого аналізу результатів калібрування. Для найпростіших камер, що вбудовані у смартфони модель калібрування має бути більш складною. Калібрування таких камер має проводитись кожного разу при зніманні, а отже доцільним є використання програм третьої групи. Програма Faussal для MATLAB серед інших програм цього класу забезпечує найкращу точність та якість калібрування. Загалом слід відмітити, що при калібруванні слід віддавати перевагу програмам типу PhotoModeler, а при фінансових обмеженнях програмам типу Faussal для MATLAB.

У четвертому розділі «Дослідження технології моніторингу пам'яток архітектури за даними цифрової наземної фотограмметрії» виконано дослідження впливу калібрування цифрової неметричної камери на точність документування пам'яток архітектури на прикладі історичної будівлі та розроблено і досліджено методику моніторингу пам'яток архітектури на прикладі створення моделей фортифікаційних споруд.

Для вивчення впливу дисторсії, як об'єкт дослідження обрано Zurich City Hall (рис. 14). Матеріали цифрового наземного фотограмметричного знімання цього об'єкту розповсюджуються Міжнародним товариством фотограмметрії та дистанційного зондування, як тестові для перевірки нових математичних моделей та роботи програмного забезпечення. Наближені розміри об'єкту складають 35x12x18 м. Попередньо, за виразами, що отримані у другому розділі було виконано розрахунок очікуваної точності визначення координат та визначено співвідношення цієї точності і параметрів фотографування. Приклад розрахунку максимальної відстані фотографування в залежності від точності визначення координат наведено на рис. 15. Фотографування об'єкту було виконано цифровою неметричною камерою із характеристиками подібними до камер смартфонів.



Рис. 14. Zurich City Hall

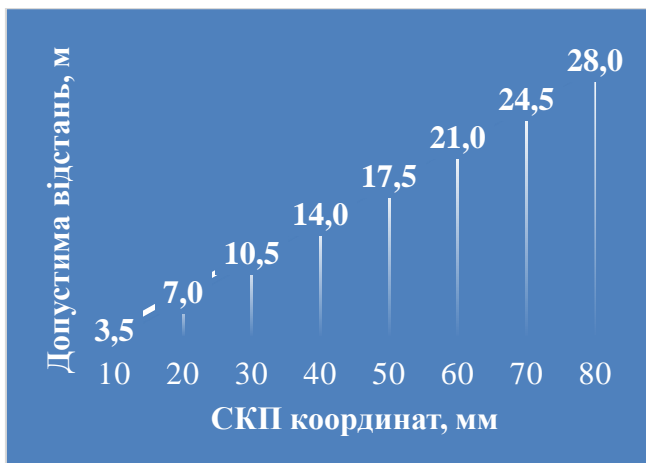


Рис. 15. Графік допустимої відстані фотографування в залежності від похибки визначення відстані до об'єкту

Для даного об'єкту вирівнювання вимірювань та моделювання було виконано без врахування дисторсії (рис. 16) та із врахуванням дисторсії (рис. 17).

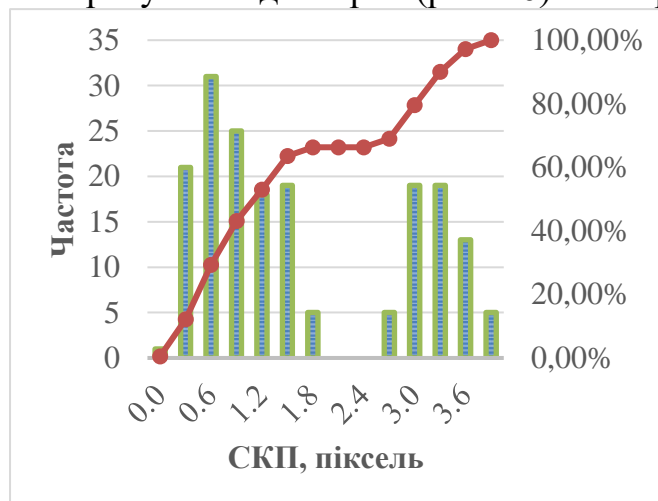


Рис. 16. Гістограма та інтегральна крива залишкових відхилень на точках моделі без врахування дисторсії

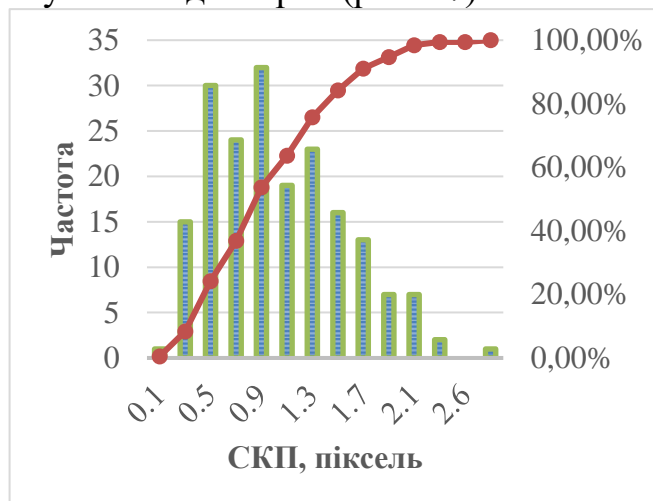


Рис. 17. Гістограма та інтегральна крива залишкових відхилень на точках моделі із врахування дисторсії

Загалом можна стверджувати, що при неврахуванні дисторсії об'єктива, цифрові неметричні камери не дозволяють досягти очікуваної точності. У випадку моніторингу пам'яток архітектури для вказаних відстаней фотографування очікувана точність для кожної із координатних осей складає 55-60 мм. Гістограма та інтегральна крива розподілу на рис. 16 свідчать про значне систематичне спотворення координат визначених точок. За умови врахування впливу дисторсії, точність визначення координат окремих точок покращилась на 40%. За результатами оброблення, максимальний вектор зміщення рівний 90 мм, СКП вирівнювання дорівнює 52 мм. Загальна точність визначення координат підвищилась приблизно на 25 %. Отже, при виконанні калібрування та врахуванні параметрів дисторсії ми досягаємо очікуваної точності визначення координат.

До об'єктів історико-культурної спадщини можуть входити різноманітні типи споруд, відомі та популярні, а також менш відомі, а часом і покинуті. Окремою категорією об'єктів культурної спадщини є фортифікаційні споруди. У роботі

досліджено теоретичну і практичну сторону цифрової наземної фотограмметрії на прикладі документування та моніторингу укріплень Другої світової війни в районі міста Києва. Основне обладнання, яке було використано під час дослідження: рулетка Leica Disto (для виконання контрольних вимірювань); ноутбук (для калібрування камер і тривимірного моделювання); два смартфони HTC Desire SV і MEIZU M3 Max (для знімання); БПЛА FocusDrone (для знімання недоступних ділянок); набір інструментів калібрування камери програмного забезпечення MATLAB (для калібрування цифрових камер) та Metashape Photoscan (для тривимірного моделювання).



Рис. 18. Приклад об'єкту дослідження: довготривала вогнева точка № 456

Калібрування камер виконано за тестовим об'єктом типу шахова дошка у програмному середовищі MATLAB. Результати калібрування наведено в табл. 4.

Таблиця 4

#### Результати калібрування

Обладнання	Похибка калібрування $m_x/m_y$ , піх	Фокусна відстань $f_x/f_y$ , піх	Похибка фокусної відстані $m_{f_x}/m_{f_y}$ , піх	Головна точка $\delta_x/\delta_y$ , піх
FocusDrone	0.4/0.5	863.6/867.3	13.9/14.1	311.7/223.2
HTC Desire SV	1.0/1.0	2660.1/2662.4	5.2/5.0	1634.4/957.5
MEIZU M3 Max	0.7/0.8	3133.1/3132.8	4.5/4.4	2102.7/1526.7
Обладнання	Похибка головної точки $m_{\delta_x}/m_{\delta_y}$ , піх	Коефіцієнти радіальної дисторсії, $k_1/k_3$	Похибки коефіцієнтів радіальної дисторсії, $m_{k_1}/m_{k_3}$	Розмір матриці, піх
FocusDrone	11.4/9.3	0.0011/-0.8268	0.0478/0.3585	720×480
HTC Desire SV	5.0/3.9	0.0998/-0.2022	0.0047/0.0116	3264×1952
MEIZU M3 Max	3.0/2.2	0.0396/-0.053	0.002/0.0038	4208×3120

За результатами знімання було отримано хмару точок та виконано моделювання споруди. Масштабування моделі виконано на двох взаємно перпендикулярних відстанях. Інші відстані були використані для контролю. Середнє абсолютне значення різниць у довжинах, отриманих за хмарию точок, становило 9 мм.

Перевірку запропонованої технології було виконано на прикладі 3D моделювання довготривалої вогневої точки (ДВТ) №428. Використовуючи описане вище устаткування та програмне забезпечення було виконано фотограмметричне знімання (рис. 19) та створено тривимірну модель об'єкту (рис. 20).



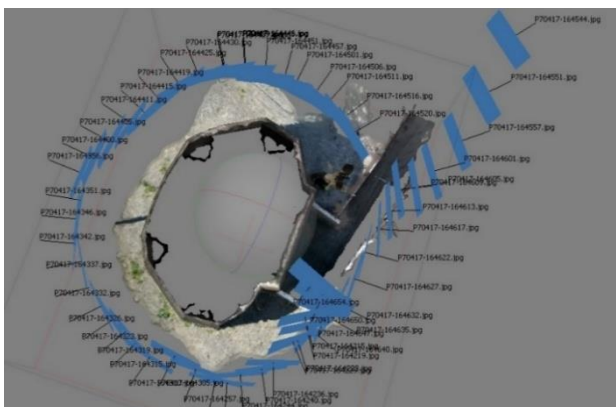


Рис. 19. Геометрія розміщення станцій для ДВТ № 428



Рис. 20. 3D модель ДВТ № 428 з траншеєю

Виконано дослідження програм смартфонів (Smart Tools) для вимірювання кутів та відстаней. Основне обладнання, яке використовувалось: лазерна рулетка Leica Disto; ноутбук; смартфон MEIZU M3 Max та Metashape Photoscan. Для перевірки точності роботи програми Android Smart Tools були зроблені контрольні вимірювання 15-ти відстаней між кодовими марками на артилерійському спостережному пункті № 453 (рис. 21) та контрольних кутів (рис. 22).



Рис. 21. Розміщення кодових марок на артилерійському спостережному пункті № 453



Рис. 22. Вимірювання кутів нахилу окремих елементів споруди

Відстані виміряні Android Smart Tools вводились в програму Metashape Photoscan як наближені значення відстаней для масштабування. Для контролю ці відстані було виміряно лазерною рулеткою. Після орієнтування знімків і отримання хмари точок, відстані були виміряні повторно та порівняні з точними вимірюваннями лазерною рулеткою. СКП вимірювань Android Smart Tools склала 0,19 м, що відповідає вимогам археологічних вимірювань.

Наведені результати вказують на широкий діапазон та ефективність застосування цифрової наземної фотограмметрії при вирішенні завдання моніторингу пам'яток архітектури. При коротких відстанях знімання (до 10 м) цілком реально вийти на рівень сантиметрової або навіть субсантиметрової точності. Вартість виконання робіт залежить тільки від витраченого часу і практично не пов'язана із вартістю устаткування або програмного забезпечення.

## ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз предметної сфери сучасного застосування наземної цифрової фотограмметрії, що у світовій практиці отримала назву low-cost фотограмметрії в задачах моніторингу пам'яток архітектури. Аналіз дозволив

визначити основні напрямки удосконалення технології цифрової наземної фотограмметрії, які дозволять досягти максимального ефекту при використанні low-cost фотограмметрії у завданні моніторингу пам'яток архітектури.

2. У результаті проведеного дослідження було удосконалено методику попереднього розрахунку точності в наземній цифровій фотограмметрії, яка є комплексною і враховує всі джерела похибок, притаманні цифровим камерам, якими обладнані сучасні смартфони. Розглянуто питання розрахунку точності вимірювань на цифровому знімку із врахуванням похибок дискретизації цифрового зображення, наведення, роздільної здатності та розфокусування. Використовуючи отримані сумарні похибки було виконано розрахунок точності створення фотограмметричних моделей за формулами прямої фотограмметричної засічки. Результати розрахунку дозволяють зробити висновки, що за найбільш несприятливих умов камери сучасних смартфонів дозволяють створювати тривимірні моделі з просторовою точністю не гірше 5 см для відстаней до 20 метрів. За результатами аналізу та розрахунку можна рекомендувати можливі заходи для підвищення точності, зокрема шляхом підбору вдалої геометрії фотографування, використанням кодових марок для орієнтування знімків та багатократного відображення ідентичних точок на різних знімках і в різних зонах.

3. В роботі наведено удосконалену методику розрахунку основних параметрів наземного фотограмметричного знімання при використанні цифрової неметричної камери. Отримано нові математичні вирази для розрахунку максимальної відстані фотографування, які враховують роздільну здатність ПЗЗ-матриці цифрової камери та кількість відображень точки на знімках. Виконані розрахунки показали високий рівень узгодженості із отриманими раніше результатами попереднього розрахунку точності. Зокрема для досягнення точності 50 мм вздовж осі  $Y$ , знімання можна виконувати на відстані до 35 м, при умові, що точки будуть відображені, що найменше на дев'яти знімках.

4. Проведено дослідження та аналіз моделей калібрування цифрових неметричних камер. Відповідно до результатів аналізу було обрано три типи моделей калібрування: фізична модель, алгебраїчна модель та гібридна модель. Дослідження вказаних моделей виконано методом математичного моделювання за методом прямого лінійного перетворення (DLT). Для цифрових неметричних камер найбільш ефективними виявилися алгебраїчні моделі другого порядку та гібридні моделі.

5. Проаналізовано існуюче програмне забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер. Запропоновано класифікацію програмних засобів. Всі програмні засоби розділено на три групи з окремими підгрупами, за такими ознаками як: автоматизація калібрування, математична модель калібрування, можливість калібрування за власною моделлю, набір параметрів та їх оцінювання та вартість. Встановлено, що для завдань наземної цифрової фотограмметрії доцільно використовувати програми другої або третьої групи.

6. Виконано експериментальні дослідження програмних засобів для калібрування цифрових неметричних камер. Досліджено програми Australis, PhotoScan Pro, PhotoModeler та 3D Image Master. Встановлено, що кожна із програм має певні переваги і недоліки, але в середньому найбільш ефективною є програма PhotoModeler. Загальний аналіз результатів показав, що при виборі програми для калібрування серед другої групи варто звертати увагу не тільки на математичну

модель калібрування, а й на можливість оцінювання розміру ПЗЗ-матриці та коефіцієнтів кореляції між параметрами. Наявність розширеної математичної моделі калібрування з додатковими параметрами не гарантує кращого результату. Доцільність використання таких моделей може бути підтверджена тільки за результатами додаткових досліджень, коли існує висока вірогідність деформацій ПЗЗ-матриці. Досліджено програми, що знаходяться у відкритому доступі: XSIGNO Photogrammetry, GML Camera Calibration, Camera Calibration Tools, CameraCalibrator, Image Master Calib, Agisoft Lens, Faucal MATLAB, MATLAB Camera Calibration TOOLBOX. Серед вказаних програм найбільш ефективною виявилася програма Faucal MATLAB.

7. Представлені в роботі результати досліджень вказують на широкий діапазон та ефективність застосування цифрової наземної фотограмметрії при вирішенні завдань документування та моніторингу пам'яток архітектури. При коротких відстанях знімання (до 10 м) цілком реально вийти на рівень сантиметрової точності, при цьому вартість виконання робіт залежить тільки від витраченого часу та кваліфікації виконавця. Незважаючи на отримані результати, залишаються відкритими питання подальшої автоматизації фотограмметричних вимірювань, пошуку нових математичних моделей врахування спотворень фотографічних зображень та інтегрування даних наземного цифрового фотограмметричного знімання з іншими джерелами інформації, такими як: наземне лазерне сканування, сканування ручними лазерними сканерами та знімання з легких та надлегких БПЛА.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Публікації у наукових фахових виданнях

- 1 Шульц Р.В. Білоус М.В., Ковтун В.Я., Куліченко Н.В., Гончерюк О.М. Визначення кренів історичних споруд методом наземного лазерного сканування. *Інженерна геодезія*. 2015. № 62. С. 55-71.
- 2 Гончерюк О.М. Особливості розрахунку параметрів наземного фотограмметричного знімання при використанні цифрової неметричної камери. *Містобудування і територіальне планування*. 2016. Вип. 62, Ч.1. С. 162-168.
- 3 Шульц Р.В. Білоус М.В., Гончерюк О.М. Моніторинг пам'яток архітектури за допомогою даних наземного лазерного сканування. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2017. Вип. 46. С. 202-207.
- 4 Гончерюк О.М. Дослідження програмних засобів та моделей для автоматичного калібрування цифрових неметричних камер за площинними тестовими об'єктами. *Інженерна геодезія*. 2017. № 64. С. 106-128.
- 5 Гончерюк О.М. Методика виконання попереднього розрахунку точності фотограмметричних моделей створених за даними low-cost фотограмметрії. *Інженерна геодезія*. 2018. № 65. С. 238-254.

### Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях

6. Shults R., Levin E., Habibi R., Shenoy S., Honcheruk O., Hart T., An Z. Capability of Matterport 3D camera for industrial archaeology sites inventory. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. Volume XLII-2/W11. P. 1059-1064.

### Публікації у збірниках праць за матеріалами конференцій

- 7 Шульц Р.В., Куліченко Н.В., Гончарюк О.М. Новий метод зшивання сканів на базі сумісного використання ітераційного методу найближчої точки та RANSAC-методу. *ГЕОПРОСТІР 2016*: матеріали міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ, 3-4 жов. 2016 р.). Київ: Тенар, 2016. С. 7-14.
8. Шульц Р.В. Білоус М.В., Ковтун В.Я., Куліченко Н.В., Гончарюк О.М. Нові можливості технології наземного лазерного сканування для завдання збереження пам'яток архітектури. *Перезавантаження будівництва: економіка, організація, менеджмент*: матеріали міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ, 12-14 лист. 2016 р.). Київ: Віпол, 2016. С. 138-139.
9. Гончарюк О.М. Моделювання історичних будівель у програмі Photomodeler. *ГЕОПРОСТІР 2017*: матеріали міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ, 4-6 груд. 2017 р.). Київ: Sky-Solutions, 2017. С. 16-22.

### АНОТАЦІЯ

**Гончарюк О.М. Методичні основи застосування даних наземного цифрового фотограмметричного знімання для моніторингу пам'яток архітектури.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія, Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2019.

У роботі наведено удосконалену математичну модель та методику виконання попереднього розрахунку точності фотограмметричних вимірювань з використанням цифрових неметричних камер. Запропоновано методику та удосконалено математичні вирази для розрахунку параметрів фотограмметричного знімання з використанням цифрових неметричних камер.

Виконано детальний аналіз моделей калібрування цифрових неметричних камер. Як математичний алгоритм калібрування запропоновано використовувати метод прямого лінійного перетворення. Виконано дослідження відомих математичних моделей калібрування методом прямого лінійного перетворення та визначено оптимальні моделі калібрування.

Проведено детальний аналіз і практичні експериментальні дослідження програмних засобів для калібрування цифрових неметричних камер. Запропоновано класифікацію програмних засобів в основу якої покладено критерії вартості, моделі врахування дисторсії об'єктива, стабільності і точності обчислювального алгоритму.

Проведено експериментальні дослідження впливу точності калібрування цифрової неметричної камери на точність створення моделей пам'яток архітектури. На прикладі документації укріплень Другої світової війни в районі міста Києва експериментально відпрацьовано теоретичну і практичну частини методики і технології моніторингу пам'яток архітектури.

**Ключові слова:** неметрична камера, пам'ятка архітектури, low-cost фотограмметрія, калібрування камери, параметри фотографування, попередній розрахунок точності, моніторинг, 3D модель.

## АННОТАЦИЯ

**Гончерюк О.М. Методические основы применения данных наземной цифровой фотограмметрической съемки для мониторинга памятников архитектуры.** - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 - геодезия, фотограмметрия и картография, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, МОН Украины, Киев, 2019.

В работе приведены усовершенствованная математическая модель и методика выполнения предварительного расчета точности фотограмметрических измерений с использованием цифровых неметрических камер. Предложена методика и усовершенствованы математические выражения для расчета параметров фотограмметрической съемки с использованием цифровых неметрических камер.

Выполнен детальный анализ моделей калибровки цифровых неметрических камер. В качестве математического алгоритма калибровки предложено использовать метод прямого линейного преобразования. Выполнены исследования известных математических моделей калибровки методом прямого линейного преобразования и определены оптимальные модели калибровки.

Проведен детальный анализ и практические экспериментальные исследования программных средств для калибровки цифровых неметрических камер. Предложена классификация программных средств в основу которой положены критерии стоимости, модели учета дисторсии объектива, стабильности и точности вычислительного алгоритма.

Проведены экспериментальные исследования влияния точности калибровки цифровой неметрической камеры на точность создания моделей памятников архитектуры. На примере документирования укреплений Второй мировой войны в районе города Киева экспериментально отработаны теоретическая и практическая части методики и технологии мониторинга памятников архитектуры.

**Ключевые слова:** неметрическая камера, памятник архитектуры, low-cost фотограмметрия, калибровка камеры, параметры съемки, предварительный расчет точности, мониторинг, 3D модель.

## ABSTRACT

**Honcheruk O.M. Methodical bases for the application of digital close-range photogrammetric data for architectural monuments monitoring.** - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.24.01 – Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The main scientific and practical task of the work consists in developing new and improving existing technologies, mathematical models and techniques for architectural monuments monitoring using modern digital photogrammetry achievements, particularly the capabilities of modern digital non-metric cameras.

The work presents an improved mathematical model and a method for performing the preliminary accuracy calculation of photogrammetric measurements using digital non-metric cameras equipped with modern smartphones and tablets. The analysis of the main sources of errors of digital non-metric cameras is carried out. Using the received total

errors, a calculation of the accuracy of the photogrammetric models was made according to the formulas of the direct photogrammetric intersection.

In the dissertation the analysis of the standard approach to the calculation of the parameters of surveying with the use of metric cameras and / or phototeodolites is performed. It is indicated that existing expressions for calculating the photographic parameters cannot be used when digital non-metric cameras are used. Existing expressions have been converted to digital form. The technique and mathematical expressions for calculation of photogrammetric surveying parameters using digital non-metric cameras are proposed.

A detailed analysis of calibration models of digital non-metric cameras is performed. As a mathematical calibration algorithm it is proposed to use the method of direct linear transformation. The research of well-known mathematical models of calibration by a direct linear transformation method was performed and the optimal models of calibration were determined.

A detailed analysis and practical experimental research of software tools for calibration of digital non-metric cameras are carried out. The classification of software tools is proposed based on cost criteria, models for taking into account the distortion of the lens, stability and accuracy of the computational algorithm. A general analysis of the results showed that when calibrating, the advantage should be given to programs such as PhotoModeler, and with financial constraints for programs such as Faucal for Matlab. The conducted research allowed offering the technology of choice of the optimum method of calibration of digital non-metric cameras in solving problems of architectural monuments monitoring.

Experimental studies of the influence of calibration accuracy of digital non-metric cameras on the accuracy of architectural models creation are carried out. Compared with the results obtained without calibration, the overall increase in the accuracy of the determination of coordinates was approximately 25%. On the example of documentation of the fortifications of the Second World War in the city of Kiev, the theoretical and practical parts of the methodology and technology of architectural monuments monitoring were worked out.

**Keywords:** non-metric camera, architectural monument, low-cost photogrammetry, camera calibration, photographic parameters, preliminary accuracy calculation, monitoring, 3D model.