

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Педагогічний факультет
Кафедра образотворчого і декоративно-прикладного мистецтва та
реставрації творів мистецтва

Кваліфікаційна робота магістра
з теми: **СПЕЦИФІКА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ
ФОТОГРАММЕТРІЇ В РЕСТАВРАЦІЇ ЖИВОПИСУ**

Виконав:
ГОРЬ Павло Вікторович
здобувач групи RTM1-M24 спеціальності
023 Образотворче мистецтво, декоративне
мистецтво, реставрація, за освітньою
програмою Реставрація творів мистецтва

Науковий керівник:
УРСУ Наталія Олексіївна
докторка мистецтвознавства,
професорка

Рецензент:

Кам'янець-Подільський – 2025

ЗМІСТ

ЗМІСТ

1ВСТУП

ЗРОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ. СТАЛІ МЕТОДИ НЕХІМІЧНИХ

ОПТИКО-ФОТОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТВОРІВ МИСТЕЦТВА ТА ФОТОГРАММЕТРІЯ	101.1. Методи нехімічного оптико-фотографічного дослідження живопису в реставрації та консервації	111.2. Теоретичні основи фотограмметрії	161.3. Перспективи розвитку фізико-оптичних методів та фотограмметрії в дослідженні живопису
РОЗДІЛ 2 ФОТОГРАММЕТРІЯ В РЕСТАВРАЦІЇ ЖИВОПИСУ	24	2.1. Аналіз практик фотограмметрії в реставрації живопису	252.1.1. Типологізація фотограмметрії в залежності від виду та об'єкта зйомки
		252.1.2. Аналіз найоптимальніших методів зйомки фотограмметрії в завданнях реставрації та консервації	262.2. Технічні вимоги та устаткування для проведення фотограмметрії
		312.3. Види роботи з даними в процесі фотограмметрії та аналізу її результатів	332.3.1. Порядок виконання фотограмметрії
			332.3.2. Робота з даними в 3-д редакторі
РОЗДІЛ 3 ФОТОГРАММЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖИВОПИСУ, АНАЛІЗ ДАНИХ		353.1. Фотограмметричний експеримент	
		363.1.1. Вхідні дані про об'єкт та обладнання експерименту	
		363.1.2. Обладнання та налаштування фотограмметрії	
		373.1.3. Виконання робіт з фотограмметрії твору живопису	
		393.2. Обробка результатів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Створення карти пошкоджень та демонстраційної 3D моделі об'єкта	
			41ВИСНОВКИ
			45СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ
			46ДОДАТКИ
			Error! Bookmark not defined.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. В процедурах реставрації творів образотворчого мистецтва та архітектури, важливим є документація змін самих об'єктів реставрації та інформативність зібраних даних після проведеного на їх основі аналізу. Зокрема, у творах живопису, первинним методом збору даних є візуальне спостереження, письмова документація даних та оптико-фотографічний метод. Такий метод є найбільш доступним для реставратора і не потребує наявності вартісного та спеціалізованого обладнання, як то рентгенівського апарату чи хроматографа. Оптично-фотографічне документування не потребує великих витрат часу та спеціальної кваліфікації, рентгенографа, фізика чи хіміка. З поширенням фото-відео камер, метод оптико-фотографічного дослідження стає найбільш доступним. Однак методологія даного методу є сталою. Підготовка фахівців та інструкції щодо проведення досліджень мало узгоджуються з розвитком сучасних оптичних пристроїв, які відкривають нові можливості фотографії та комп'ютерних технологій.

Сьогодні ж фото камери та смартфони які ними оснащенні, дають можливість виконувати тривимірне сканування об'єктів методом фотограмметрії, і збирати дані про форму, рельєф поверхні, пошкодження об'єкта. Це дає змогу проводити порівняльний аналіз змін внесених в процесі реставрації, чи під час заходів з консервації. Звичайний оптико-фотографічний метод покладається на більш суб'єктивну оцінку отриманих зображень дослідником, а проміжні спостереження неможливо виміряти та порівняти прецизійно коли необхідно оцінити множинні зміни. Це впливає на об'єктивність такого аналізу і має більшу ймовірність втрати частини важливої інформації, або на здатність її правильно інтерпретувати.

Розвиток технологій фотограмметрії спричинений комерційними потребами: виробництво сувенірів, потреби кіноіндустрії та створення комп'ютерних ігор, комерційний та любительський 3-д друк. Все це надає реставраторам технології та інформацію для створення нових методів збору та

аналізу інформації про стан об'єктів реставрації. Смартфон в руках навіть некваліфікованої людини дає можливість детально зафіксувати тривимірні параметри архітектурної пам'ятки чи скульптури. Наприклад, у віддалених районах зони бойових дій і така інформація стане важливою для збереження культурної спадщини. Доступність даної технології дасть можливість обмінюватися цією інформацією між спеціалістами, вченими та студентами. Такі 3-д скани стануть віртуальними моделями для вивчення професії реставратора чи фахівця музейної справи. На основі результатів багаторазового повторного сканування об'єктів будуть отримані дані, що допоможуть реставраторам точніше оцінювати самі методи та результати виконаної реставрації, і зберегти її точну історію для майбутніх реставраційних робіт.

І найголовніше, розвиток спеціалізованого програмного забезпечення на основі технологій аналізу великих масивів даних, допоможе побачити розвиток руйнівних процесів в пам'ятці, що критично для збереження монументальних творів мистецтва та архітектури. Такий моніторинг допоможе знизити обсяг втручань, та пошкоджень оригінального матеріалу об'єкта.

Мета дослідження - виявити та описати доступний метод збору даних про живопис в ході реставрації шляхом фотограмметрії об'єкта, провести аналіз даних в межах доступного програмного забезпечення, отримати детальну об'єктивну інформацію про стан поверхні живопису.

Завдання магістерської роботи:

1. Обґрунтувати актуальність і цінність доступних методів фотограмметрії для документування та аналізу змін в стані живопису під час процесу реставрації.
2. Вивчити наукову літературу по темі використання фотограмметрії в реставрації та консервації об'єктів образотворчого мистецтва й живопису зокрема.
3. Зібрати необхідний теоретичний матеріал для проведення фотосканування та аналізу змін в отриманих фотосканах.
4. Здійснити фотограмметричне сканування об'єкта живопису.

5. Провести аналіз даних про стан поверхні живопису з використанням програмного забезпечення для роботи з комп'ютерною графікою, аналіз ефективності методу, його переваг та недоліків тощо.
6. Зробити висновки та рекомендації щодо використання фотограмметрії в документуванні змін живопису в процесі реставрації.
7. Підготувати додатки з описом основних термінів, базових понять, процедур, та технічним забезпеченням процесу фотограмметрії живопису й аналізу отриманих даних.

Об'єктом дослідження є фотограмметрія, методи її проведення, обробки й аналізу даних фотограмметрії та доступність устаткування і процедури фотограмметрії для індивідуального позалабораторного дослідження реставратором чи студентом реставратором.

Предметом дослідження є пошук доступного методу проведення фотограмметрії об'єкта живопису, а саме, жіночого портрету на МДФ, з подальшим аналізом зібраних даних. Проведенням процедури фотограмметрії, та представлення результатів й висновків аналізу фотоскану й ортографічного фото живопису, за допомогою програм роботи з тривимірною графікою та програм з обробки фотографій.

Методологія дослідження використовуватиме наступні методи:

1. *Абстрагування* – знаючи про необхідність точного спостереження за станом живопису на початку та в процесі реставрації та знаючи властивість методу фотограмметрії, створювати точні тривимірні моделі, що несуть інформацію про стан поверхні та координати об'єкта в просторі, досліджувати наявну інформацію про оптико-фотографічний метод, про теперішні приклади використання фотограмметрії в реставрації та консервації, розкрити доступні методи фотограмметрії, які можуть бути потенційними інструментами для збору та аналізу даних, котрі будуть корисні в процесах реставрації живопису.
2. *Індукції та дедукції*. Знаючи конкретні задачі які вирішують наявні методи дослідження живопису у реставрації, та обсяг можливостей зі збору даних

методами фотограмметрії створення можливостей розробки гіпотетичного методу експерименту з використанням фотограмметрії для документування змін в ході реставрації живопису. Методи якими користуються в документуванні змін в ході реставрації та дослідженні живопису, описані в додатку А.

3. *Методи аналізу та синтезу.* Провівши загальний аналіз наявних прикладів використання фотограмметрії в реставрації та консервації та наявних методів дослідження предметів живопису в процесах реставрації, дослідник матиме змогу виокремити ту частину інформації, яка допоможе сформулювати гіпотетичний метод проведення експерименту.

В практичній частині використовуватимуться:

1. *Метод експерименту.* Проведення фотограмметрії об'єкта живопису, доступним методом за допомогою любительської цифрової фотокамери чи смартфона та використання наявних програм для моделювання та обробки тривимірних об'єктів на основі фотограмметричних даних.
2. *Вимірювання та графічний метод.* Після отримання фотоскану живопису змоделювати зображення карти висот поверхні об'єктів. Створити спеціальне зображення-мапу та інструкцію до нього, що можна буде використати у разі необхідності повторного сканування, для порівняння внесених при реставрації змін з вихідним станом поверхні живопису. Основні терміни та поняття при роботі з тривимірними об'єктами, зображеннями та даними отриманими від аналізу даних фотограмметрії описані в додатку В.

Аргументація. Дані методи були обрані тому, що для розуміння актуальності методу фотограмметрії в реставрації живопису потрібно систематизувати знання про методи аналізу в реставрації що вже існують, відкинувши методи, які не співставні з фотограмметрією за видом інформації, що можна зібрати методом фотограмметрії. Тому потрібно проаналізувати загальні можливості фотограмметрії та види методів дослідження живопису під час реставрації, виділити спільне та абстрагувати спосіб, у який фотограмметрія може бути використана, і, розуміючи основну концепцію, яка буде лежати в

даному способі, проаналізувати та систематизувати дані про використання фотограмметрії в реставрації та консервації, не тільки живопису, а й в інших задачах зі збереження об'єктів культурної спадщини.

Провівши фотограмметрію ми отримаємо дані, які можна обробляти в графічних редакторах на персональному комп'ютері чи в спеціалізованих хмарних сервісах розробників програмного забезпечення для фотограмметрії. Найменування зазначених програм та методи їх застосування описані в додатку В.

Інструменти матеріали та техніки проведення практичної частини дослідження. Обладнання для проведення фотограмметрії. Для експерименту використовуватиметься доступне обладнання, з розрахунку його вартості для придбання громадянином України чи групою реставраторів за власний кошт, враховуючи інформацію про середню заробітну плату. Для експерименту використовуватимуться цифрова камера з поляризаційним фільтром та двома джерелами світла. Детальний опис обладнання у додатку D.

Даним комплектом обладнання буде зроблено фотоскани живопису, до його реставрації. Після отримання фотоскану, з нього буде отримана ортографічна фотографія та проводитиметься обробка з оптимізації фотоскану для запікання карт нормалей, та висот (див. додаток В). Карти нормалей та висот являють собою графічне зображення рельєфу поверхні живопису, де кожен піксель несе в собі інформацію про напрям, під яким піксель повернутий відносно поверхні зображення (див. додаток В). Використавши карту нормалей ми зможемо оцінити поверхню живопису та пошкоджень на ньому, без оптичних спотворень створених самим зображенням живопису. Карта висот буде використана для отримання маски, що буде використана для швидкої ідентифікації здуття на фарбовому шарі та наявності додаткових фарбових шарів, ґрунту то.що. Використовуючи програми для відображення комп'ютерної графіки, такі як Marmoset Toolbag та Maya (див. додаток В) можна візуалізувати за допомогою

карт нормалей об'єкт живопису, що дасть змогу провести візуальне порівняння в віртуальній сцені з будь-яким кутом та видом освітлення.

Огляд наявної літератури. В процесі даного дослідження було використано два напрямки наукової літератури. Основний складають праці вітчизняних та зарубіжних реставраторів, музейних працівників, мистецтвознавців профільних університетів та організацій, що займаються питаннями реставрації та консервації матеріальної культурної спадщини. Це переважно практичні рекомендації з проведення неінвазивних фізико-оптичних досліджень живопису, архітектури тощо.

Другий блок становлять праці з описами практик дослідження та аналізу об'єктів культурної спадщини, зокрема творів живопису, в процесі фотограмметрії. В цьому блоці переважно іноземні іншомовні джерела, що пов'язано з новизною метода, та нетривалим періодом існування доступної фотограмметрії, та розвитком технологій обробки даних.

Використання методу фотограмметрії широко згадується в роботах пов'язаних з дослідженням об'єктів архітектури та монументальної скульптури, картування та збереження у форматі віртуальних 3-D просторів. Наприклад, печер з настінними розписами та фресок в залишках релігійних споруд. Для аналізу творів зображувального та декоративно мистецтва, фотограмметрія використовується меншою мірою, переважно для отримання цифрових копій експонатів музеїв, що мають складний силует: предмети побуту, зброя, скульптура, інструменти. Однак сьогодні дана технологія активно впроваджується фахівцями та науковцями в процесі реставрації та наукові дослідження творів мистецтва, станкового живопису загалом.

Ключова робота, яка покладена за основу в обґрунтуванні практичної частини даного дослідження, а також для розробки методу аналізу фотосканів живопису, – дослідницька стаття Данте Абате «*Documentation of paintings restoration through photogrammetry and change detection algorithms*» [10].

Розгляд літературних джерел продемонстрував, що піднята в магістерській роботі проблема практично залишається поза увагою сучасних вітчизняних дослідників.

Наукова новизна даного дослідження полягає в освоєнні та адаптації передових закордонних практик застосування фотограмметрії в дослідженні творів мистецтва, та застосування програмного забезпечення з комп'ютерної графіки, для розв'язання дослідницьких задач в реставрації.

Практичне значення даного дослідження полягає, в результатах проведеного експерименту, що фактично є готовою інструкцією до виконання подібного дослідження для творів станкового живопису і є модернізованим варіантом стандартного оптико-фотграфічного дослідження.

Структура роботи. Дипломна робота включає вступ, три розділи, які містять вісім підрозділів, висновки, список використаних джерел і літератури з реставрації, фотограмметрії, музейної справи, історії консервації, історії геодезії та додатків зображень, термінології з комп'ютерної графіки, інструкцій по роботі в графічних редакторах. Загальний обсяг дипломної роботи 60 сторінок, основний текст викладено на 45 сторінках друкованого тексту.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ. СТАЛІ МЕТОДИ НЕХІМІЧНИХ ОПТИКО- ФОТОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТВОРІВ МИСТЕЦТВА ТА ФОТОГРАММЕТРІЯ

1.1. Методи нехімічного оптико-фотографічного дослідження живопису в реставрації та консервації

Методи дослідження творів мистецтва, та живопису загалом, почали свій розвиток з того моменту коли постало питання мистецтвознавчого аналізу. Метою такого аналізу не завжди, а часто і переважно, були не питання консервації чи реставрації, а атрибуції для оцінки вартості твору мистецтва. Другою рушійною силою розвитку мистецтвознавчої науки стала історія, важливою частиною якої є історія мистецтв. Основоположником в цьому напрямку заведено вважати Йоганна Йоахіма Вінкельмана. У своїй праці «Історія мистецтва та стародавності» (1764) він проводить кореляцію розвитку стилів мистецтва та перебігу історичних процесів.

До XIX ст. реставрація та консервація розвиваються майже окремо, та незалежно від мистецтвознавства. Спочатку це звичайний ремонт, який виконують інші художники. Вже в роки буржуазної революції у Франції та Британії, з розвитком музеїв та університетів, постає питання збереження національних культурних цінностей. Реставрація стає професійною і перші ремонтники картин починають працювати в музеях, але їм бракує принципів та правил. Збереження автентичність твору все ще не важливе, ще не прийняті принцип зворотності втручань та золоте правило реставрації – «Реставрація завершується тоді, коли починається гіпотеза»

Наприкінці XIX ст. в першій половині XX ст. це призводить до становлення наукової реставрації. Саме наукова реставрація як явище створює основні нормативні документи, рекомендації, міжнародну політику, що має на меті збереження об'єктів матеріальної культурної спадщини та захисту їх автентичності.

Стимулом цього розвитку, на жаль, стала Перша Світова Війна, що поставила перед тогочасними музеями питання правильного збереження творів мистецтва. Ховаючи експонати від бомбардувань, в метро Лондона, музей Британії виявив пошкодження своїх колекцій пліснявою. Як наслідок інциденту, Доктор Гарольд Джеймс Плендерлейх створює у 1920 році Департамент Наукових та Промислових досліджень. Завданням департаменту було залучення науковців та розробки сучасних хімічних та фізичних технологій, для дослідження та збереження матеріальних творів мистецтва.

Згодом Плендерлейх, буде одним з очільників світового руху збереження культурної спадщини та стане одним з ініціаторів створення Афінської хартії 1931, та очолить ICCROM, одну з основних світових організацій зі збереження культурної спадщини, що займається фаховою розробкою методів реставрації, підготовкою фахівців, стандартизації та поширення досвіду.

Згодом впровадження єдиних стандартів роботи музеїв, консерваторів та реставраторів розвинув реставратор Чезаро Бранті в його роботі «**Teoria del restauro**» [1], які пізніше було закріплено у Венеціанській Хартії 1964 року.

Тому сьогодні дослідження творів мистецтва перед реставрацією, є невіддільною обов'язковою частиною розробки реставраційного проєкту.

Так методичний посібник «Консервація і реставрація об'єктів культурної спадщини. Київ : Саміт-книга, 2022. 434 с.: іл.» розділяє весь проєкт з реставрації пам'яток монументального малярства на кілька основних етапів. Першим йде передпроєктна підготовка, що включає етап комплексного наукового дослідження.

Абстрактно всі дослідження в реставраційному процесі можна поділити за кількома типологіями, наступним чином:

1. Теоретичні та прикладні.
2. Інвазивні та неінвазивні
3. Хімічні та нехімічні

Первинним завжди є теоретична робота зі збору графічних матеріалів, відомостей про попередню реставрацію та робота з бібліографічними джерелами про об'єкт. Наступним є комплексні наукові дослідження де обов'язковими йде збір та документування інформації про зовнішній стан об'єкта. Первинно це методи візуального спостереження з використанням вимірювального приладдя та обов'язковим фотографуванням.

Візуальне спостереження об'єкта в реставрації та фотофіксація цих спостережень відносять до **оптико-фотографічних методів дослідження**, або **оптико-фізичних**. До неінвазивних оптико-фотографічних методів дослідження, за методичним посібником Музею Ханенків, відносять наступні методи [9][5]:

1. ВІЗУАЛЬНИЙ ОГЛЯД ТА ОПТИЧНА МІКРОСКОПІЯ
2. ОГЛЯД В УЛЬТРАФІОЛЕТОВОМУ (УФ) ДІАПАЗОНІ
3. ОГЛЯД В ІНФРАЧЕРВОНОМУ (ІЧ) ДІАПАЗОНІ

Аналіз саме цих методів використовується в даній роботі. Оскільки застосування фотограмметрії є логічним продовженням розвитку візуального методу та доповнює його, а розвиток спеціального програмного забезпечення дозволяє поєднувати дані з усіх трьох методів і створювати, замість схематичного картування об'єкта, повноцінну цифрову копію. Така віртуальна копія може бути використана як карта, з усіма нанесеними на неї даними інших оптичних досліджень.

В даній роботі не розглядаються інші оптико-фізичних методи, оскільки їх інвазивність, та технологічна доступність виходить за межі дослідження. В контексті даної роботи, буде порівнюватися фотограмметрія саме з оптико-фотографічними неінвазивними методами.

Ознайомимося коротко з суттю цих методів

Візуальний огляд. Проводять в порядку створення картини живопису. Спочатку аналізують стан підрамника та полотна, потім ґрунту, стан фарбового шару та аналіз покриття. Огляд проводиться під прямим та бічним світлом. Для

виконання огляду може бути використана оптична мікроскопія, освітлювальні прилади та при необхідності поляризаційні фільтри.

При огляді у прямому освітленні:

- встановлюють матеріал та характер конструкції з якого виготовлена основа картини
- досліджують записану інформацію, як то підписи, інвентарна нумерація, клейма то що.
- встановлюють стан збереження картини, наявність пошкоджень, втрат фарби, забруднень, кракелюр.

При огляді у бічному освітленні:

- проводять фіксацію слідів попередньої реставрації, невеликих втрат, топологічних спотворень поверхні

В обох сценаріях освітлення:

- фіксують сліди деформацій спричинені перетягуванням полотна на інший підрамник, сліди дублювань тощо
- Визначають вид полотна, склад волокна та тип плетіння
- Досліджують ґрунт, його склад наявність імприматури

Основною перевагою даного методу є його неінвазивність, відсутність руйнувань об'єкта в процесі дослідження. Огляд не потребує дороговартісного та дефіцитного устаткування і є базовим.

Недоліком даного методу є його висока залежність коректності суб'єктивної оцінки фахівця та ймовірність втрати великої кількості інформації, щодо прихованих деструктивних змін у творі. Бо оцінка повністю залежить від фахової підготовки та рівня досвіду реставратора. Другим недоліком є відсутність інформації про вид матеріалу, приховані записи, підмальовок, копіювальну сітку, визначення часу коли були внесені зміни то що. Для отримання цієї інформації використовують оптико-фотографічні методи на основі Ультрафіолетового та Інфрачервоного діапазону спектра.

А для збільшення точності та зручності використання інформації на великих об'єктах живопису, як то монументальний настінний живопис, використовують процедуру картування об'єкта. Це необхідно для отримання схематичного зображення – мапи реставрації. На мапі вказують втрати, втручання деформації та іншу важливу інформацію, яку не можливо викласти в у форматі реставраційної документації для невеликих об'єктів, лише в записах та фотофіксаціях, без ризику ускладнити процес користування такою документацією та точність аналізу.

Фотофіксація та дослідження в Ультрафіолетовому (УФ) діапазоні спектра. Метод базується на принципі емісії світла, люмінесценції та непрозорості певних матеріалів під дією УФ світла. Дослідження проводиться під Ультрафіолетовою лампою в діапазоні 310-400 нм. Саме явище люмінесценції художніх матеріалів пов'язане з процесом полімеризації в результаті окиснення. Такий вплив стає помітним через 10-15 років. Лаки з часом втрачають прозорість, що помітно під дією УФ променів, а окремі смоли та пігменти випромінюють світло більш яскраве та іншої довжини (кольору) ніж ми спостерігаємо при освітленні лампами денного світла, що власне і є явищами емісії та люмінесценції.

Завданням методу УФ дослідження є:

- визначення типу лакового покриття
- ідентифікувати приблизний час виконання робіт
- ідентифікувати дефекти лакового покриття та зміни в його товщині внаслідок реставрації
- визначити матеріальний компонент пігментів та інших хімічних речовин за флуоресценцією матеріалів

Переваги методу. Малоінвазивне дослідження при нетривалому використанні УФ випромінювання. В комбінації з фото фіксацією документування відбувається миттєво не потребує тривалого впливу.

Недоліки методу. Шкідливе для очей, потребує використання УФ захисних окулярів

Фотофіксація та дослідження в ІЧ діапазоні спектра. Огляд живопису в Інфрачервоному діапазоні світла проводять під прямим та наскрізним освітленням, коли освітлення проходить через полотно. Обладнання:

1. Лампа зі спіраллю розжарювання потужністю від 300 до 500 Вт
2. Спеціалізована камера для ІЧ фотографії в діапазоні 1100-2400 нм
3. Модифікована фотокамера з чорно білим фільтром для зйомки в ІЧ діапазоні 700+110 нм

Завдання методу дослідження в ІЧ:

- виявити приховані під шарами фарби та лаку підготовчі малюнки, підписи, наявність копіювальної сітки
- Частково визначити вид пігментів (залізовмісні сірі, кадмії та кіновар білі в ІЧ світлі)
- Виявити авторські правки що відрізняються від записів при реставрації

Основні види оптичних методів, що не потребують складно доступного устаткування, поступово розширюються. Необхідність отримання більш точної цифрової мапи стану живопису, невідворотно призводить до використання інтерактивних рішень, створення зручного для дослідника інтерфейсу програмного забезпечення, та використання програм Штучного інтелекту для аналізу та класифікації всієї зібраної інформації

1.2. Теоретичні основи фотограмметрії

Фотограмметрія, як метод вимірювання відстані та координат точки на об'єкті у просторі, з'явилася в кінці XIX ст., імовірно в 1851 р. Винахідником методу вважають, французького військового інженера, фотографа та геодезиста, Еме Лосседата. Він вперше запропонував метод обчислення відстані до об'єкта та його координат на основі фотографії. Але камера Лосседата, що мала використовуватися в аерозйомці, не набула поширення і фактично залишилась

прототипом. Однак його ідеї почали використовувати в геодезії в середині ХХ ст.

Суть методу фотограмметрії полягає в порівняльному обчисленні зображення однієї й тієї ж точки, на ділянці поверхні (ландшафту, або об'єкта) з різних точок зйомки. Зйомка проводилася на ту саму камеру в якій точно була відома фокусна відстань об'єктива - f

Знаючи f камери, та топографічний базис B (відстань між камерами, або точками зйомки). Робили вимірювання координат точки зйомки на основі двох знімків

- x_1, y_1 - для першого знімку
- x_2, y_2 - для другого

Вимірювання робилося на спеціальному устаткуванні - стереокомпараторах та стереоплотерах. Дані прилади мали мікрометричні гвинти, після чого проводилася триангуляція координат точки зйомки.

Формула вимірювання для кожної камери наступна “формула 1”

де

C_i - координати центра камери (для першої камери це $(0,0,0)$, для другої - $(B,0,0)$)

t - масштабний параметр (відстань вздовж променя).

Перетин двох променів дорівнював тривимірним координатам точки.

Для цього будувалися координати променів проєкції камери (центру лінзи камери), а далі знаходили P (місце де два промені перетинаються у просторі)

Координати точки визначаються за системою “формула 2”

де d_1, d_2 напрямні вектори променів

Розв'язавши рівняння системи отримували P “формула 3”

Знаючи координати знаходили відстані між точками зйомки та точкою ***P*** [17].

Цей принцип досі використовується у всіх геодезичних вимірюваннях та в сучасній фотограмметрії. Другою важливою компонентою сучасної фотограмметрії є ідентифікація вимірюваних точок в кадрі. Оскільки для даної роботи, не важливим точне пояснення принципів машинного навчання ідентифікації зображення і воно є складною обширною темою, було використано метод абстрагування, для пояснення того як це працює.

Кожна фотографія складається з певного числа пікселів (див Додаток В) по горизонталі та вертикалі. Програма обчислює подібність та відмінність пікселів, перевіряючи всі зображення поверхні об'єкта з різних ракурсів на подібність значень яскравості та кольору. Порівнявши подібності та відмінності між кожним пікселем, в кожному зображенні, програма ідентифікує окремі пікселі як точки ***P***, з вищезгаданого рівняння, і проводить автоматичні розрахунки їх координат у просторі. Після виявлення певної кількості таких точок програма створює тривимірну модель у форматі так званої хмари точок - **Point Cloud** (або **Mesh dense Point Cloud**).

Після цього програма може перетворити **Point cloud** в тривимірну модель, у вигляді сітки **3D Mesh**, що складається вже з площин **Triangles**, та вершин **Vertices**. Використовує інструкцію, **Shader**, для відображення 3D об'єкта в програмі для 3-д графіки, який в свою чергу використовує спеціальні файли зображення, **Texture map**, для проєкції інформації кольору, рельєфу висот, нормалей поверхні, чи іншої фізичної властивості матеріалу передбаченої інструкцією **Shader**. Такий тривимірний об'єкт можна використовувати в програмах графічних редакторів для комп'ютерної графіки чи проєктування.

Власне сама фотограмметрія закінчується на етапі отримання файлу типу **Point Cloud**. Однак файл такого формату не підходить для використання в аналізі поверхні чи інших властивостей об'єкта, хай то твір живопису або архітектури. Оскільки ми можемо перетворити **Point Cloud** в **3D Mesh** одразу

в програмі обчислення фотографії для фотограмметрії. Ми маємо два види сценарію для роботи з даними:

Аналіз та інтерпретація даних порівняння двох чи більше **Point Cloud** файлів одного об'єкта, на різних етапах роботи з ним методами **C2C** або **M3C2**

1. Аналіз самого **3D Mesh** та **Texture map**

Для аналізу **C2C** або **M3C2** потрібно отримати дані чи графічні зображення за допомогою спеціалізованих програм для геодезії як то Orfeo ToolBox, або інша програма що порівнює файли **Point Cloud**. Дані методи базуються на високоточному порівнянні двох та більше фотосканів та створені на основі цих даних ортографічних зображень поверхні ділянки, чи всього об'єкта якщо це картина, з маркуванням відмінності між двома фото сканами, та їх інтенсивності. Переважно це спеціалізовані програми для геодезичних досліджень.

В іншому методі, ми можемо перетворити **Point Cloud** в 3-д об'єкт типу **3D Mesh**, і створити на основі інформації **Point Cloud** одне чи кілька детальних поверхневих зображень типу **Texture map**. Такі зображення можуть нести в собі тільки певний вид інформації об'єкта. Цю інформацію використовує програмна інструкція типу **Shader**. Ця інструкція фактично “фарбує» поверхню об'єкта пікселями з **Texture map** файлів і програмує як саме вона виглядає для спостерігача у сцені графічного редактора для якого **Shader** створено. З **Point Cloud** ми можемо отримати три основні види **Texture map**:

- колір самого об'єкта що називається зазвичай **diffuse map** або **albedo map** (див. Додаток В)
- Зображення рельєфу об'єкта у форматі карти висот (**height map**)
- зображення рельєфу об'єкта у форматі карти нормалей (**normal map**)

Зображення **Texture map** типу **height map** та **normal map**, передають інформацію тільки про дрібний рельєф об'єкта, який не є частиною “сітки» тривимірного об'єкта **3D Mesh**. Також, під час фотограмметрії ми

Детально значення всіх спеціальних термінів в цьому розділі можна дізнатися у Додатку В.

1.3. Перспективи розвитку фізико-оптичних методів та фотограмметрії в дослідженні живопису

В наш час комп'ютерні технології стають все доступнішими, обчислення які років 20 назад міг виконати лише дорогий комп'ютер, сьогодні може виконати процесор смартфона чи навіть смарт-годинника. Технології стають складнішими, але одночасно і доступнішими. Розвиток інтернету та хмарних сервісів, дає можливості побудови абсолютно іншої екосистеми взаємодії для профільних організацій у сфері реставрації, геодезії, музейної справи, освіти чи мистецтвознавства. Маючи можливість доступного збору та передачі інформації, ми можемо скористатися потужностями віддалених комп'ютерів, кваліфікованих працівників та спеціалізованого програмного забезпечення. Останнє особливо змінюється під дією розвитку технологій Штучного Інтелекту

Прикладом таких технологій є набір оптичних сканерів та технологій використаний дослідниками з Делфтського Університету в Нідерландському музеї Мауріцгейс в Гаазі, для створення цифрової мапи детального аналізу картини Яна Вермера - Дівчина з перловою сережкою. Музей провів аналіз за допомогою 10 різних оптичних методів, з яких два методи були топографічного характеру, тобто створювали комбіноване зображення, цифрову мапу з топографією живопису і додатковою інформацією про колір, рефракцію та розсіювальні властивості поверхні.

Було застосовано такі топографічні методи аналізу:

- топографічним кольоровий сканер з високою роздільною здатністю (Ultra-high resolution color/topography scanner)
- Сканер кольору/глянцю/ топографії (Colour/Gloss/Topography scanner)
- Мікроскопічне 3-д сканування

Усі методи базуються на технології фотограмметрії, але в дослідженні ще не використовувалися алгоритми аналізу на основі **Machine Learning**

Вже понад 10 років моделі машинного навчання працюють з даними фотограмметрії типу **Point Cloud** для обробки даних порівняльного аналізу в геодезії, та архітектурі. Про принцип і результати роботи такої моделі на основі технології **Machine Learning** пише Юрген Доллер у своїй статті «**Geospatial Artificial Intelligence: Potentials of Machine Learning for 3D Point Clouds and Geospatial Digital Twins**» [13]. Де ШІ використовується для обробки даних та побудови оптимізованих просторових моделей двійників, на основі фотограмметричного сканування. Де основною роботою ШІ є виявлення рухомих, тимчасових об'єктів, фотограмметричних артефактів (спотворень в 3-д скані оптичного характеру)

Сьогодні ШІ вже використовуються для роботи з результатами оптико-фотографічних досліджень, та фотограмметричних сканувань, в проєктах реставрації та консервації об'єктів культурної спадщини. Зокрема монументального живопису та архітектури. Група італійських вчених на чолі з Массіміліано Пепе, з Політехнічний інститут Барі, Італія., використали програму Штучного Інтелекту **Random Forest**, для роботи **Point Cloud** сканом залишків Храму Гери в Італії. Програма використовувала алгоритми **Machine Learning (ML)** та дані глобальної супутникової навігації (**GNSS**), для семантичної класифікації даних 3-д сканування, та 3-д реконструкції Храму. Фактично **Random Forest** виконав великий обсяг роботи з розпізнавання частин **Point Cloud** що не належать до архітектури храму, а є сторонніми об'єктами. Програма відділила частини, класифікувала їх за типом, замінивши велику кількість вузькоспеціалізованих працівників з фотограмметрії, що мали виконати цю рутинну роботу.

Про розвиток та потенціал семантичної сегментації результатів фотограмметрії на основі технологій штучного інтелекту, за для аналізу та збереження об'єктів культурної спадщини, пише інший вчений Джанхонг Жао

в статті ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume X-1/W1-2023 ISPRS Geospatial Week 2023, 2–7 September 2023, Cairo, Egypt. Він оглядає розвиток використання технології серед ключових дослідників та фахівців в галузі збереження об'єктів культурної спадщини, та відмічає здатність технології до семантичного виявлення не лише частин об'єкту, а і процесів руйнації, виявлення яких алгоритмами ML відбувається набагато швидше, ніж коли цю роботу виконують люди протягом довгого проміжку часу. А найголовніше там де люди цього не помітили.

В травні 2025 року вийшла стаття **Aster Van Vijle** [15] про дослідження оптико-фотографічних даних за допомогою Штучного Інтелекту. Вчені використовували широкий список оптичних досліджень,

Для обробки всього цього об'єму інформації, відокремлення спотворень та інтерпретації багатовимірних даних, традиційний ручний аналіз є дуже трудомістким. Існує велика вірогідність помилки та недостатність охопленням інформації для її інтерпретації, при обробці вручну. Для аналізу було застосовано ML програму ШІ. Основна тема статті присвячена питанню розвитку та співпраці фахівців з консервації та технологій Машинного Навчання. В експерименті досліджувалася картина Франциско Гої “портрет Донни Ізабель де Порсель”. Як висновок автор зазначає що такі технології дозволяють акумулювати дані аналізу про велику кількість дрібних деталей які при суб'єктивному спостереженні часто здаються незначними й не впливають на висновки дослідника, рівнозначно з даними про великі помітні деталі. Другою безумовною перевагою використання ML в оцінку даних досліджень, є швидкість виконання таких робіт.

Що ж до доступності таких технологій для реставраторів, студентів, для закладів освіти та музеїв, які не мають великого фінансування чи підтримки дороговартісної технологічної бази. На мою думку, всі оптичні технології, що засновані на цифровій фотографії та відео зйомці, можуть бути доступними та достатньо інформативними з використанням та поширенням сучасних програм

на основі ШІ, зокрема ML. Вже сьогодні маючи смартфони та панорамні камери 360 ми можемо створювати цілком якісні інформативні **Point Cloud** об'єктів культурної спадщини та матеріальних творів мистецтва.

Питання доступності технологій теж серйозно цікавить сьогоднішню наукову спільноту. Вищезгаданий мною Массіміліано Пепе спільно з його колегою з Румунії, Сіна Різаеї провели експеримент з порівняльного сканування сферичними камерами **Insta 360 One X**, відкаліброваними через **Agisoft Metashape** (аналог програми **Capture Reality**, що було використано в даному експерименті), та високоточним геодезичним лідаром **Leica RTC 360 laser scanner**. Середня ціна камери, що була у вжитку, становить приблизно 8000 гривень, тоді як ціна вказаного лідару, коливається від 2 до 3 мільйонів гривень, залежно від комплектації та версії. Про результати свого експерименту вони пишуть у статті «**Quality Analysis of 3D Point Cloud Using Low-Cost Spherical Camera for Underpass Mapping**». Отриманий результат мав похибку 0,05 метри на 1 метр, що в питаннях дослідження та збереження культурної спадщини є більш ніж точним для використання.

Шульц Роман Володимирович, професор Київського Університету Будівництва та архітектури. Проводить фотограмметричне сканування за допомогою смартфона MEIZU M3 Max та програму **Agisoft Photoscan** про результати дослідження він пише у своїй статті «**New opportunities of low-cost photogrammetry for culture heritage preservation**». Підсумовуючи висновки статті, точність отриманих даних більш ніж необхідна, для аналізу та розробки проєкту з реставрації досліджуваного об'єкта (оборонне укріплення часів Другої світової війни).

Як ми бачимо оптико-фізичні методи досліджень, досі широко використовуються, а їх технології розвиваються, стають більш інформативними та корисними в парі з використанням технологій ШІ. **Фотограмметрія** стає не просто повноцінним методом, а замінює звичайний **оптико-фотографічний** метод дослідження в живописі бо фактично є вдосконаленою варіацією цього

методу, що видно по результатах одного з найбільш передових досліджень живопису від Делфтського Університету. Доступність та мобільність технологій фотограмметрії, її точність зростають з кожним роком, як і доступ до спеціалізованого програмного забезпечення. Рівень компетенцій для освоєння технології не ви та не потребує спеціальної технічної освіти, а процес виконання такої роботи максимально прикладний та інтерактивний.

РОЗДІЛ 2 ФОТОГРАММЕТРІЯ В РЕСТАВРАЦІЇ ЖИВОПИСУ

2.1. Аналіз практик фотограмметрії в реставрації живопису

2.1.1. Типологізація Фотограмметрії залежно від виду та об'єкта зйомки

Для розуміння місця технології фотограмметрії в процесах реставрації живопису ми маємо розділити ці методи типологічно залежно від, конкретного виду фотограмметрії, типу об'єкта фото сканування, та виду подальшої обробки даних. З цього абстрагуємо, що виникає кілька типологій фотограмметрії в проєктах з реставрації об'єктів культурної спадщини та інших матеріальних творів мистецтва.

Типологія за технологією сканування:

1. З використанням пари лідар/камера
2. З використанням стенда для фотограмметрії
3. Зйомка з рук з використання будьякої цифрової камери з об'єктивом типу Prime Lense (об'єктив з фіксованим)
4. Відеозйомка з дрона чи рухомого штатива
5. Зйомка зі смартфона
6. Зйомка на камеру 360

Типологія за об'єктом фото чи відеозйомки:

1. Зйомка екстер'єрної частини архітектури/скульптури монументальної,
2. Зйомка інтер'єрної частини архітектури
3. Зйомка монументального живопису/рельєфу
4. Зйомка станкового живопису
5. Зйомка скульптури круглої станкової
6. зйомка дрібної пластики
7. Мікроскопічна 3-д зйомка поверхні живопису

Типологія за видом отриманих вихідних даних що використовуються в дослідженні:

1. Хмара точок **Point Cloud**

2. Тривимірний об'єкт **3D Mesh** з текстурними мапами **Texture map**

Для розуміння де який метод можливо застосовувати додаю наступну таблицю. **Додаток А**

2.1.2. Аналіз оптимальних методів зйомки фотограмметрії в завданнях реставрації та консервації

Якщо оцінити межі застосування різних пристроїв, то стендова зйомка для фотограмметрії, та зйомка мобільним телефоном, є найбільш вживаними методами. І з погляду доступності така зйомка є найбільш доступними варіантами. Камери типу 360 теж дуже доступні, але їх необхідність в калібруванні і обмежені можливості для переважно інтер'єрної зйомки, сильно нівелюють сферу їх застосування, однак пара таких камер здатна швидко зібрати інформацію про поверхню та монументальний живопис інтер'єрі, наприклад храму з фресками чи печери з наскельними розписами.

Тому в даній роботі буде проаналізовано випадки та можливості застосування фотограмметрії на цифрові фото/відеокамери та смартфон, при зйомці з фіксованого положення зі спеціальним світлом та з рук.

Розглянемо ці два основні способи

Метод фотографії у фотограмметричному станку чи з фіксованих положень

Даний метод умовно можна розділити на два види:

1. коли камера зафіксована в одній позиції, а об'єкт зйомки повертається на спеціальному предметному столику
2. коли камера рухається навколо об'єкта з фіксованою фокусною відстанню, за допомогою механізмів станка чи переміщується вручну зі штативом.

В обох видах використовується така сцена освітлення, при якій освітлення буде відображати однакову інформацію, тобто значення кольору та кількість відображеного світла будуть однакові, незалежно від положення камери відносно об'єкта зйомки, при умові однакової фокусної відстані до об'єкта. Тому

важливо для цифрових камер використовувати об'єкти з фіксованим фокусом, або відключеним автофокусом для нефіксованих об'єктів.

Такі методи зйомки чудово підходять для детального сканування невеликих об'ємних предметів в першому варіанті, наприклад станкової скульптури, кераміки, то що. Та живопису чи будь-якої поверхні що може бути розміщена на площину, наприклад, полотно живопису чи стіна з фресками.

Перевагою цього методу є можливість отримання надзвичайно точного фотоскану з мінімальними просторовими спотвореннями які залежать лише від якості фотокамери та лінзи. А головне можна отримати зображення чистого кольору об'єкта без бліків матеріалу, власних тіней та температурних спотворень кольору від джерела світла.

Метод зйомки з рук цифровою камерою чи на смартфон

Відповідно до обраного інструменту ми маємо кілька варіантів зйомки

Метод зйомки на цифрову камеру без кільцевого спалаху

Метод зйомки на цифрову фотокамеру вимагає переміщення довкола об'єкта у такий спосіб, щоб усі знімки були зроблені з однакової фокусної відстані в одні часові рамки, бажано в умовах однакового освітлення. Ця задача вирішується шляхом зйомки під просто неба в умовах рівномірної хмарності, в день, коли ми маємо однаково направлене розсіяне світло та відсутні різкі падаючі тіні. Важливою умовою такої роботи є наявність звукового датчика фокуса. Таку зйомку можна проводити як з поляризаційним фільтром на об'єктиві, так і без. Використовуємо фільтр коли достатньо світла та потрібно отримати зображення лише кольору на поверхні об'єкта, без бліків та переекспонованих ділянок. Не використовуємо фільтр, коли світлосили об'єктива недостатньо та для дослідження не так важливо відображене світло. Наприклад, при зйомці матових поверхонь, каменю, дерева, тиньку то що.

Переваги такого методу, максимальна доступність при наявності камери та мобільність. Такий варіант чудово підходить для фотограмметрії частин

архітектури, монументальної круглої скульптури невеликих розмірів, чи станкової скульптури в екстер'єрі та мозаїки в екстер'єрі.

Недоліком цього методу є залежність від погодних умов, часу зйомки та світлосили і якості лінзи.

Метод зйомки на цифрову камеру з кільцевим спалахом та поляризаційними фільтрами

Даний метод по суті нівелює всі недоліки зйомки без спеціального спалаху, і майже не поступається по точності методу зйомки в станку. Єдиним його суттєвим мінусом є вартість та вага спеціального спалаху, та запасних елементів живлення до нього. Також для спалаху потрібно виготовити чи замовити спеціальну насадку з поляризаційним фільтром. Важливим є також параметр потужності спалаху, адже в умовах зйомки просто неба він має пересвічувати силу сонячного світла, і повністю заповнювати падаючі тіні які створені світлом сонця. Метод такої зйомки широко використовується в отриманні фотосканів для кіноіндустрії, та виробництва комп'ютерних ігор. Однак і в дослідженнях археологів та реставрації теж. Даний спалах застосовувався для зйомки при фотограмметрії фресок в Резиденції Ансбах, Баварія[20]. Дослідники скористалися можливістю зробити детальний фотоскан фрески, поки там стояли риштування на відстані 2 метри від стелі. Оскільки стеля має форму напівциліндра, а освітлення на стелі вкрай низьке і нерівномірне, саме фотограмметрія на DSLR камеру з кільцевим спалахом Godox AR400 дала можливість дослідникам виконати дуже точне сканування

Фотограмметрія за допомогою мобільного телефону

На сьогодні такий вид зйомки є найменш використовуваним у професійній фотограмметрії, але одночасно найбільш доступним і найбільш поширеним. Тому технологія постійно вдосконалюється. Для фотосканування потрібен лише смартфон, та спеціальна програма, наприклад **Reality Scan** від розробника більш професійної програми **Capture Reality**, для обробки фотографій та створення **Point Cloud** фотосканів з фотографій та відео. Ключовою відмінністю

фотограмметрії за допомогою мобільного телефону є програмне калібрування фокус, яке здійснює програма під час зйомки, тому якість такого сканування поступається зйомці на цифрову камеру в окремих сценаріях зйомки. Такий спосіб створення зображень використовує **SfM-MVS** метод. **SfM (Structure from Motion)** - це перший етап де програма визначає контрольні точки в кадрі, на які потім орієнтується для триангуляції координат. **MVS (Multi-View Stereo)** це друга частина методу, в її основі той самий принцип, що і спосіб запропонований Еме Ласседатом. Це стереофільмування камерами смартфона з визначенням кутової відстані до об'єкта, позаяк сьогодні більшість смартфонів мають ще й «камеру» яка насправді є лазерним далекоміром автофокусу. Метод має багато недоліків які обумовлені в основному обмеженням розміру матриці камер, та швидкістю процесора, однак сучасні смартфони які здатні знімати відео в роздільній здатності 8k 7680x4320 зі швидкістю 30 кадрів на секунду, це в рази якісніше при повільній зйомці з короткої відстані ніж могли повнокадрові професійні камери 10 років тому. Так наприклад, повнокадрова професійна камера Nikon D750 яка дуже поширена серед професійних фотограмметристів і зустрічається в кількох наукових дослідженнях з використанням фотограмметрії [12] має розмір кадру 6016 x 4016 пікселів, її основна перевага полягає у розмірі та якості лінзи, та технології фокусування яка вища ніж у смартфонів, та на коротких відстанях ця різниця нівелюється. Прогрес фотограмметрії зі смартфонами також активно компенсується їх розвитком та розвитком програм для них.

Так дослідницька група на чолі з Kevin C. Zhou створила власний фотограмметричний алгоритм, що працює за методом **SfM-MVS** який створений спеціально для роботи з руки для фотограмметрії мезоскопічних зразків [21]. Дослідники заявили що вони отримали метод з точністю до десятків мікрометрів на телефон Samsung Galaxy S10+. Розвиток такої технології фактично дозволяє проводити мікроскопічну фотограмметрію яка застосовувалась Делфтським Університетом для 3-д мікроскопії картини

«Дівчина з перловою сережкою» [14] при наявності відповідної сцени освітлення.

Для даного експерименту найбільш інформативною є робота дослідника Данте Абате, під час роботи реставрацією візантійської ікони XVIII ст., із зображенням Апостола Петра, з Фонду архієпископа Макарія III [10]. Фотограмметрія проводилася методом зйомки на DSLR камеру в спеціально облаштованому приміщенні з двома джерелами денного світла, та поляризаційними фільтрами. Абате виконав серію фото сканів після кожного важливого етапу фотограмметрії.

Отримані дані у форматі Point Cloud та ортографічне зображення порівнювалися за допомогою геодезичного програмного забезпечення Orfeo ToolBox [10, ст. 6] за алгоритмами **MAD (Multivariate Alteration Detection)** для двовимірних зображень отриманих з ортографічної проєкції тривимірної моделі. Та порівняння за алгоритмом **M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison)**

Ортофотографії отримуються шляхом проєкції інформації з кожної фотографії масиву фотографій для створення фотоскану. І тому максимально можливий розмір ортофотографії залежить від найменшого розміру пікселя з усіх фотографій що були зроблені. Наприклад розмір пікселя 0,1 міліметра, а розмір живопису 40*60 см. Це значить що ми можемо отримати фотографію картини з роздільною здатністю 4000*6000 пікселів

MAD алгоритм зіставляє два ортографічних зображення встановлює подібність та відмінність пікселів на них, та створює точну багаторівневу мапу з кольоровим позначенням змін що відбулися та маркуванням їх інтенсивності.

M3C2 алгоритм подібний до **C2C (Cloud to Cloud)** порівнює безпосередньо хмари точок кількох файлів з даними **Point Cloud**

Данте Абате виконав 11 фотограмметричних сканувань. І порівнював алгоритмом **MAD** кожне з них між собою, отримавши схематичні зображення.

Важливо, що Абате обрав розмір цифрового зображення рівний зображенню самої досліджуваної ікони та отримав невелику щільність зображення ортофото. Розмір пікселя в абате склав всього 0,2 мм тобто розмір порівнюваних ним ортофотографій склав всього 1700*2100 пікселів. Що на мою думку не є інформативним. Припустимо, що на іконі є місця втрат розміром всього 3*3 мм, врата фарби, ритвина чи забруднення, це значить що візуально в пікселях, таке місце буде складатися з 15*15 пікселів. Піксель є по суті квадратом одного кольору, тому враховуючи що розмір вихідних фото становив 6720×4480 пікселів, він міг використовувати для порівняння ортофотографії в 3,3 рази більшого розміру. Сам дослідник не пояснює причини у своїй роботі, можливо це пов'язано з необхідністю зберігати точне позиціонування пікселів на кожній ортофотографії.

2.2. Технічні вимоги та устаткування для проведення фотограмметрії

Отже, підсумовуючи інформацію з попереднього пункту, та доповнюючи далі буде описано устаткування для фотограмметрії, вимоги до нього та вимоги для проведення фотограмметрії.

Вимоги та обмеження в проведенні фотограмметрії

Головні обмеження в проведенні фотограмметрії:

1. Відсутність постійної незмінної сцени освітлення. тобто всі джерела світла є нерухомі, і в сцені на об'єкті зйомки не мають з'являтися нові тіні, чи відблиски
2. Неможлива зйомка рухомих об'єктів
3. Неможлива якісна зйомка об'єктів на фоні рухомого фону, якщо фон знаходиться в діапазоні глибини різкості зйомки. Тобто в зоні фокусування камери не має бути змін крім передбачених сценарієм зйомки
4. Неможлива зйомка прозорих чи напівпрозорих об'єктів
5. Зйомка дуже блискучих об'єктів, не можлива без поляризаційних фільтрів на об'єктиві та джерелі світла, які налаштовані так що у видошукачі камери відсутні будь-які бліки на глянцевиx поверхнях.

Вимоги для проведення фотограмметрії:

1. Наявність у цифрової камери фіксованого фокусу об'єктиву, або програми автоматичного калібрування кадру за алгоритмом **SfM-MVS** (актуально для дронів, відеозйомки та смартфонів)
2. Наявність поляризаційного фільтра для світла та об'єктива для зйомки блискучих непрозорих поверхонь

Рекомендовані вимоги щодо устаткування

Для зйомки зі штатива чи у станку на цифрову камеру:

1. Розмір матриці камери не менше 20 МП (мегапікселів)
2. Перевага у використанні повнокадрової камери, а не обрізаного формату
3. Об'єктив камери має бути з фіксованим фокусом
4. Оптимальний розмір фокусної відстані для фотограмметрії ~40 мм +/-5 мм
5. Наявність картки чистого білого, або середнього сірого кольору, для калібрування балансу білого на отриманих фото та налаштування сцени освітлення
6. наявність в камери затримки спуску затвора, або дистанційного спуску з синхронізатором спалаху, за умови використання кільцевого спалаху
7. штатив на колесах, або конструкцію фіксації та радіального переміщення камери довкола об'єкта зйомки на однаковій відстані від центру зйомки
8. Два освітлювальних прилади однакової кольорової температури світла, зі штативом, розсіювальною насадкою та екраном з поляризаційного фільтру.
9. наявність персонального комп'ютера чи ноутбука що підтримує рекомендовані вимоги розробника програмного забезпечення для фотограмметрії.

Вимоги для зйомки на смартфон

При зйомці на вулиці:

1. Можливість встановлення програми reality scan чи аналогічної програми
2. Зареєстрований акаунт на сайті SketchFab

3. наявність достатнього денного освітлення, бажано розсіяного коли небо затягнуте хмарами

При зйомці зі штатива використовуються всі ті самі вимоги що і до фотокамери, крім спеціального обладнання для камери. Важливим є також стабільність сцени освітлення, тому для зйомки потрібно використовувати додаткове освітлення закріплене на смартфоні з поляризаційним фільтром, наприклад, штатив з кільцевим світлом для зйомки влогів.

2.3. Види роботи з даними в процесі фотограмметрії та аналізу її результатів

Під час виконання фотограмметрії ми будемо поступово отримувати новий тип даних. тому вся робота з фотограмметрії поділяється на етапи що слідують одне за одним. Подібно трубопроводу, послідовність цих робіт виконується тільки в одному порядку, і неналежне виконання будь-якої з попередніх умов унеможлиблює виконання наступної. Крім самої фотограмметрії, для деяких видів аналізу нам потрібно буде скористатися програмами для подальшої обробки 3-д об'єкта та його текстур

2.3.1. Порядок виконання фотограмметрії

- Фотозйомка
- Обробка та конвертація фотографій
- Експорт фотографій в програму створення **Point Cloud**
- Генерація хмари точок
- Обрізка хмари точок до меж досліджуваного об'єкта
- Генерація **3d Mesh** та **Texture Map**
- Генерація ортофотографії при необхідності
- експорт 3-д об'єкта та текстур

2.3.2. Робота з даними в 3-д редакторі

- Створення **Low Poly 3D Mesh** (низько полігональної моделі копії)
- **UV** розгортка об'єкта (див. Додаток Б)

- *Запікання* (baking) з фото скана **Texture Maps** (albedo, normal, height map)
- Експорт **Texture Maps**
- Налаштування **shader** для нового об'єкта
- Аналіз **Texture Maps** або ортографічної фотографії

Детальна інструкція до виконання описаної роботи у Додатку Г

Файлові формати даних що використовуються в фотограмметрії:

1. Файлові формати для ресурсних фото - PNG, JPEG
2. Файлові формати для **Point Cloud** - LAS, LAZ, PLY, E57, XYZ
3. Файлові формати **3D Mesh** - OBJ, FBX, GLTF
4. Файлові формати для **Texture Map** - PNG, JPEG, Targa
5. Файлові формати для ортофотографії - TIFF

Поширені програми для фотограмметрії:

1. Agisoft Metashape
2. Reality Capture
3. 3DF Zephyr
4. Pix4Dmapper
5. Meshroom (AliceVision) – безкоштовна, open-source

Висновки, для проведення фотограмметричного дослідження живопису достатньо високої точності, найкраще підійде цифрова камера на штативі з додатковим освітленням та поляризаційними фільтрами. Або смартфона з сучасною великою матрицею. Та комп'ютера для обробки даних що відповідає системним вимогам програмного забезпечення.

Процес роботи складається зі збору фотографії, отримання фотограмметричної хмари точок та похідних з неї ортографічних фото об'єкта та 3-д моделей. На основі цих даних проводиться візуальний аналіз як в класичній оптико-фотографічній експертизі, або аналіз через спеціалізоване програмне

забезпечення, що виявляє зміни з порівняння двох чи більше фотосканів одного об'єкта.

РОЗДІЛ 3 ФОТОГРАММЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖИВОПИСУ АНАЛІЗ ДАНИХ

3.1. Фотограмметричний експеримент

3.1.1. Вхідні дані про об'єкт та обладнання експерименту

В ході виробничої практики з реставрації творів живопису, керівником практики, Такіровим Тімуром Нігімітуллаєвичем, було обрано окремо роботу для реставрації, а окремо для фотограмметрії. Робота яка реставрувалася мала численні прориви полотна тому не підходила на початковому етапі для даного дослідження. Оскільки застосоване в даному дослідженні обладнання для фотограмметрії приватне та не належить Університету, для дослідження було обрано роботу не з Фондів музею чи університету, а надано приватною особою.

Дані про об'єкт дослідження

Картина живопису що досліджувалася є жіночим портретом голови в три чверті “рисунок 1”. Картина виконана олійними фарбами на ДВП.

Розмір картини 485*609 мм, товщина ~ 2.5 мм.

Портрет виконано в імпресіоністичному стилі, ймовірно в техніці алла прима. При первинному огляді не виявлено слідів імприматури та гризайлі.

Картина переважно в теплих тонах, тепло-холодна кольорова гармонія та компліментарні кольори. Холодні тони в одязі і підкреслено тепла з жовтогарячими відтінками шкіра обличчя, можливо після реставрації загальний тон картини стане холодніший, але ідея кольорового рішення загалом не зміниться.

Портрет статичний, виражає спокій та умиротворення особи. Тіні та блік в зіниці вказують на те що була використана фронтальна сцена освітлення. Світло приходить згори трохи зліва, тому різкі падаючі тіні майже відсутні, а ті що є, з права від кінчика носа та за відворотом коміра, неглибокі. Тому можна припустити що світло більш розсіяне.

Автор картини та рік створення невідомий, підписів на картині не вивлено.

Сама робота в дуже жахливому стані, з великими втратами фарбового шару, з інтенсивним кракелюром який осипається, та відслоненням прозорої плівки імовірного ґрунту від основи ДВП. На роботі є виражена горизонтальна лінія по горизонталі приблизно на відстані 4-5 см від верхнього краю картини. імовірно картина була притиснута чи приклеєна до дерев'яного бруска згори.

3.1.2. Обладнання та налаштування фотограмметрії

Обладнання:

- Фотокамера Canon EOS M50
- об'єктив Canon EF-M 15-45 mm F/3.5-6.3 IS STM
- поляризаційні фільтри на об'єктив та лампу
- Тринога з колесами
- Лампа кільцевого світла
- Карта білого кольору
- Мольберт
- Ширма сірого кольору

Налаштування для камери:

- Діафрагмове число f/8
- Час витримки $\frac{1}{2}$ с
- ISO - 200
- Експо корекція відсутня
- Фокусна відстань 45 мм
- Вимір експозиції точковий
- Спалах відсутній

Розмір кадру 5334x4000 пікселів

Дата зйомки 14 листопада 2024 року

Вигляд знімального стенда “рисунок 2”

Для порівняння схема знімального обладнання в дослідженні Данте Абате
“рисунок 3”

Знімальний станок Делфтського університету “рисунок 4”

3.1.3. Виконання робіт з фотограмметрії твору живопису

З описаного обладнання, для даного дослідження, було відзнято 130 фотографій формату RAW живопису на відстані приблизно 1.5 метри, без переміщення джерела світла. Та близько 5-6 фотографій для калібрування фокуса і налаштування балансу білого.

Для налаштування єдиного балансу білого та конвертації фотографій в формат PNG використовувалась програма для обробки фотографій **Adobe Lightroom**.

Отримані фотографії було завантажено в програму **Reality Capture** версії 1.5.1. В налаштуваннях програм було виконано звичайну процедуру отримання фотоскану без додаткових налаштувань. В результаті було отримано Point Cloud живопису та частини мольберта на якому його було розміщено, використавши інструмент програми, **Reconstruction Scale**, було виділено область лише з живописом, та конвертував її в об'єкт типу **3D Mesh**. До експорту об'єкта було створено в програмі ортографічне фото зі скану живопису, щільністю 1 піксель/0,05мм До прикладу в Абате була використана значно менша щільність всього 0,2мм, що в 3,3 раза менше. Після виконання цих дій було експортовано з програми наступні файли:

1. ортографічне фото розміром 10771x13530 пікселів
2. Тривимірний об'єкт типу 3D Mesh формату FBX
3. Карту кольору об'єкта Albedo Texture Map 16384x16384 пікселі

Зображення 3-д об'єкта отриманого в процесі фотограмметрії, перегляд через редактор Marmoset Toolbag з налаштованим **Shader**. **Shader** відповідає за оптичні властивості матеріалу, в даному кадрі має середній загальний тип розсіювання відображення (Gloss), та використовує Texture Map кольору (Albedo Map). Сцена освітлення використовує два джерела освітлення віртуальне точкове світло зліва та віртуальне світло неба, що отримано з HDRI фотографії

неба. На зображенні добре видно рельєф утворений деформаціями та кракелюром на картині “рисунок 7”

3.2. Обробка результатів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Створення карти пошкоджень та демонстраційної 3-д моделі об'єкта

Окрім отриманої інформації з програми для фотограмметрії Reality Capture, було прийнято рішення отримати ще два зображення об'єкта близьких до ортографії. Але на зображенні буде не колір а інформація про рельєф об'єкта у вигляді Normal Map та Height Map. Для цього було створено в програмі, для редакування тривимірних об'єктів Autodesk Maya 2023, низькополігональну копію картини і “запик» для неї карту нормалей **Normal Map**. “рисунок 5”

Карти нормалей імітують фізичні властивості поверхні в 3-д об'єкта високої щільності **High Poly Mesh** для об'єкта **Low Poly Mesh** з низькою кількістю полігонів (площин), вони дозволяють інструкції **Shader** вказувати кожному пікселю під яким кутом він має відображати світло.

Карта висот **Height Map** “рисунок 6” подібна до **Normal Map**, але має всього один чорно білий канал і показує висоту рельєфу без кута нахилу відносно площини об'єкта.

На карті висот гарно видно здуття поверхні картини. Так виглядатиме об'єкт у віртуальній сцені якщо накласти карту висот замість кольору картини. Біла зона на зображенні показує ті ділянки які знаходяться ближче до камери, чорні ті що віддалені, тобто білі ділянки можуть бути імовірно опуклими.

Для більшої наочності було використано це зображення в якості маски та накладено його на текстуру кольору. Позначивши напівпрозорим червоним кольором низини та западини “рисунок 7”, ті ділянки зображення що опинилися віддаленими більш від камери.

3.3. Аналіз та інтерпретація даних фотограмметричного експерименту

Зібравши ці дані, було отримано два варіанти роботи з даними:

1. Дослідження ортографічного зображення високої роздільної здатності
2. Аналіз зображення картини через маску висот

В першому варіанті було виявлено, що на зображенні є зони де під основним шаром фарби є шар білила, яке могло бути як спрощеною варіацією мертвого шару, так і слідами реставрація. Це зони жовтого відтінку, переважно на лобній поверхні обличчя, тобто було використано лесування по світлому шару. Це вказує імовірно на те, що робота не була виконана повністю в техніці алла прима “рисунок 8”

Оглянувши ці зони через отриману маску висот, було помічено що значна частина площі де є лесування, по білильному шару, знаходиться на висотах. Це спостереження підтверджує припущення про імовірність пізнішого втручання “рисунок 8”.

Це особливо помітно в зоні носа та губ “рисунок 9”

Аналіз завдяки даному методу допоміг мені швидше визначити і припустити про зміни які були внесені в роботу пізніше. Як висновок також

можна стверджувати, що робота виконана на погано підготовленій поверхні з майже відсутнім ґрунтом, а можлива імприматура та підмальовок невидимі через поглинання залізовмісних пігментів неґрунтованим МДФ. Такий вид аналізу безумовно має очевидну перевагу. недоліком методу ж є необхідність мати певні компетенції в роботі з комп'ютерною графікою, без яких не було б зроблено припущення про можливе використання Normal та Heightmap, для створення шару маски. Однак доступність цього методу і перспективи розвитку очевидно є позитивними

ВИСНОВКИ

В ході даної роботи було обґрунтовано цінність та актуальність доступних методів фотограмметрії для аналізу стану живопису.

Було досліджено наукову літературу на темі використання фотограмметрії в реставрації та консервації об'єктів образотворчого мистецтва й живопису зокрема. Зібрано необхідний теоретичний матеріал з теми фотограмметрії, та проведено успішне фотосканування станкового живопису.

Проведений аналіз живопису і використанням програмного забезпечення для роботи з комп'ютерною графікою, продемонстрував достатність даного методу, для отримання детального ортографічного зображення живопису та текстурних карт об'єкта. Отримані текстурні карти були успішно використані для візуального відокремлення більш високих частин рельєфу живопису, та реєстрації імовірних пізніших втручань при створенні роботи.

Як висновок, даний метод цілком може бути розширенням чи навіть заміною стандартній процедурі оптико-фотографічного до реставраційного дослідження. Попри доступність, все ж недоліком методу є його наявність певного додаткового обладнання, та володіння програмами для комп'ютерної графіки, на необхідному рівні для виконання наведених у роботі інструкцій

В ході роботи було підготовлено додатки з таблицею типології фотограмметрії, зображеннями досліджуваного живопису, список спеціальних термінів для роботи з комп'ютерною графікою та інструкції з проведення такої роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бранді, Ч. Теорія реставрації / пер. з італ. Д. Кожедуб. Київ: НАКККіМ, 2021. 240 с.
2. Духовна велич: меморії видатних українців. Наукова реставрація до 30-річчя Незалежності України : каталог виставкового проєкту. Київ : Національний науково-дослідний реставраційний центр України, 2021. 288 с : іл.
3. Сланський Б. Техніка живопису та реставрації. передм. та упоряд. І. Дорофієнко. Київ : Мистецтво, 2009. 304 с. : іл.
4. Тимченко Т. Р. Методи захисту основ станкового живопису (історія та сучасні технології). Київ : Задруга, 2015. 98 с. : іл.
5. Тимченко Т. Р. Експертиза творів образотворчого мистецтва: живопис (історія та методологія): навч. посіб. – К. : НАКККіМ, 2017. 120 с., іл. ISBN 978-966-452-273-8
6. Титов М. Визначення та опис стану збереженості творів станкового живопису / М. Титов. Луганськ : Світлиця, 2007. 36 с. : іл.
7. Титов М. Техніка і технологія темперного жовткового іконопису. Київ : BONA MENTE, 2005. – 96 с. : іл.
8. З історії розвитку реставраційної справи в Україні // Бібл. вісн.. 2001. № 5. С. 40-49.
9. Андріанова О. Б., Біскулова С. О., Живкова О. В., Тимченко Т. Р., Чуєва К. Є. М Наука. Мистецтво. Студії. Освіта. Технологічні дослідження творів мистецтва з колекції Музею Ханенків. Київ : Видавництво “Фенікс», 2019. 40 с.
10. Abate D. *Built-heritage multi-temporal monitoring through photogrammetry and 2D/3D change detection algorithms* // *Studies in Conservation*. 2018. DOI:10.1080/00393630.2018.1554934.
11. Albertin, F., Ruberto, C., Cucci, C., Callieri, M., Potenziani, M., Siotto, E., Pingi, P., Scopigno, R., Bettuzzi, M., Brancaccio, R., Morigi, M. P., Castelli, L., Taccetti, F., Picollo, M., Stefani, L. & de Vita, F. “Ecce Homo” by Antonello da Messina, from

- non-invasive investigations to data fusion and dissemination // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 15868. DOI:10.1038/s41598-021-95212-2.
12. Antón, M., Moyano, J. J., Nieto-Jiménez, L., Marín-Bustamante, P. Intelligent photogrammetry for heritage documentation: evaluation of close-range photographic systems // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2021. Vol. XLVI-M-1-2021. P. 851–858. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-851-2021.
 13. Döllner, J. Geospatial Artificial Intelligence: Potentials of Machine Learning for 3D Point Clouds and Geospatial Digital Twins // *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. 2020. Vol. 88. Pp. 15-24. DOI: 10.1007/s41064-020-00102-3
 14. Vandivere, A., van Loon, A., Callewaert, T., Haswell, R., Proaño Gaibor, A. N., van Keulen, H., Leonhardt, E., & Dik, J. (2019). *Fading into the background: the dark space surrounding Vermeer's Girl with a Pearl Earring*. *Heritage Science*, 7, 80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0311-9>
 15. Van Vijle, A., Hacıgüzeller, P., & Van der Snickt, G. (2025). *Machine learning for painting conservation: a state-of-the-art review*. *npj Heritage Science*, 13, Article 437. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01924-3>
 16. Elkhuisen, W. S., Callewaert, T. W. J., Leonhardt, E., Vandivere, A., Dik, J., & Song, W. (2019). *Comparison of three 3D scanning techniques for paintings, as applied to Vermeer's Girl with a Pearl Earring*. *Heritage Science*, 7, 90. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0334-0>
 17. Schenk, T. *Introduction to Photogrammetry*. Columbus: The Ohio State University, 2005. 130 p.
 18. Stathopoulou, E.-K., Remondino, F. Benchmarking multi-view stereo (MVS) algorithms for heritage 3D reconstruction // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022. Vol. XLVIII-2/W1-2022. P. 51–58. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-51-2022.

- 19.Hindmarch J., Burioni M., Hess M. (2023) – ISPRS Annals
- 20.Hindmarch, J., Burioni, M., Hess, M. A flexible workflow for multimodal 3D imaging of vaulted painted ceilings in high detail // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023. Vol. X-M-1-2023. P. 133–141. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-M-1-2023-133-2023.
- 21.Rematas, K., Polychroniadis, T., Ritschel, T., Mitra, N. Urban radiance fields // arXiv preprint. 2020. arXiv:2012.06044. URL: <https://arxiv.org/abs/2012.06044>
- 22.Fisher C., Kakoulli I. *Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications* // Stud Conserv. 2006. № 51. C. 3–16.
- 23.Barni M., Bartolini F., Cappellini V. *Image processing for virtual restoration of artworks* // IEEE Multimedia. 2000. T. 7, № 2. C. 34–37.
- 24.Fuentes A. *Contribution of GIS and spatial analysis tools in the characterisation of surface damage to paintings* // In: Rogerio-Candelera M. A., Lazzari M., Cano E., editors. *Science and technology for the conservation of cultural heritage*. 2013. C. 371–378.
- 25.Remondino F., Rizzi A., Barazzetti L., Scaioni M., Fassi F., Brumana R., Pelagotti A. *Review of geometric and radiometric analyses of paintings* // Photogrammetric Record. 2011. T. 26, № 136. C. 439–461.
- 26.Jolliffe I. *Principal component analysis* // In: Lovric M., editor. *International encyclopedia of statistical science*. Berlin: Springer; 2011.
- 27.Canty M. J. *Image analysis, classification and change detection in remote sensing: with algorithms for ENVI/IDL and Python*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2014.
- 28.Nielsen A. A., Conradsen K., Simpson J. J. *Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: new approaches to change detection studies* // Remote Sensing of Environment. 1998. T. 64, № 1. C. 1–19.
- 29.Nielsen A. A., Hecheltjen A., Thonfeld F., Canty M. J. *Automatic change detection in RapidEye data using the combined MAD and kernel MAF methods* / A. A. Nielsen et

- al. // In: Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010). 2010. C. 3078–3081.
30. Coppin P., Lambin E., Jonckheere I., Muys B. *Digital change detection methods in natural ecosystem monitoring: a review* // In: Bruzzone L., Smits P., editors. *Analysis of multi-temporal remote sensing images*. — New York: IEEE; 2002. C. 3–36.
31. Nori W., Sulieman H. M., Niemeyer I. *Detection of land cover changes in El Rawashda Forest, Sudan: a systematic comparison* // In: Proc. of Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2009), vol. 1. 2009. C. I-88-I-91.
32. Zanchetta A., Bitelli G. *A combined change detection procedure to study desertification using opensource tools* // Open Geospatial Data, Software and Standards. 2017. T. 2, № 1. C. 2.
33. Saunders D. *The detection and measurement of colour change in paintings by digital image processing* // In: *Digital Image Processing Applications*, vol. 1075. SPIE; 1989. C. 405-415.
34. Singh A. *Digital change detection techniques using remotely-sensed data* // Int J Remote Sens. 1989. T. 10, № 6. C. 989-1003.
35. Coppin P., Bauer M. *Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery* // Remote Sensing Reviews. 1996. T. 13. C. 207–234.
36. Radke R. J., Andra S., Al-Kofahi O., Roysam B. *Image change detection algorithms: a systematic survey* // IEEE Transactions on Image Processing. 2005. T. 14, № 3. C. 294-307.
37. Cowley D. C. *Remote sensing for archaeological heritage management*. EAC Occasional Paper, No. 5, Budapest. 2011.
38. Barlundhaug S., Holm-Olsen I. M., Tømmervik H. *Monitoring archaeological sites in a changing landscape – using multitemporal satellite remote sensing as an ‘early warning’ method for detecting regrowth processes* // Archaeol Prospect. 2007. T. 14, № 4. C. 231–244.

39. Di Giacomo G., Scardozzi G. *Multitemporal high-resolution satellite images for the study and monitoring of an ancient mesopotamian city and its surrounding landscape: the case of Ur* // International Journal of Geophysics. 2012. Article ID 716296.
40. Lasaponara R., Leucci G., Masini N., Persico R. *Investigating archaeological looting using satellite images and GEORADAR: the experience in Lambayeque in North Peru* // Journal of Archaeological Science. 2013. T. 42. C. 216–230.
41. Cigna F., Tapete D., Lasaponara R., Masini N. *Amplitude change detection with ENVISAT ASAR to image the cultural landscape of the Nasca Region, Peru* // Satellites, Radar and Archaeology Cultural Heritage. 2013. T. 20, № 2. C. 117-131.
42. Agapiou A., Lysandrou V., Alexakis D. D., Themistocleous K., Cuca B., Argyriou A., Sarris A., Hadjimitsis D. G. *Cultural heritage management and monitoring using remote sensing data and GIS: the case study of Paphos area, Cyprus* // Computers, Environment and Urban Systems. 2015. T. 54. C. 230-239.
43. Tapete D., Cigna F., Donoghue D., Graham P. *Mapping changes and damages in areas of conflict: from archive C-band SAR data to new HR X-band imagery, towards the sentinels* / D. Tapete et al. // In: Proceedings of conference: FRINGE 2015: advances in the science and applications of SAR interferometry and Sentinel-1 InSAR workshop. 2015. C. 1-4.
44. Risbøl O., Briese C., Doneus M., Nesbakken A. *Monitoring cultural heritage by comparing DEMs derived from historical aerial photographs and airborne laser scanning* // Journal of Cultural Heritage. 2015. T. 16, № 2. C. 202-209.
45. Cerra D., Plank S., Lysandrou V., Tian J. *Cultural heritage sites in danger—towards automatic damage detection from space* // Remote Sensing. 2016. № 8:781.
46. Girardeau-Montaut D., Roux M., Marc R., Thibault G. *Change detection on point cloud data acquired with a ground laser scanner* // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2005. Ч. 36 (Part 3). C. 30–35.
47. Cignoni P., Rocchini C. *Metro: measuring error on simplified surfaces* // Computer Graphics Forum. 1998. T. 17, № 2. C. 167-174.

48. Monserrat O., Crosetto M. *Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching* // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2008. T. 63, № 1. C. 142-154.
49. Olsen M. J., Johnstone E., Driscoll N., Ashford S. A., Kuester F. *Terrestrial laser scanning of extended cliff sections in dynamic environments: parameter analysis* // Journal of Surveying Engineering. 2009. T. 135, 4. № C. 161-169.
- Lague D., Brodu N., Leroux J. *Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z)* // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2013. T. 82. C. 10-26.
50. Bruno F., Gallo A., De Filippo F., Muzzupappa M., Davidde Petriaggi B., Caputo P. *3D documentation and monitoring of the experimental cleaning operations in the underwater archaeological site of Baia (Italy)* / F. Bruno et al. // In: Proceedings of DigitalHeritage 2013 International Congress. 2013. C. 105-112.
51. Peteler F., Gattet E., Bromblet P., Guillon O., Vallet J. M., De Luca L. *Analyzing the evolution of deterioration patterns: a first step of an image-based approach for comparing multitemporal data sets* // In: Proceedings of DigitalHeritage 2015. 2015. C. 113-116.
52. Chiabrando F., Sammartano G., Spanò A., Semeraro G. *Multi-temporal images and 3D dense models for archaeological site monitoring in Hierapolis of Phrygia (TR)* // Archeologia e Calcolatori. 2017. T. 28, № 2. C. 469–484.
53. Rodríguez-González P., Muñoz-Nieto A. L., DelPozo S., Sanchez-Aparicio L. J., Gonzalez-Aguilera D., Micoli L., Gonizzi-Barsanti S., Guidi G., Mills J., Fieber K., Haynes I., Hejmanowska B. *4D reconstruction and visualization of cultural heritage: analyzing our legacy through time* // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2017. Vol. 42. C. 609–616.
54. Bitelli G., Girelli V. A., Sammarini G. *4-dimensional recording and visualization of urban archaeological excavations* // Applied Geomatics. 2018. T. 10. C. 415-426.
55. Bolognesi M., Furini A., Russo V., Pellegrinelli A., Russo P. *Testing the low-cost RPAS potential in 3D Cultural heritage reconstruction* // In: The International

- Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-5/W4, 2015, 3D virtual reconstruction and visualization of complex architectures. 2018. C. 229-235.
- 56.D'Amelio S., Lo Brutto M. *Close range photogrammetry for measurement of painting surface deformations* // Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci. 2009. Vol. 38(5):1-6.
- 57.Fontana R., Gambino M. C., Greco M., Marras L., Materazzi M., Pampaloni E., Pelagotti A., Pezzati L., Poggi P. *2D imaging and 3D sensing data acquisition and mutual registration for painting conservation* // Proc. SPIE Videometrics VIII. 2005. C. 51-58.
- 58.Blais J., Taylor F., Cournoyer L., Picard M., Borgeat Godin L., Beraldin J-A, Rioux M., Lahanier C. *Ultra-high-resolution 3D laser colour imaging of paintings: the Mona Lisa by Leonardo da Vinci* // Proc. 7th International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks. 2007. C. 435-440.
- 59.Lahanier C., Aitken G., Pillay R., Beraldin J-A, Blais F., Borgeat L., Cournoyer L., Picard M., Rioux M., Taylor J., Breuckmann B., Colantoni P., de Deyne C. *Two-dimensional multi-spectral digitisation and three-dimensional modelling of easel paintings*. Report, NRC Publication Archive. 2008.
- 60.Granero-Montagud L., Portalés C., Pastor-Carbonell B., Ribes-Gómez E., Gutiérrez-Lucas A., Tornari V., Papadakis V., Groves R. M., Sirmacek B., Bonazza A., Ozga I., Vermeiren J., van der Zanden K., Föster M., Aswendt P., Borreman A, Ward J. D., Cardoso A, Aguiar L, Alves F, Ropret P, María Luzón-Nogué J, Dietz C. *Deterioration estimation of paintings by means of combined 3D hyperspectral data analysis* // In: Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, vol. 8790. 2013.
- 61.Akca D., Gruen A., Breuckmann B., Lahanier C. *High definition 3D-scanning of art objects and painting* // In: Proc. Optical 3D Measurement Techniques Conference, vol. 2. 2007. C. 50-58.

62. Blais F., Cournoyer L., Beraldin J-A, Picard M. *3D imaging from theory to practice: the Mona Lisa story* // Proc. SPIE 7060, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX, 70600L. 2008.
63. Breuckmann B. *3-dimensional digital fingerprint of paintings* // In: Proc. 19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2011). 2011. C. 1249-1253.
64. Abate D., Menna F., Remondino F., Gattari M. G. *3D painting documentation: evaluation of conservation conditions with 3D imaging and ranging techniques* // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-5. C. 1-8.
65. Robson R., Bucklow S., Woodhouse N., Papadaki H. *Periodic photogrammetric monitoring and surface reconstruction of a historical wood panel painting for restoration purposes* // Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci. 2004. № 35(B5). C. 395-400.
66. Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., Lo Brutto M., Rizzi A., Brumana R. *Geometric and radiometric analysis of paintings* // In: Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci. 2010. Vol. 38(5): 62-67.
67. Wells J. M., Jones T. W., Danehy P. *Polarisation and colour filtering applied to enhance photogrammetric measurements of reflective surfaces* // In: 46th AIAA/ASME/ASCE/ASC structures, structural dynamics & materials conference, 18-21 April 2005, Austin, Texas. 2005. C. 1887-1896.
68. Menna F., Rizzi A., Nocerino E., Remondino F., Gruen A. *High resolution 3D modelling of the Behaim globe* // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B5, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August-01 September 2012, Melbourne, Australia. C. 115-120.
69. Abate D., Hermon S., Lotti S., Innocenti G. *3D scientific visualisation of 19th century glass replicas of invertebrates* // 2017 IEEE 13th International Conference on e-Science (e-Science). 2017. C. 533-541.
70. Nicolae C., Nocerino E., Menna F., Remondino F. *Photogrammetry applied to problematic artefacts* // Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Information

Science, Volume II-5, 2014, Riva del Garda, Italy, June 23-25, 2014, ISPRS technical symposium. C. 451-456.

71. Conen N., Hastedt H., Kahmen O., Luhmann T. *Improving image matching by reducing surface reflections using polarising filter techniques* // In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2, 2018, ISPRS TC II mid-term symposium «towards photogrammetry 2020», 4-7 June 2018, Riva del Garda, Italy. C. 267-274.
72. Nocerino E., Menna F., Remondino F. *Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modelling projects* // Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci. 2014. Vol. XL-5. C. 465-472.
73. Remondino F., Spera M. G., Nocerino E., Menna F., Nex F. *State of the art in high density image matching* // Photogrammetric Record. 2014. Vol. 29, № 146. C. 144-166.