

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Навчально-науковий інститут інноватики,
природокористування та інфраструктури
Кафедра економічної експертизи та землевпорядкування

ФІЛИК Максим Ігорович

**Побудова 3D об'єкта за його знімками за допомогою сучасних
фотограмметричних технологій / Building a 3D object by its images
using modern photogrammetric technologies**

спеціальність: 193 – Геодезія та землеустрій
освітньо-професійна програма – Експертна оцінка землі та нерухомого майна

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи ГЕОЗ-42
М. І. Філик

Науковий керівник:
к.т.н., Ю. О. Лук'янченко

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

" ____ " _____ 20__ р.

Завідувач кафедри

_____ **Б. О. Язлюк**

ТЕРНОПІЛЬ – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ФОТОГРАММЕТРІЮ ТА 3D-МОДЕЛЮВАННЯ	6
1.1 Сутність та розвиток фотограмметричних технологій	6
1.2 Принципи отримання 3D-моделей та галузі їх використання	12
Висновки до розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ 3D-МОДЕЛЕЙ	17
2.1 Геометричні основи фотограмметрії	17
2.2 Алгоритмічні основи 3D-моделювання	21
Висновки до розділу 2	29
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ	30
3.1 Суть дослідження та покроковий процес моделювання	30
3.2 Аналіз та оцінка 3D-моделей	45
Висновки до розділу 3	49
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Актуальність теми дослідження зумовлена стрімким розвитком цифрових технологій та зростаючою потребою у створенні точних тривимірних цифрових копій реальних об'єктів для потреб архітектури, інженерії, геодезії, та систем віртуальної реальності. У сучасних реаліях автоматизації усіх можливих процесів, традиційні методи вимірів та моделювання поступаються сучасним фотограмметричним технологіям, завдяки яким можна отримувати високоточні просторові дані на основі зображень. Застосування алгоритмів комп'ютерного зору та автоматизованої обробки знімків значно скорочує терміни виконання робіт і знижує їхню собівартість. Водночас постає проблема забезпечення метричної точності та візуальної достовірності моделей, що підкреслює необхідність глибокого аналізу геометричних засад фотограмметрії та оптимізації процесів тривимірної реконструкції.

Особливості побудови тривимірних моделей за знімками визначаються складними математичними алгоритмами обчислення просторових координат і проєктивних перетворень. На відміну від класичного ручного моделювання, сучасні фотограмметричні програми базуються на автоматичному пошуку відповідних точок та аналізі взаємного орієнтування знімків. Інтеграція сучасних алгоритмів обробки зображень у практичну інженерну та дослідницьку діяльність виступає ключовим інструментом для отримання якісних просторових даних, що робить детальне дослідження цієї теми вкрай своєчасним.

Метою роботи є теоретичне та практичне дослідження методів побудови тривимірних об'єктів за їхніми цифровими знімками з використанням сучасних фотограмметричних технологій, а також виявлення ключових закономірностей впливу параметрів даних на геометричну точність і якість фінальної реконструкції.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання**:

- дослідити історичний розвиток та теоретичні основи фотограмметрії як фундаментальної геометричної дисципліни;
- виділити та систематизувати основні принципи створення тривимірних моделей на основі знімків;
- здійснити детальний аналіз сучасних алгоритмів для 3D-моделювання;
- дослідити залежність якості вихідного матеріалу (роздільної здатності, перекриття, експозиції та геометрії зйомки) на кінцевий результат моделювання;
- провести практичне тестування програмного забезпечення для фотограмметричної обробки та оцінити його ефективність;
- розробити практичні рекомендації щодо оптимізації знімального процесу та камеральної обробки даних для підвищення точності 3D-реконструкцій.

Об'єктом дослідження є процес 3D-реконструкції та геометричного моделювання реальних об'єктів за знімками.

Предметом дослідження виступають теоретичні засади, математичні алгоритми комп'ютерного зору, програмні засоби фотограмметрії.

Методи дослідження базуються на поєднанні загальнонаукових і спеціальних підходів:

- аналізу та синтезу – для вивчення еволюції фотограмметричних методів та аналізу наукової літератури;
- геометричного та математичного моделювання – при дослідженні законів центрального проектування та епіполярної геометрії;
- експериментального методу та комп'ютерного тестування – для дослідження роботи алгоритмів у сучасному програмному середовищі;
- порівняльного та статистичного аналізу – для оцінки метричної точності отриманих моделей та виявлення залежностей між якістю знімків і фінальним результатом.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у системному аналізі та комплексному підході до процесу 3D-реконструкції як єдиної структури, що об'єднує геометричні параметри зйомки, специфіку алгоритмів комп'ютерного зору та якісні характеристики сенсорів. Завдяки цьому, було удосконалено методичні підходи до оцінки залежності точності щільних хмар точок від параметрів освітлення та перекриття кадрів. Такий підхід дозволяє прогнозувати якість майбутньої моделі ще на етапі планування польових або знімальних робіт.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх безпосереднього використання фахівцями при виконанні оцифрування об'єктів архітектури, інженерних споруд та елементів культурної спадщини. Сформовані рекомендації оптимізують параметри обробки у сучасному фотограмметричному програмному забезпеченні, що дозволяє зменшити кількість артефактів та підвищити загальну метричну точність моделей при мінімальних часових витратах на обчислення.

Структура роботи логічно побудована відповідно до поставленої мети та завдань і включає вступ, три розділи, висновки та список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ФОТОГРАММЕТРІЮ ТА 3D-МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Сутність та розвиток фотограмметричних технологій

Така галузь науки як фотограмметрія є науково-технічною дисципліною, яка посідає одне з основних місць серед методів отримання інформації про об'єкти та явища навколишнього середовища. Її значення особливо зросло через стрімкий розвиток цифрових технологій, комп'ютерного зору та геоінформаційних систем. Сучасна фотограмметрія поєднує у собі елементи геодезії, математики, інформатики та обробки зображень, забезпечуючи можливість точного визначення геометричних характеристик об'єктів без безпосереднього контакту з ними.

Етимологічно термін «фотограмметрія» походить від трьох грецьких слів, що означають «світло», «писати» та «вимірювати», що у сукупності відображає її основну ідею — виконання вимірювань за допомогою фотографій. У класичному розумінні фотограмметрія визначається як наука, мистецтво і техніка отримання достовірної інформації про фізичні об'єкти та навколишнє середовище шляхом реєстрації, вимірювання та інтерпретації фотографічних зображень. Таке визначення підкреслює багатогранність цієї дисципліни, яка охоплює як технічні, так і аналітичні аспекти роботи із зображеннями. Водночас сучасні підходи до трактування фотограмметрії значно розширюють її зміст, акцентуючи увагу на цифрових технологіях і автоматизованих методах обробки даних.

На сучасному етапі розвитку фотограмметрію часто розглядають як процес реконструкції тривимірних моделей об'єктів на основі двовимірних зображень. Такий підхід відображає її сутність як методу перетворення візуальної інформації у метрично точні просторові дані. Фактично фотограмметрія виступає своєрідним зворотнім процесом фотографії: якщо фотографія переводить тривимірний світ у площину зображення, то фотограмметрія, навпаки, дозволяє відновити просторові характеристики

об'єкта за серією знімків. Це досягається шляхом аналізу геометричних зв'язків між різними зображеннями одного й того ж об'єкта, отриманими з різних точок зору.

Сутність фотограмметрії полягає у використанні фотографічних зображень як джерела вимірювальної інформації. На відміну від традиційних методів геодезичних вимірювань, де застосовуються безпосередні контакти з об'єктом або спеціалізовані вимірювальні прилади, фотограмметрія дозволяє виконувати вимірювання дистанційно. Це особливо важливо у випадках, коли об'єкт є важкодоступним, небезпечним або має великі розміри. Основою фотограмметричного методу є принцип центральної проєкції, відповідно до якого кожна точка об'єкта проєктується на площину зображення через оптичний центр камери. Використовуючи кілька таких зображень, можна відновити просторове положення точок об'єкта шляхом математичних обчислень.

Основою сутності фотограмметрії є використання математичних моделей і алгоритмів обробки зображень. Серед всіх етапів які передують отриманню просторової інформації значну роль відіграє виявлення суміжних точок на фотографіях, їх зіставлення між знімками та обчислення точок та координат у просторі. Новітні програми автоматизовують ці процеси, що дозволяє зменшити вплив оператора на результат. Через це поріг входження став нижчим, що дозволило розширити коло користувачів.

Розвиток фотограмметрії тісно пов'язаний із розвитком фотографії та технічних засобів зйомки. Вона виникла у середині XIX століття і з того часу пройшла кілька етапів еволюції: від простих методів побудови карт за фотографіями до складних цифрових технологій створення тривимірних моделей. На сучасному етапі фотограмметрія активно використовує можливості цифрових камер, безпілотних літальних апаратів та високопродуктивних обчислювальних систем. Це дозволяє значно підвищити точність і швидкість обробки даних, а також розширити сфери її застосування.

Особливістю фотограмметрії є її універсальність і широкий спектр застосувань. Вона використовується у геодезії та картографії для створення топографічних карт і планів, у будівництві — для контролю геометрії об'єктів, у археології — для документування культурної спадщини, а також у медицині, криміналістиці та багатьох інших галузях. Залежно від умов зйомки та відстані до об'єкта розрізняють наземну, аерофотограмметрію та космічну фотограмметрію, кожна з яких має свої особливості та переваги.

Отже фотограмметрія зарекомендувала себе як складна міждисциплінарна галузь, що гарантує ефективність під час збору та аналізу просторових даних. Її сутність полягає у перетворенні зображень у точні геометричні дані за допомогою математичних і алгоритмічних методів. [29]

Історія розвитку фотограмметричних технологій є складним і багатогранним процесом, що відображає еволюцію наукових підходів до вимірювання та відтворення просторових характеристик об'єктів на основі їх зображень. Фотограмметрія як наукова дисципліна сформувалася на перетині геодезії, оптики, математики та фотографії, і її становлення нерозривно пов'язане з розвитком технічних засобів фіксації та обробки зображень. Від перших експериментів із використанням камери-обскури до сучасних цифрових технологій тривимірного моделювання фотограмметрія пройшла кілька ключових етапів, кожен із яких характеризується впровадженням нових методів і приладів.

Передумови виникнення фотограмметрії формувалися ще задовго до появи фотографії як такої. Значний внесок у розвиток оптичних принципів зробили дослідження камери-обскури, що дозволяла отримувати проєкції зображень на площині. Ці ідеї, розвинені в працях учених епохи Відродження, створили основу для подальшого розуміння геометрії зображень. Однак справжній початок фотограмметрії як науки пов'язаний із появою фотографії у першій половині XIX століття, що відкрило можливість точної фіксації об'єктів реального світу.

Засновником фотограмметрії вважається французький учений Еме Лосседа, який у 1850-х роках вперше застосував фотографічні знімки для створення топографічних планів. Його методи базувалися на геометричному аналізі перспективних зображень і дозволяли визначати координати точок об'єкта за фотознімками. Цей підхід отримав назву фототопографії та став основою для подальшого розвитку фотограмметрії. Важливим етапом стало також введення терміна «фотограмметрія» німецьким архітектором Альбрехтом Майденбауером у 1867 році, що закріпило науковий статус цієї галузі. [9]

У другій половині XIX — на початку XX століття фотограмметрія розвивалася переважно як наземна технологія. Використовувалися спеціальні фототеодоліти, які поєднували функції фотографічного апарата і геодезичного інструмента. У цей період активно формувалися теоретичні основи методу, зокрема принципи центрального проєктування, орієнтування знімків та побудови стереоскопічних моделей. Застосування стереоскопії дозволило перейти від плоских зображень до об'ємного сприйняття, що значно підвищило точність вимірювань.

Подальший розвиток фотограмметрії був тісно пов'язаний із появою авіації. Перша світова війна стала каталізатором впровадження аерофотозйомки, яка відкрила нові можливості для картографування великих територій. У міжвоєнний період відбувалося активне вдосконалення аналогових фотограмметричних приладів, таких як стереоплоттери, що дозволяло створювати топографічні карти з високою точністю. Цей етап отримав назву аналогової фотограмметрії, оскільки всі процеси обробки зображень здійснювалися за допомогою механічних і оптичних пристроїв.

У другій половині XX століття розпочався перехід до аналітичної фотограмметрії, що був зумовлений розвитком обчислювальної техніки. Використання комп'ютерів дозволило автоматизувати процеси обчислення координат точок і значно підвищити точність результатів. Аналітичні методи базувалися на математичних моделях проєкцій і використовували числові

алгоритми для обробки даних. У цей період були розроблені фундаментальні рівняння фотограмметрії, зокрема колінеарні рівняння, які описують взаємозв'язок між координатами точки об'єкта, зображення та параметрами камери.

Кінець XX — початок XXI століття ознаменувався переходом до цифрової фотограмметрії, що стало можливим завдяки розвитку цифрових камер, комп'ютерної графіки та алгоритмів обробки зображень. Цифрова фотограмметрія дозволила повністю автоматизувати процеси обробки даних, включаючи орієнтування знімків, побудову цифрових моделей рельєфу та створення тривимірних моделей об'єктів. Особливого значення набули методи комп'ютерного зору, такі як Structure from Motion і Multi-View Stereo, які забезпечують відновлення геометрії сцени на основі великої кількості зображень. [10]

Сучасний етап розвитку фотограмметричних технологій характеризується інтеграцією з іншими геоінформаційними та дистанційними методами. Використання безпілотних літальних апаратів значно розширило можливості збору даних, забезпечивши високу деталізацію зображень при відносно низьких витратах. Крім того, застосування штучного інтелекту та машинного навчання дозволяє автоматично розпізнавати об'єкти, класифікувати їх та підвищувати якість реконструкцій. Фотограмметрія сьогодні широко використовується в різних галузях, включаючи геодезію, архітектуру, археологію, медицину та індустрію розваг. [8]

Через розвиток технологій та розширення сфер впливу фотограмметрії з'явилася потреба в розділенні та розвитку дисципліни. Це спричинило появу різних видів фотограмметрії, основними з яких є:

Наземна фотограмметрія отримує зображення безпосередньо з землі, за допомогою камери що стоїть на штативі або перебуває в руках оператора. Цей метод є найдавнішим та широко використовується для детального дослідження навколишнього середовища. Принцип роботи базується на багаторазовому зніманні об'єкта з різних ракурсів та пошуку спільних точок

на зображеннях і побудовою тривимірної моделі за допомогою просторової триангуляції. Цей вид фотограмметрії також має свої напрями які залежать від масштабу досліджуваного об'єкта. Найпоширенішим напрямком є близькодистанційна фотограмметрія її використовують на відстані до 200 метрів. Основне використання наземного виду фотограмметрії це архітектура, реставрація пам'яток, археологія та інженерні вимірювання. Завдяки високій точності її використовують для створення 3D-моделей невеликих об'єктів. [16]

Аерофотограмметрія ґрунтується на отриманні зображень із повітря за допомогою літаків або безпілотних літальних апаратів. Вона виникла з розвитком авіації та значно розширила можливості картографування великих територій. [24] Принцип її роботи полягає у систематичній зйомці місцевості з перекриттям знімків, що дозволяє здійснювати їх подальшу геометричну обробку та створювати ортофотоплани і цифрові моделі рельєфу. Важливою умовою є забезпечення достатнього поздовжнього та поперечного перекриття знімків, що дає змогу визначати координати точок із високою точністю. [18] Аерофотограмметрія широко використовується в топографічному картографуванні, містобудуванні, моніторингу сільськогосподарських угідь, геологічних дослідженнях і будівництві. Порівняно з наземною фотограмметрією вона охоплює значно більші площі, проте має дещо нижчу просторову роздільну здатність. [23]

Космічна фотограмметрія є найсучаснішим етапом розвитку цієї галузі та базується на використанні супутникових знімків. Саме вона допомагає отримати інформацію про великі території Землі з високою частотою, що є особливо важливим для глобального моніторингу природних і антропогенних процесів. Принцип її роботи подібний до аерофотограмметрії, однак знімки виконуються з орбіти Землі, що дозволяє охоплювати континенти та навіть всю планету. [27] Супутникові системи забезпечують багатоспектральну зйомку, що розширює можливості аналізу, зокрема для вивчення рослинності, кліматичних змін, водних ресурсів та екологічного стану територій. Космічна

фотограмметрія використовується у географії, метеорології, океанографії, управлінні природними ресурсами та системах глобального позиціонування. [5],[20]

1.2 Принципи отримання 3D-моделей та галузі їх використання

Технології 3D-моделювання на основі зображень пройшли значний шлях еволюції: від ручних методів фотограмметрії до сучасних алгоритмів комп'ютерного зору, що автоматизують процес відтворення об'єктів реального світу у цифровий простір. У контексті сучасного 3D-моделювання фотограмметрія являється фундаментом, що дозволяє перенести набір двовимірних пікселів у тривимірну векторну структуру.

При створенні 3D-моделі на основі знімків основну роль відіграє принцип тріангуляції. За допомогою системи, що аналізує набір зображень одного і того ж об'єкта знятого з різних ракурсів та математичних процесів, що обчислюють положення камери в просторі, визначаються координати точок які збігаються на різних фотографіях.

Для того щоб перетворити набір зображень у 3D-модель потрібно пройти декілька послідовних етапів. Серед яких можна виділити:

1) Попереднє опрацювання та пошук ознак (Feature Detection)

На цьому етапі програмне забезпечення аналізує кожне зображення у пошуку унікальних геометричних ознак (кутків, країв, текстурних плям), та поєднує такі ознаки між зображеннями. [26]

2) Реконструкція розрідженої хмари точок (Sparse Point Cloud)

Використовуючи метод тріангуляції, система обчислює просторові координати (X, Y, Z) для кожної зіставленої точки. Результатом є розріджена хмара точок, що відображає основну геометрію об'єкта. [11]

3) Генерація щільної хмари точок (Dense Point Cloud)

Через те, що розріджена хмара не дає повної інформації про поверхню, застосовується алгоритм Multi-View Stereo (MVS). Він аналізує пікселі між вже відомими точками, будуючи карти глибини (depth maps) для кожного

зображення. Це дозволяє ущільнити хмару до мільйонів точок, формуючи детальний рельєф поверхні об'єкта.

4) Побудова сітки (Meshing)

На цьому етапі дискретні точки з'єднуються між собою полігонами (зазвичай трикутниками), утворюючи суцільну поверхню.

5) Текстурування

Під час цього етапу текстуру з початкових зображень переносять на згенеровану раніше полігональну сітку. Що допомагає досягти реалізму та точності в кольоровій гамі.

Створення 3D-моделі на основі зображень поєднує в собі комп'ютерні технології, геометрію, оптику та обчислення. Саме тісна співпраця багатьох напрямків та сталий розвиток технологій перетворила фотограмметрію в доступний для кожного інструмент який впливає не тільки на картографію але й на інші напрямки які залежать від точності та якості матеріалу для аналізу. [17]

Технології створення тривимірних моделей за зображеннями, засновані на фотограмметрії, за останні десятиліття перетворилися на один із найефективніших інструментів цифрового аналізу реального світу. Цей підхід поєднує точність геодезичних методів і гнучкість комп'ютерного бачення, дозволяючи реконструювати об'єкти будь-якої складності з фотографій. Побудова 3D-моделі зображення включає повний цикл — від зйомки до створення текстурованого полігонального об'єкта, придатного для наукового аналізу, візуалізації та інтеграції у цифрові бази даних.

Сьогодні такі моделі використовуються у величезному спектрі галузей, оскільки метод фотограмметричної реконструкції поєднує високу точність, портативність та низьку вартість. Однією з основних сфер застосування є архітектура та культурна спадщина, де фотограмметрія дозволяє точно оцифровувати архітектурні споруди, пам'ятки, скульптури й археологічні знахідки. Використання цифрових моделей забезпечує документування

об'єктів у разі руйнування, полегшує процес реставрації й створює основу для віртуальних музеїв. [4]

Не менш важливе місце 3D-моделі займають у геодезії, картографії та плануванні територій. Завдяки використанню безконтактних знімальних систем (активних і пасивних сенсорів) створюються цифрові моделі рельєфу, ортофотоплани та тривимірні геопросторові бази даних. Ці моделі застосовуються для моніторингу ландшафтних змін, оцінки наслідків природних катастроф, аналізу ерозії ґрунтів, планування інфраструктури. Використання знімків із БПЛА дозволяє отримувати дані з сантиметровою точністю при мінімальних витратах, що зробило технологію незамінною у топографічному картуванні.

У промисловості та машинобудуванні фотограмметрія використовується для контролю геометрії виробів, зворотного інжинірингу й вимірювання складних деталей. За допомогою серій зображень створюються тривимірні моделі, що дозволяють оцінити відхилення від проєктних параметрів, контролювати деформації й визначати об'ємні характеристики матеріалів. На відміну від контактних вимірювальних систем, фотограмметричні рішення не вимагають фізичного дотику до об'єкта, що особливо важливо для делікатних або рухомих деталей. Приклади застосувань охоплюють як великі об'єкти (фюзеляжі літаків, корпуси кораблів), так і дрібні компоненти високоточного обладнання.

Високу ефективність фотограмметрія продемонструвала у судовій експертизі, криміналістиці та безпеці. 3D-моделі, отримані зі знімків місця події, дозволяють реконструювати просторові обставини, відновлювати траєкторії руху, вимірювати відстані з точністю до міліметрів. Використання фотограмметрії у судово-технічному аналізі робить можливим збереження сцени злочину у цифровому форматі для подальших експертиз або судових розглядів. У сфері охорони праці подібні технології застосовуються для аналізу аварій, падінь конструкцій та моделювання ризикових ситуацій без загрози для людей.

У медицині та біології тривимірні моделі з фотографій допомагають відтворювати форму людських органів, кісток або тканин, не вдаючись до інвазійних методів. Такі моделі використовуються для планування операцій, створення протезів, вивчення морфологічних особливостей організмів. У біології — для фіксації анатомії тварин чи аналізу природних структур, наприклад коралів або деревних стовбурів. Висока роздільна здатність цифрових камер і точні алгоритми орієнтації дозволяють отримувати дані, придатні навіть для мікрометричного аналізу.

Окрему роль відіграє кінематограф, комп'ютерні ігри та віртуальна реальність, де фотограмметрія стала інструментом створення реалістичних цифрових сцен. Замість ручного моделювання художники використовують знімки реальних об'єктів, які автоматично перетворюються на текстуровані 3D-моделі. Цей підхід зменшує витрати часу і підвищує фотореалістичність зображення, що особливо важливо для сучасних VR/AR-платформ. Завдяки високій швидкодії графічних процесорів такі моделі можуть відтворюватися у реальному часі, забезпечуючи інтерактивну взаємодію користувача з віртуальним середовищем. [6]

Тривимірні фотограмметричні моделі також використовуються у наукових візуалізаціях, наприклад у кліматології, гідрології та океанографії, де вони допомагають відтворювати просторову динаміку природних явищ. У галузі археології подібні методи дають змогу реконструювати стародавні поселення й аналізувати стратиграфію розкопок.

Створення 3D-моделі на основі знімків вже давно зарекомендували себе в тих сферах де потрібне точне збереження просторової інформації та її аналіз. Такі технології все більше інтегруються в ГІС-системи та освітні програми. Допомагають поширювати цифрові музеї та рятувати життя в медицині. [13]

Висновки до розділу 1

Фотограмметрія пройшла вражаючий шлях трансформації від допоміжної методики вимірювання за світлинами, до фундаментальної високотехнологічної науки. А сучасний розвиток технологій обчислення або дронів демонструє невпинне прагнення до максимальної точності та автоматизації процесів. На сьогодні сфера застосування отриманих тривимірних даних є надзвичайно широкою: від традиційної картографії, геодезії та архітектурного моніторингу до інженерного проєктування. Через сучасні тренди оцифрування фізичного світу, можна з упевненістю сказати що ринок 3D-технологій та фотограмметрії тільки набирає свої оберти. А різноманітні камери спостереження, 3D-моделі міст, датчики в авто що відтворюють оточення в 3D для автопілоту, тільки підтверджують ці тенденції.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ 3D-МОДЕЛЕЙ

2.1 Геометричні основи фотограмметрії

В основі сучасної фотограмметрії, як методу що визначає метричні характеристики об'єктів лежить проєктивна та аналітична геометрія. Їхній зв'язок пояснюється тим, що сам процес створення зображення, це перетворення 3D об'єкта в 2D площину знімка. Тому фотограмметрію можна вважати прикладною геометрією, де кожен піксель на зображенні стає вектором який проходить через центр проєкції камери. Тільки за допомогою перетворення цього процесу в геометричну задачу можна розв'язати протилежну, тобто реконструкцію просторових координат об'єкта за його 2D проєкціями. Фундаментальним принципом, який лежить в основі фотограмметричних вимірювань, є модель центральної проєкції, яка спрощує роботу оптичної системи камери до ідеальної геометричної точки — центра проєкції.

У межах цієї моделі вважається, що всі промені світла, які відбиваються від точок об'єкта в просторі, проходять крізь єдину точку (центр проєкції) і фіксуються на площині зображення, що розташована на фіксованій фокусній відстані. Геометрична сутність центральної проєкції полягає у дотриманні умови колінеарності: точка об'єкта, центр проєкції та відповідна точка на знімку повинні лежати на одній прямій у тривимірному просторі. Математично ця умова описується через рівняння колінеарності, які є базовим апаратом фотограмметрії. Якщо ми маємо точку в об'єктному просторі з координатами (X, Y, Z) та центр проєкції (X_0, Y_0, Z_0) , то координати відповідної точки на знімку (x, y) визначаються наступними аналітичними виразами:

$$x = -f \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{12}(Y-Y_0) + r_{13}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)}$$

$$y = -f \frac{r_{21}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{23}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)}$$

Формула 1 та 2. Рівняння колінеарності

У цих формулах f представляє фокусну відстань (головну відстань камери), а коефіцієнти r_{ij} є елементами матриці повороту R , яка описує кутову орієнтацію камери (кути нахилу α , повороту ω та крену κ) відносно зовнішньої системи координат. Ці рівняння є нелінійними відносно параметрів зовнішнього орієнтування та просторових координат точок, що вимагає застосування ітераційних методів найменших квадратів для їх вирішення. Саме через ці рівняння реалізується зв'язок між внутрішньою геометрією камери та зовнішньою метрикою простору, що дозволяє виконувати просторову фототріангуляцію та побудову моделей за поодинокими знімками з відомими параметрами.[14]

Однак для повноцінної реконструкції глибини та об'єму одного знімка недостатньо, тому фотограмметрія переходить до аналізу стереопар, де ключову роль відіграє епіполярна геометрія. Епіполярна геометрія описує внутрішню проєктивну взаємодію між двома зображеннями однієї і тієї ж сцени, отриманими з різних точок простору. Принцип дії базується на тому, що для будь-якої точки на першому знімку відповідна їй точка на другому знімку обов'язково повинна лежати на специфічній прямій, яка називається епіполярною лінією. Це обмеження випливає з того, що центри проєкцій обох камер та точка об'єкта утворюють єдину площину — епіполярну площину. Перетин цієї площини з площинами зображень і створює епіполярні лінії. Математично цей взаємозв'язок виражається через фундаментальну матрицю F або суттєву матрицю E , залежно від того, чи відомі параметри внутрішнього калібрування камер. Умова епіполярної відповідності записується як:

$$x'^T E x = 0$$

Формула 3. Епіполярна відповідність

де x та x' — однорідні координати відповідних точок на першому та другому знімках відповідно. Використання епіполярних рівнянь дозволяє радикально спростити алгоритми автоматичного пошуку відповідностей (image matching), оскільки пошук ідентичних точок звужується з двовимірної площини до одновимірної прямої. Це є критично важливим для сучасних методів Structure from Motion (SfM) та Dense Multi-View Stereo, які використовуються в архітектурному обмірі та будівництві для створення високоточних хмар точок.

Застосування вищезазначених геометричних принципів у фотограмметрії не обмежується лише теоретичними розрахунками, воно формує технологічний цикл обробки даних від моменту зйомки до отримання фінального продукту. Наприклад, рівняння колінеарності лежать в основі процедури "зрівнювання зв'язок" (bundle block adjustment), де тисячі променів від різних знімків одночасно оптимізуються для мінімізації похибок репроекції, що дозволяє досягти субпіксельної точності у визначенні положення камери та координат точок об'єкта. Епіполярні ж залежності є фундаментом для створення епіполярних зображень (rectified images), на яких усі епіполярні лінії паралельні осям координат, що є обов'язковою умовою для роботи алгоритмів кореляції та побудови карт глибини. У практичній площині, особливо при реконструкції складних архітектурних об'єктів або промислових споруд, ці геометричні основи дозволяють компенсувати перспективні спотворення та дисторсію об'єктива, перетворюючи центральну проекцію у ортогональну при генерації ортофотопланів.

З усього вищесказаного можемо зробити висновок, що кожна цифрова модель це продукт створений за допомогою математичних перетворень та геометричних методів. Розвиток цих методів у напрямку автоматизації та інтеграції з комп'ютерним зором лише підсилює значення класичної геометрії

як першооснови фотограмметричного процесу, роблячи можливим створення цифрових копій з геодезичною точністю на основі звичайної фотофіксації. Саме розуміння цих принципів дозволить повністю розкрити потенціал та додати гнучкості в роботі з спеціалізованим програмним забезпеченням. [19]

Методи тріангуляції є одними з основних способів визначення просторових координат точок у фотограмметрії, геодезії та комп'ютерному зорі. Для того, щоб визначити положення невідомої точки будують геометричну фігуру, а саме трикутник, вершинами якого виступають точки спостереження та об'єкт вимірювання. В основі цього підходу лежить використання відомої бази (відстані між сенсорами або камерами) та виміряних кутів або напрямків на об'єкт, що дає змогу отримати координати точки у просторі.

У фотограмметрії тріангуляція реалізується через принцип центрального проєктування, згідно з яким об'єктна точка, центр проєкції камери та її зображення лежать на одній прямій. Цей принцип формується у вигляді рівнянь колінеарності, що є основою обчислення координат. Для двох зображень однієї точки просторові координати визначаються як точка перетину променів, що виходять із центрів проєкції камер через відповідні пікселі на зображеннях. Розв'язуючи систему таких рівнянь для двох або більше зображень, отримують просторові координати точки. [1]

У випадку активної тріангуляції, яка широко застосовується в лазерному скануванні, використовується комбінація джерела лазерного випромінювання та камери. Лазерний промінь проєктується на поверхню об'єкта, а камера фіксує положення відбитого сигналу. Знаючи базову відстань між лазером і камерою та кут випромінювання, координати точки визначаються із геометрії трикутника. Такий підхід дозволяє досягати високої точності, часто на рівні міліметрів, особливо при скануванні об'єктів невеликого розміру. [28]

Пасивна тріангуляція, а саме стереофотограмметрія, беруть за основу використання двох або більше зображень без активного підсвічування. Щоб

визначити відповідні точки на зображеннях, використовують сучасні алгоритми пошуку ознак. Саме цей підхід характеризує метод Structure from Motion, який дозволяє автоматично відновлювати як положення камер, так і координати великої кількості точок, формуючи щільні хмари точок. Точність триангуляції залежить від ряду факторів, зокрема геометрії зйомки, співвідношення бази відстані до об'єкта, точності визначення кутів і параметрів камер. Збільшення бази між точками спостереження підвищує точність визначення координат, однак ускладнює пошук відповідних точок. [22]

2.2 Алгоритмічні основи 3D-моделювання

Сучасний розвиток комп'ютерного зору та фотограмметрії базується на здатності обчислювальних систем ідентифікувати та об'єднувати ідентичні структури на зображеннях, отриманих у різний час, з різних ракурсів або за різних умов освітлення. Процес за допомогою якого знаходять відповідні точки, відомий як feature matching, розвивався від простих операторів пошуку кутів до складних алгоритмів, що використовують штучний інтелект. Історія створення починається в 1970-х та 1980-х роках, коли дослідники Ганс Моравек та Кріс Гарріс, розробили перші детектори кутів. Проте ці ранні методи мали багато суттєвих недоліків. Справжній прорив стався у 2004 році з публікацією Девіда Лоу про алгоритм SIFT, який став фундаментом для сучасного розуміння дескрипторів. Покращені версії цих алгоритмів є критично важливими для навігації автономних систем, створення цифрових двійників архітектурних об'єктів, медичної візуалізації та доповненої реальності. [15]

Фундаментальний принцип роботи алгоритмів зіставлення ознак полягає у послідовному виконанні чотирьох етапів: виявлення ключових точок, побудова їхнього математичного опису (дескриптора), пошук відповідностей та геометрична верифікація. На етапі виявлення алгоритм знаходить точки, які дають найбільше інформації. В алгоритмі SIFT це

досягається через побудову простору масштабів за допомогою різниці Гаусіанів (Difference of Gaussians, DoG). Математично це виражається як різниця між двома розмитими зображеннями з різними параметрами масштабу σ :

$$D(x,y,\sigma) = L(x,y,k\sigma) - L(x,y,\sigma)$$

Формула 4. Різниця Гаусіанів

де $L(x,y,\sigma)$ — згортка вихідного зображення з ядром Гаусса. Це дозволяє знаходити точки, що є стабільними в широкому діапазоні масштабів. Після знаходження точок необхідно сформулювати дескриптор — вектор, який кодує інформацію про околиці точки. У SIFT це вирішується шляхом розрахунку домінуючої орієнтації градієнтів у локальному вікні та подальшого представлення дескриптора відносно цієї орієнтації.

Наступним етапом є безпосереднє зіставлення (Matching). Основним методом тут є пошук найближчого сусіда (Nearest Neighbor). Для того, щоб підвищити точність використовується критерій відношення відстаней (Lowe's ratio test): відповідність приймається лише тоді, коли відношення відстані до найближчого сусіда до відстані до другого найближчого сусіда є меншим за певне порожнє значення (зазвичай 0.7–0.8). Це дозволяє відсіяти неоднозначні зіставлення, спричинені повторюваними текстурами. Але навіть за таких умов утворюється значна кількість хибних результатів (outliers). Для їх усунення застосовується алгоритм RANSAC (Random Sample Consensus). Він ітеративно обирає мінімальну кількість пар точок для оцінки матриці гомографії H , яка пов'язує координати точок на двох площинах:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Формула 5. Основа алгоритму Random Sample Consensus

Точки, що не задовольняють знайдену модель у межах заданого порогу, вважаються шумом і видаляються.

Сучасні дослідження [25] пропонують принципово інший підхід, заснований на графових нейронних мережах (GNN). На відміну від класичних методів, там використовується механізм "уваги" (Attention), що дозволяє алгоритму враховувати контекст усього зображення. Такий підхід допомагає вирішити проблему зон з низькою текстурою або ситуацій з сильними змінами ракурсу, де класичні дескриптори виявляються безсилими. Мінусом при використанні такого методу є те, що використовується значна кількість (GPU) та наявність великих наборів даних для навчання, тоді як класичні ORB або SIFT залишаються ефективними для завдань, що не потребують глибокого навчання.

Важливим критерієм при виборі алгоритму є баланс між стійкістю та швидкістю. SIFT дає найвищу точність при зміні освітлення та масштабу, але займає більше часу. ORB забезпечує реальний час роботи, але чутливий до сильних перспективних викривлень. Мінусом також є залежність від попередньої фільтрації зображень. Окрім того, при роботі з великими масивами даних (наприклад, тисячі аерознімків) виникає проблема при пошуку в просторі дескрипторів, що вирішується використанням структур даних типу k-d дерев або FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors).

Варто звернути увагу на те, що майбутнє алгоритмів знаходження відповідних точок лежить у гібридизації підходів де класичні геометричні обмеження поєднуються з штучним інтелектом. Саме такий підхід забезпечує субпіксельну точність необхідну для сучасного будівництва, створення автономного транспорту та збереження культурної спадщини через цифрову реконструкцію. [2]

Сучасна фотограмметрія та комп'ютерний зір пройшли довгу еволюцію в ніші реконструкції тривимірних об'єктів на основі цифрових зображень.

Першим етапом розвитку багатовидового стерео (Multi-View Stereo, MVS) був підхід, основою якого було формування орієнтованих фрагментів поверхонь, або патчів, цей алгоритм (PMVS, Patch-based Multi-View Stereo), ввів стратегію «зіставлення, розширення та фільтрації». У ньому процес реконструкції мав локальний характер: система шукала надійні опорні точки на текстурованих ділянках і «вирощувала» з них суцільну поверхню, додаючи сусідні патчі до тих пір, поки не буде досягнуто меж об'єкта або втрачено фотометричну узгодженість. Мінусами такого методу були суттєві обмеження щодо щільності даних на слаботекстурованих поверхнях. Та значні вимоги до обчислювальних ресурсів на послідовну обробку кожного фрагмента. З розвитком технологій основою створення щільних хмар точок, стала методика де за допомогою карт глибини одночасно обчислюють усі пікселі моделі, що дозволяє отримувати фотореалістичні цифрові копії з чудовою деталізацією. [7]

Фундаментом для будь-якої реконструкції є побудова розрідженої хмари точок (Sparse Point Cloud), яка виконується в межах етапу Structure from Motion (SfM). Науковий принцип цього процесу полягає у виявленні ключових ознак на серії вхідних зображень. За допомогою детекторів (наприклад, SIFT або операторів на основі кутів) алгоритм знаходить унікальні пікселі, які залишаються впізнаваними при зміні ракурсу, масштабу або освітлення. Після знаходження відповідностей між кадрами застосовується математичний апарат тріангуляції: знаючи внутрішні параметри камери та її положення в просторі, система обчислює точку перетину променів, що проходять через однакові пікселі на різних знімках. Ключовим інструментом тут виступає процедура глобального порівняння зв'язків (Bundle Adjustment), яка одночасно оптимізує 3D-координати точок та параметри орієнтації кожної камери. Результатом є розріджений «скелет» об'єкта, що складається лише з найбільш інформативних точок, які слугують геометричним орієнтиром для подальшої масивної реконструкції.

Отримавши точні дані про положення камер, сучасні алгоритми переходять до формування щільної хмари точок (Dense Point Cloud), використовуючи метод карт глибини (Depth Maps). На відміну від старого методу патчів, який фокусувався лише на окремих ділянках, метод карт глибини передбачає обчислення просторових координат для кожного пікселя кожного вхідного зображення. Процес стартує з вибору опорного кадру та пошуку стереопар — сусідніх зображень, які мають значне перекриття з основним. Для кожного пікселя опорного кадру алгоритм виконує пошук відповідності вздовж епіпольної лінії на сусідніх знімках. Якість зіставлення оцінюється за допомогою алгоритму, який визначає, наскільки схожим є візуальне оточення пікселя на різних фото. У сучасних реалізаціях, таких як Semi-Global Matching (SGM), задача визначення глибини формулюється як мінімізація енергетичної функції, що враховує не тільки локальну схожість, але й умови гладкості поверхні, запобігаючи різким і нелогічним стрибкам глибини між сусідніми пікселями.

Карта глибини фактично є представленням сцени, де кожному пікселю присвоєно значення відстані від оптичного центра камери до фізичної поверхні об'єкта. Оскільки обчислення глибини для кожного пікселя є незалежною операцією, сучасні системи використовують потужність графічних процесорів (GPU) для одночасної обробки мільйонів точок. Це дозволяє створювати надзвичайно щільні масиви даних навіть на ділянках із мінімальним контрастом, де класичне розширення патчів зазнало б невдачі. Після генерації карт глибини для всіх ракурсів настає критично важливий етап — злиття (Fusion). На цій стадії мільйони індивідуальних точок із різних карт об'єднуються в єдиний тривимірний простір. Алгоритм злиття виконує статистичну перевірку видимості та консистентності: якщо певна точка на карті глибини однієї камери суперечить даним з інших ракурсів або знаходиться в «порожньому» просторі перед об'єктом, вона ідентифікується як шум і відфільтровується. [12]

Через те, що процес створення щільної хмари точок використовує вихідну роздільну здатність знімків, він може забезпечувати високу точність рельєфу поверхні моделі. За допомогою методів багатомасштабного аналізу система може уточнювати координати точок від грубих обрисів до найдрібніших тріщин, саме це допомагає уникнути проблеми зайвого згладжування.

Результатом такого підходу стає хмара точок, яка максимально повно описує складні об'єкти — від гострих країв архітектурних споруд до складних органічних форм. Така цифрова модель поєднує в собі всю доступну візуальну та просторову інформацію, зафіксовану на фото, забезпечуючи фундамент для подальшого створення полігональних сіток та високоякісного текстурування. Перехід до цієї методології став можливим завдяки синергії передової епіпольярної геометрії та сучасних обчислювальних технологій, що дозволило автоматизувати процес реконструкції з рівнем точності, який раніше був доступний лише при використанні дорогого лазерного сканування. [30]

Побудова полігональної сітки (mesh) є логічним продовженням після етапу створення щільної хмари точок. Метою цього процесу є створення сітки, що пов'язуватиме усі точки в хмарі через систему вершин, ребер та граней (зазвичай трикутних), перетворюючи набір розрізнених вимірювань у цілісну геометричну модель, придатну для обчислення метричних параметрів.

Основні методи побудови полігональної сітки у фотограмметрії можна розділити на дві різні категорії: методи на основі прямого з'єднання точок (геометричні) та методи побудови неявної поверхні (об'ємні). Їх різниця лежить у способі інтерпретації вхідної хмари точок та способі формування зв'язків між ними.

Тріангуляція Делоне та алгоритми сімейства Cosec, входять до першої групи методів та працюють за принципом «з'єднання точок». Ці алгоритми розглядають кожну точку як вершину майбутньої сітки. Ідея полягає в аналізі

простору навколо точок: трикутник між трьома сусідніми точками вважається частиною поверхні, якщо він відповідає критерію «порожньої сфери» (навколо нього можна описати кулю, всередині якої не буде жодної іншої точки з набору). Щоб допомогти системі зрозуміти, де проходить межа об'єкта, а де знаходиться порожнеча додають аналіз «полюсів» (найвіддаленіших точок у просторі). Головна перевага такого підходу — максимальна геометрична точність, яка досягається завдяки тому, що поверхня проходить рівно через виміряні координати. Однак ці методи дуже чутливі до «шуму»: якщо камера помилково визначила точку в повітрі, алгоритм спробує з'єднати її з іншими, що призведе до появи артефактів або розривів у сітці.[3]

Натомість, об'ємні методи, а саме, алгоритм Пуассона, діють за принципом побудови «оболонки». Замість того, щоб намагатися з'єднати кожную точку, алгоритм розглядає хмару точок як індикатор того, де приблизно знаходиться поверхня. Для цього кожна точка повинна мати вектор напрямку (нормаль), який показує, в який бік «дивиться» поверхня. Алгоритм Пуассона вирішує математичну функцію, яка описує весь простір, і знаходить у ньому межу, що найкраще відповідає всім точкам одночасно. Такий підхід робить метод Пуассона надзвичайно стійким до помилок — він автоматично згладжує випадковий шум і самостійно «затягує» дірки там, де даних було недостатньо.[21]

Порівнюючи ці методи, очевидно, що методи на основі Делоне є більш точними, але вимагають ідеальної якості хмари точок. Об'ємні ж методи (Пуассон, TSDF) є більш практичними для реальних умов фотограмметрії, оскільки вони здатні генерувати цілісну та естетично привабливу поверхню навіть із зашумлених або неповних даних. Сучасне програмне забезпечення часто поєднує ці методи, використовуючи інформацію про позиції камер для того, щоб точно визначити, які трикутники є реальними, саме це дозволяє досягти балансу між деталізацією та цілісністю моделі.

Після завершення формування геометричного каркаса об'єкта виконується етап текстурювання, який надає моделі фотореалістичного вигляду та додаткової інформативності. У текстурюванні є три ключові стадії: параметризація поверхні (UV-mapping), вибір оптимальних зображень та фінальне змішування (blending). На етапі параметризації тривимірної поверхні сітки розгортається на площину, утворюючи систему координат, де кожній вершині 3D-моделі відповідає точка у 2D-просторі текстури. Результатом цього є текстурний атлас — сукупність фрагментів вихідних знімків, що впорядковані згідно з геометрією моделі.

Вибір зображення для конкретної грані базується на аналізі видимості та геометричних критеріїв: перевага надається тим камерам, чия оптична вісь найближча до нормалі грані, а роздільна здатність проєкції є максимальною. Важливим аспектом є вирішення проблем оклюзій (самозатінення), щоб уникнути проєктування текстури з передніх планів на приховані ділянки. Для створення безшовного переходу між фрагментами з різних камер застосовуються складні алгоритми радіометричної корекції та багаторівневого змішування (multiband blending). Ці методи дозволяють компенсувати різницю в освітленні, балансі білого та витримці, що виникає під час знімання з різних ракурсів. Фінальним результатом текстурювання стає високоточна вимірювальна модель, де візуальна інформація доповнює геометричну точність, дозволяючи ідентифікувати дрібні дефекти, текстурні особливості та матеріали поверхні.

Висновки до розділу 2

У підсумку, можна стверджувати, що фотограмметрія є не просто технічним процесом отримання зображень, а формою прикладної геометрії та математичного моделювання. Ключовий зв'язок між геометрією та 3D-моделюванням полягає в перетворенні кожного пікселя на вектор у просторі, що дозволяє за допомогою моделі центрального проєктування реконструювати фізичну реальність у цифровому форматі. Саме геометричні

принципи тріангуляції забезпечують можливість визначення просторових координат об'єкта, перетворюючи плоскі знімки на метрично точну тривимірну структуру.

Розуміння цих фундаментальних основ є критично важливим для професійної роботи зі спеціалізованим програмним забезпеченням, тільки при розумінні процесів фахівець отримує здатність свідомо керувати процесом реконструкції, аналізувати похибки та оптимізувати параметри орієнтування камер. Незважаючи на прогрес та розвиток технологій класична геометрія залишається непохитним фундаментом, де точність математичного розрахунку безпосередньо конвертується у якість і геодезичну достовірність створеної 3D-моделі.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Суть дослідження та покроковий процес моделювання

Метою мого дослідження є аналіз якості 3D-моделі, створеної за допомогою алгоритмів Structure from Motion (SfM). Її залежність від даних та умов навколишнього середовища під час зйомок. Фокус мого дослідження направлений на визначення мінімальної кількості даних для того, щоб отримати детальну модель для технічно складного об'єкта.

При виконанні аналізу значну увагу було приділено таким аспектам як щільність зйомки та світлочутливість. Це допомогло визначити математичну залежність між кількістю фото та результатом хмари точок. А також оцінити вплив рівня освітлення на кінцевий результат моделювання.

Для проведення експерименту було вибрано складний об'єкт дослідження та доступний метод зйомки, а саме:

Об'єктом дослідження став електронний тахеометр South N3 (рис. 3.1). Він характеризується складною геометрією та наявністю як матових, так і глянцевих поверхонь.



Рис. 3.1 Тахеометр South N3

Для створення зображень було використано камеру мобільного телефону, що дало змогу оцінити можливості "мобільної фотограмметрії" для швидкої документації обладнання в польових умовах.

Для обробки даних була вибрана програма 3DF Zephyr Free. Це програмне забезпечення являється одним з основних професійних інструментів та використовує автоматизовані алгоритми для всіх етапів створення моделей.

У дослідженні було проведено декілька сценаріїв. Параметри дослідницьких сценаріїв наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри сценаріїв дослідження

№ сценарію	Освітлення	Кількість фото	Фокус аналізу
1	Увімкнено	50	Максимальна деталізація
2	Увімкнено	40	Оцінка втрати дрібних деталей
3	Увімкнено	30	Критичний мінімум ракурсів
4	Вимкнено	40	Вплив шумів матриці камери
5	Вимкнено	30	Пошук меж відмови алгоритму

3DF Zephyr - це програмне забезпечення для фотограмметрії створене італійською компанією 3Dflow. Завдяки своєму різноманітному функціоналу та простоті використання воно стало одним із лідерів ринку ПЗ. Не останню роль в популяризації цієї програми зіграла її пробна версія 3DF Zephyr Free яка чудово підходить для навчання та ознайомлення. Обмеженням безкоштовної версії є кількість фото для обробки, а саме - 50.

У своєму дослідженні я використовую безкоштовну версію, через що ідеальною кількістю зображень у моїх дослідженнях також є 50 знімків. Процес створення 3D-моделі не змінюється через кількість опрацьованого

матеріалу, тому для покрокової інструкції по роботі з програмою буде взято за зразок сценарій № 1 (див. табл. 3.1).

Для того щоб почати новий проект та імпортувати фото об'єкта у програму 3DF Zephyr Free у верхньому лівому куті знаходимо головне меню програми серед якого вибираємо вкладку Workflow, при натисканні якої можна побачити різні пункти та потрібний нам New Project (рис. 3.2) при натисканні якого відкривається вікно Project Wizard, також запустити новий проект можна клавішами Ctrl +N.

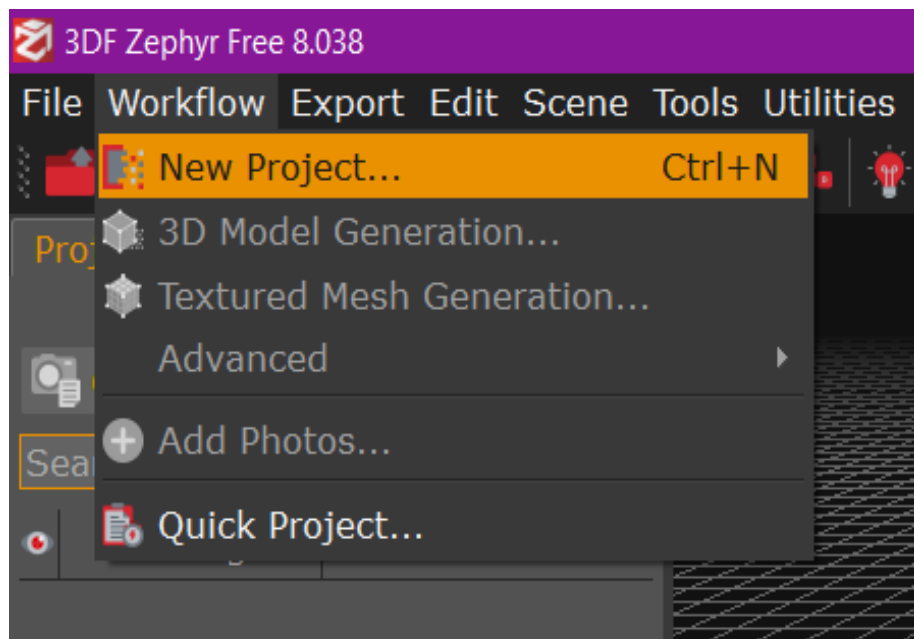


Рис. 3.2 Запуск проєкту

У вікні Project Wizard нам пропонують ознайомитися з деякими порадами та налаштуваннями. При натисканні кнопки Next з'являється вікно у якому можна вибрати фото для опрацювання. (рис. 3.3). У цьому вікні є можливість вибрати як і окремі знімки(ліва крайня кнопка) так і повністю папки з ними (центральна). Якщо під час додавання помилково додали не ті фото використовуючи праву кнопку миші (або праву кнопку з мінусом) можна видалити вибране фото.

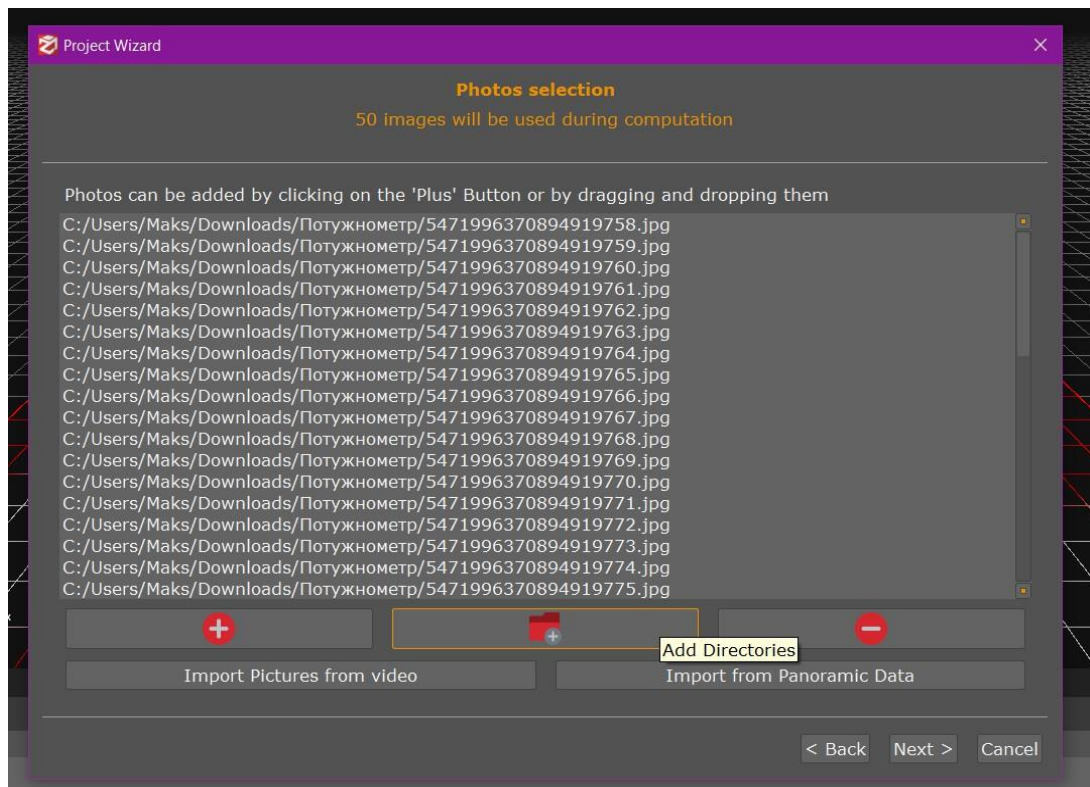


Рис. 3.3 Вікно вибору фото

Після того як усі фото імпортовано натискаємо Next та отримуємо вікно Camera Calibration, у цьому меню ми можемо налаштовувати розширення та параметри фотографій, хоча найчастіше це непотрібно (рис. 3.4).

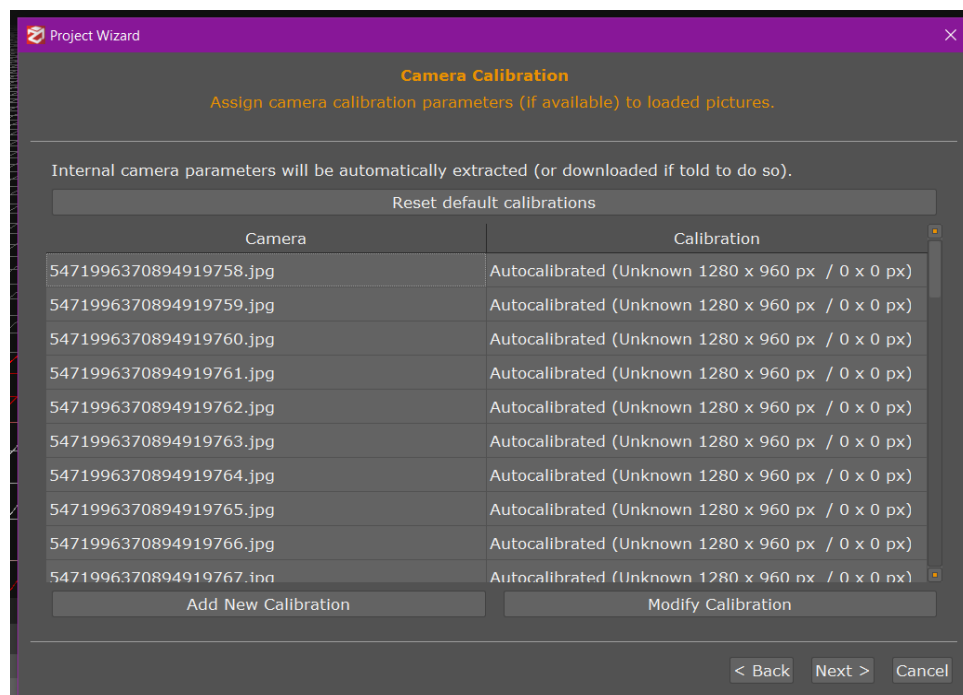


Рис. 3.4 Налаштування камери

Коли всі налаштування були закінчені наступним вікном буде Camera Orientation саме з нього починається процес створення розрідженої хмари точок та налаштування параметрів її створення. Для того щоб налаштувати рівень деталізації у вкладці Presets обираємо параметр Deep, він забезпечує максимальну точність при знаходженні спільних точок (рис. 3.5). Після вибору параметру знову натискаємо Next, та переходимо до наступного кроку.

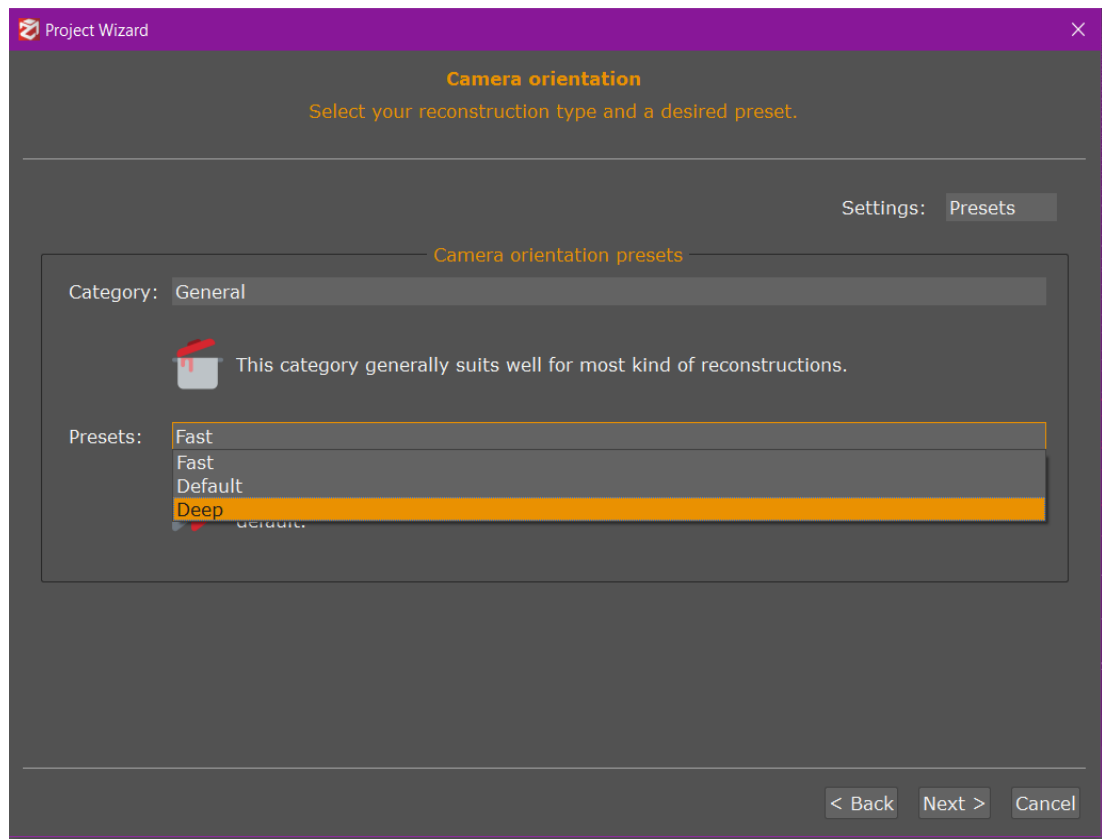


Рис. 3.5 Налаштування параметрів

Наступним вікном буде Start Reconstruction в якому буде відображена уся інформація про процес створення хмари точок. Щоб запустити процес натискаємо Run (рис. 3.6). Після запуску процесу програма знаходить відповідності на фото та виставляє положення камер, що в свою чергу дає змогу створити розріджену хмару точок. Обробка даних забирає час який залежить від вибраних параметрів та продуктивності ПК.

Після закінчення процесу з'явиться вікно-звіт у якому буде видно чи усі фото опрацьовані, натискаємо Finish (рис. 3.7) та отримуємо результат - розріджену хмару точок (рис. 3.8).

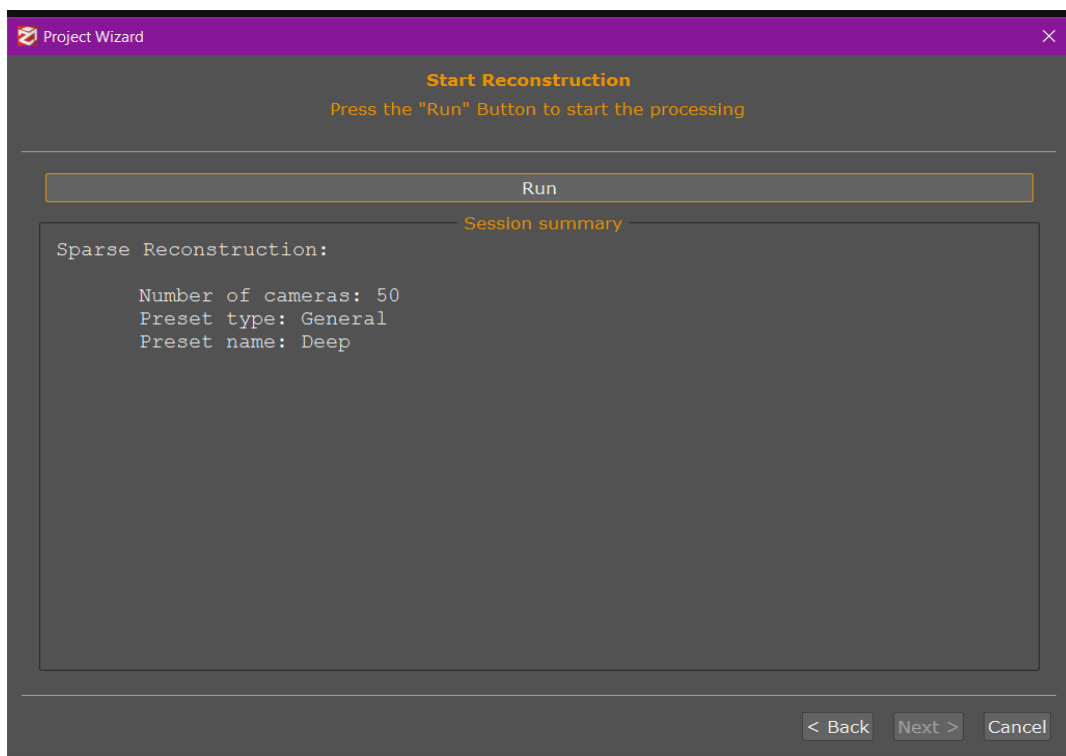


Рис. 3.6 Запуск процесу

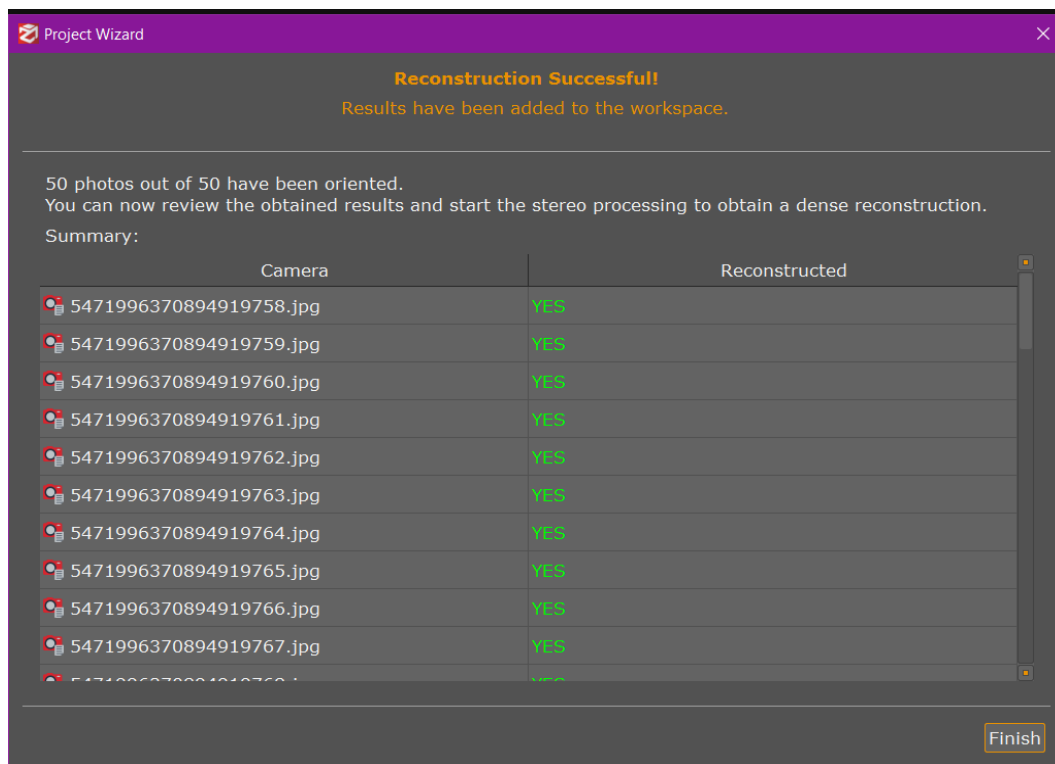


Рис. 3.7 Звіт по додаванню фото

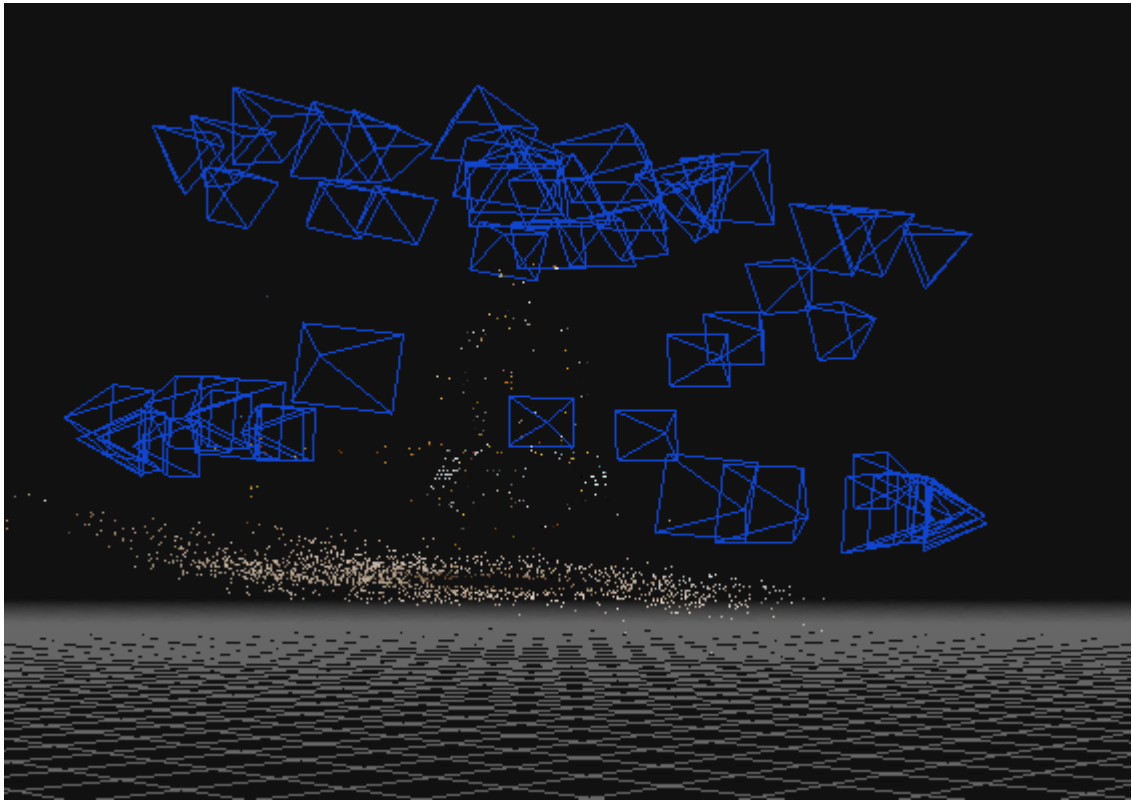


Рис. 3.8 Розріджена хмара точок

Наступним етапом створення 3D- моделі являється створення щільної хмари точок. Для цього знову вибираємо меню Workflow, а далі розділ Advanced який розгортається та показує нам етапи з якими ми будемо працювати в майбутньому. Серед них вибираємо Dense Point Cloud Generation (рис. 3.9). Цей вибір відкриває початкове вікно для етапу (MVS) натискаємо Next та в вікні налаштувань параметрів знову вибираємо Presets та налаштування Ultra (рис. 3.10). Вибраний режим допомагає згенерувати максимально якісну щільну хмару точок. Після налаштування параметрів знову натискаємо кнопку Run та запускаємо процес генерації згущеної хмари точок. Варто зауважити що використання високих налаштувань доволі сильно навантажує ПК та може займати достатню кількість часу.

Після закінчення процесу генерації знову натискаємо Finish та отримуємо щільну хмару точок (рис. 3.11). Готовий результат вже доволі гарно окреслює силует нашого предмета та вже готовий до наступного етапу.

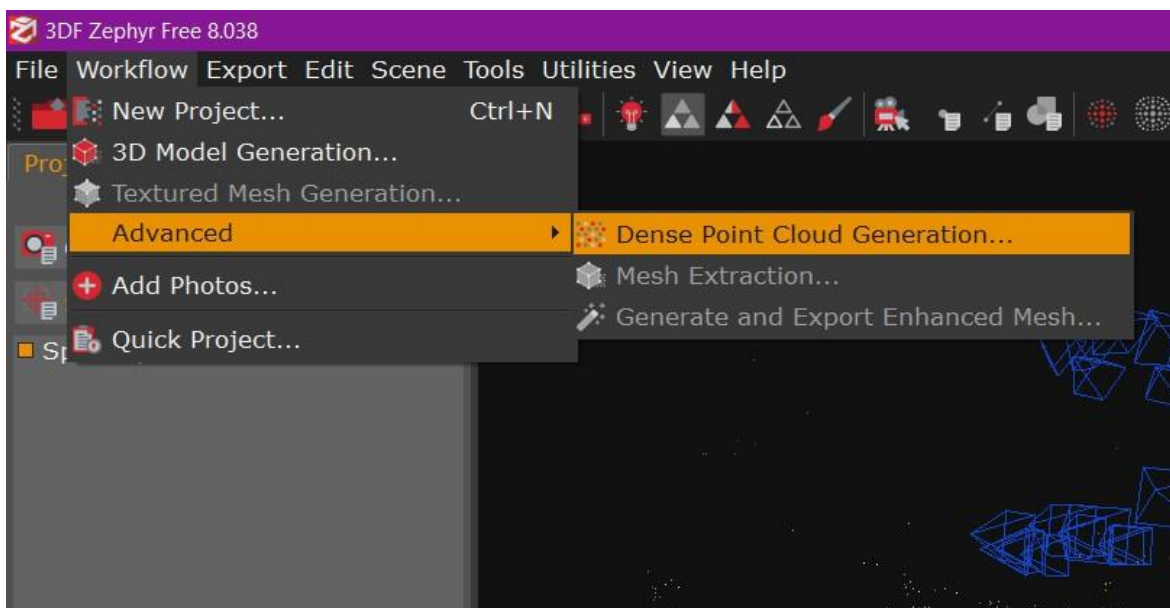


Рис. 3.9 Алгоритм створення щільної хмари точок

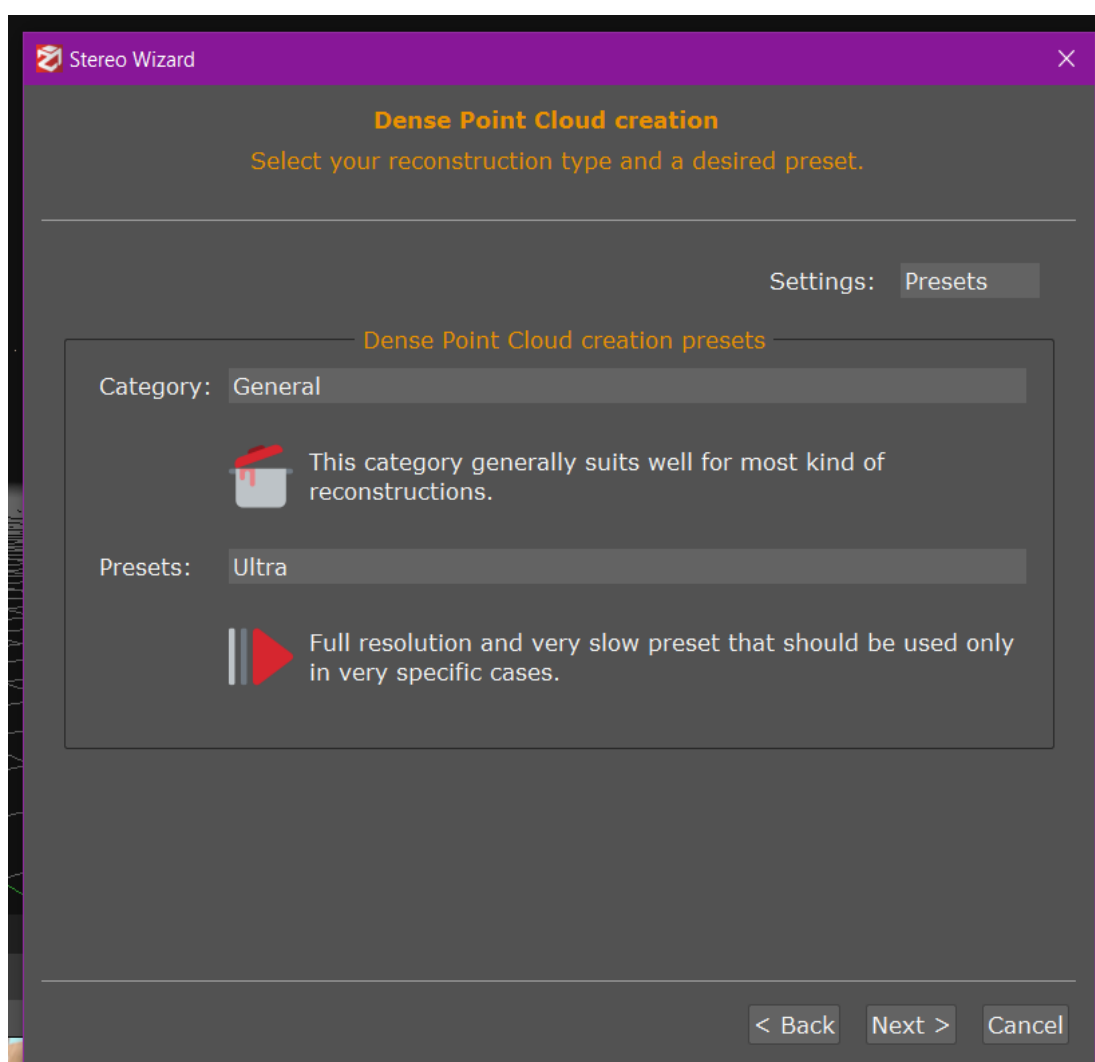


Рис. 3.10 Вибір налаштувань для хмари точок

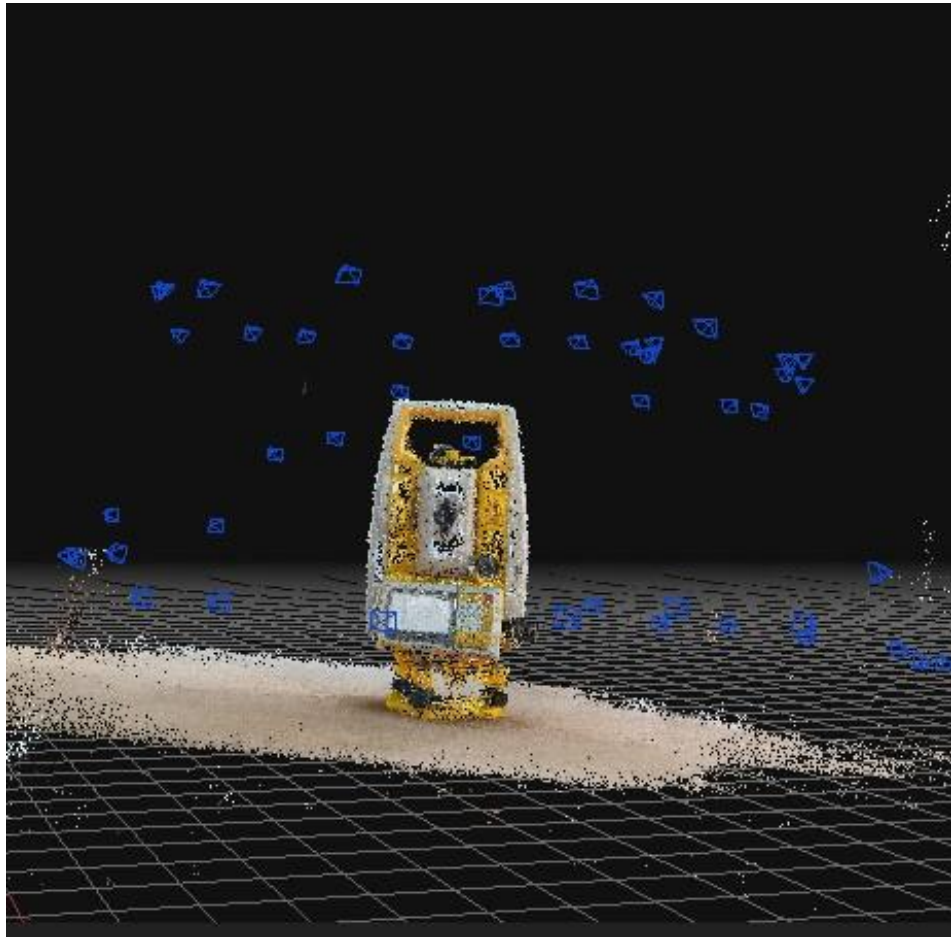


Рис. 3.11 Щільна хмара точок

Після створення щільної хмари точок починається етап створення сітки із полігонів або Meshing. Під час цього етапу алгоритми пов'язують точки між собою за допомогою трикутних полігонів, що закладе основу для кінцевого текстуровання. Для того, щоб розпочати мешінг знову обираємо Workflow+Advanced+Mesh Extraction (рис. 3.12). У вікні що відкрилося натискаємо Next, це відкриває для нас вікно Surface Reconstruction у якому можна налаштувати параметри створення сітки. У полі Presets зі списку параметрів обираємо Ultra (рис. 3.13), що забезпечує максимальну якість для процесу. Натискаємо Next та Run та очікуємо завершення створення сітки.

Після завершення побудови з'явиться попередній перегляд 3D-моделі — тепер вона має суцільну форму, яку можна обертати, наближати, розглядати з різних ракурсів (рис. 3.14).

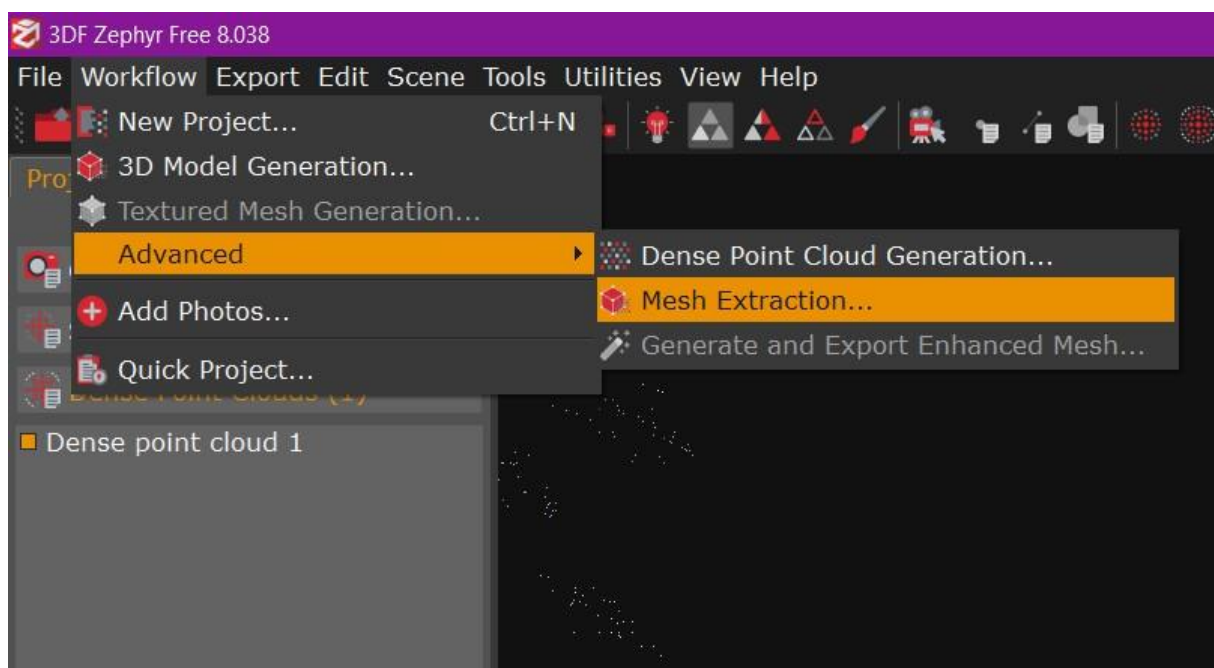


Рис. 3.12 Алгоритм створення сітки

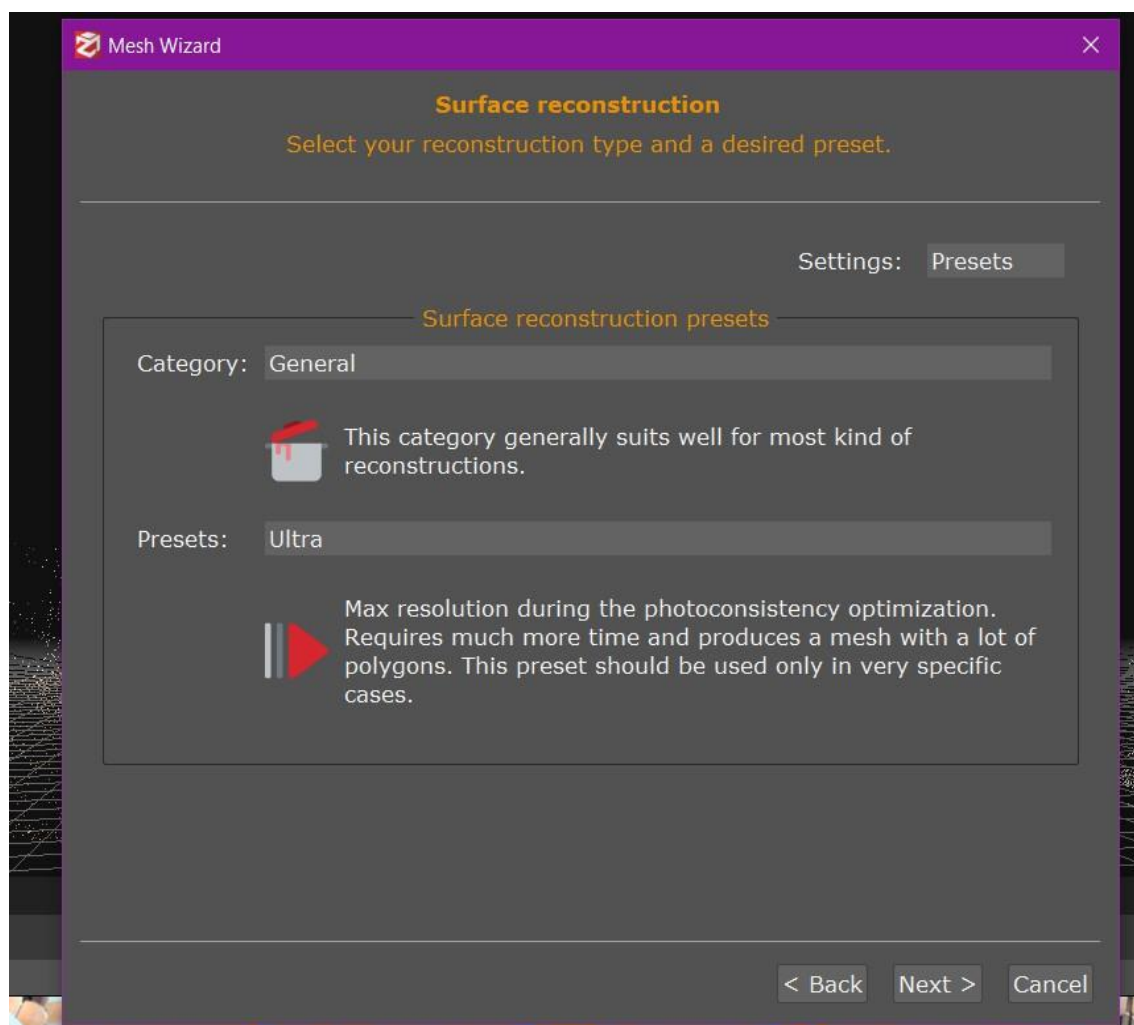


Рис. 3.13 Налаштування мешінгу

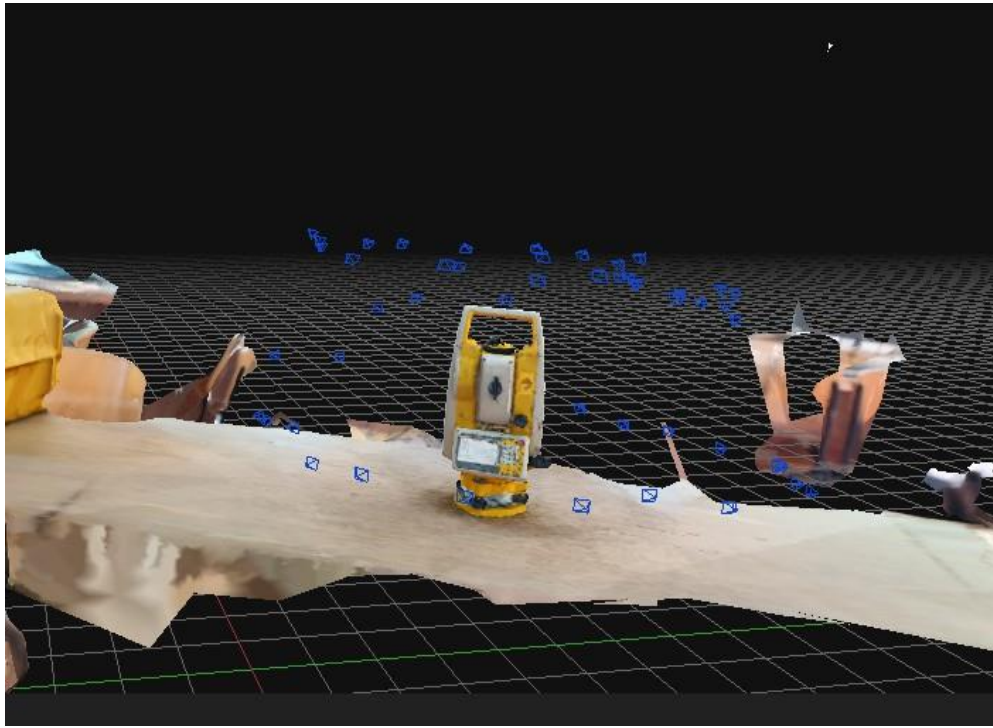


Рис. 3.14 Готова сітка (mesh)

Щоб лишні деталі не впливали на остаточне обчислення та не навантажували ПК їх можна видалити. Для цього в верхньому рядку інструментів вибираємо розділ Tools+Selection+Manual Selection (рис. 3.15). У цьому режимі можемо виділити потрібний нам елемент, а саме нашу модель, після чого знову відкриваємо Tools+Selection та вибираємо Invert Selection (рис. 3.16). Таким чином ми швидко вибираємо все крім нашої моделі та за допомогою Tools+Selection+Delete Selection Items видаляємо непотрібний шум (рис. 3.17).

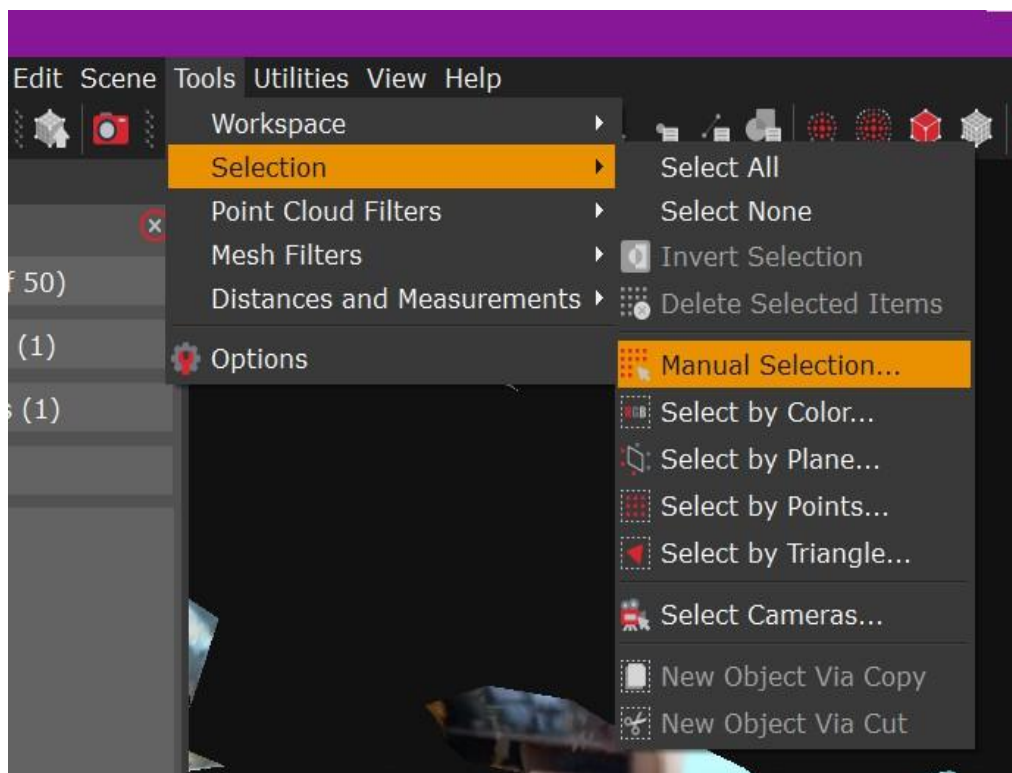


Рис. 3.15 Инструменты для видалення

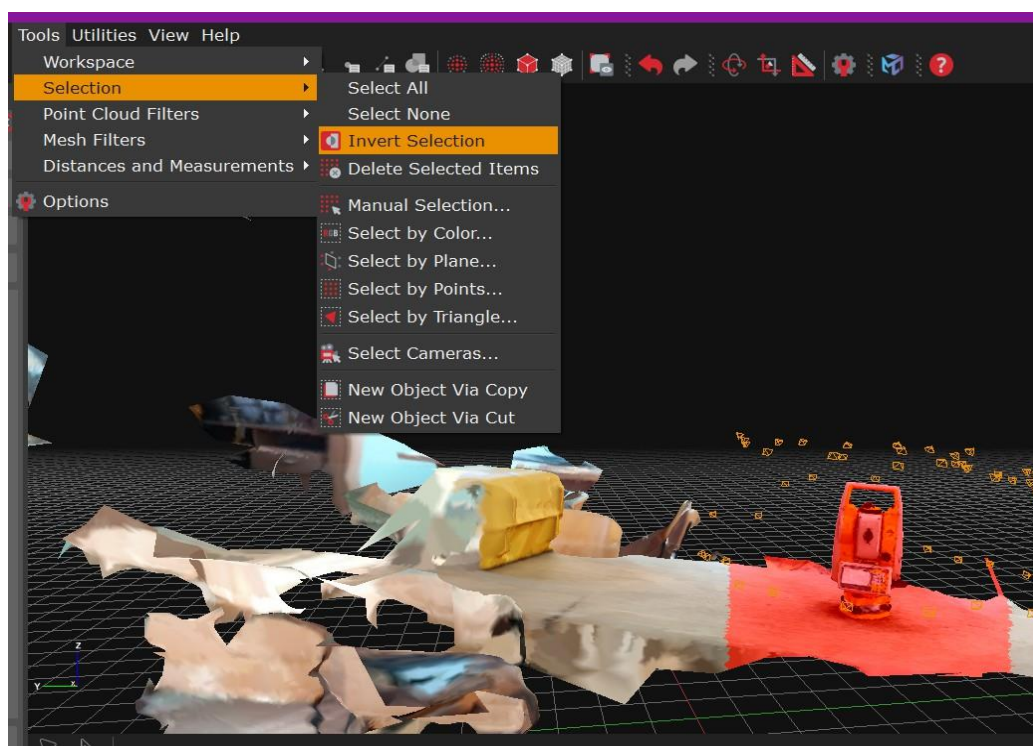


Рис. 3.16 Команда Invert Selection

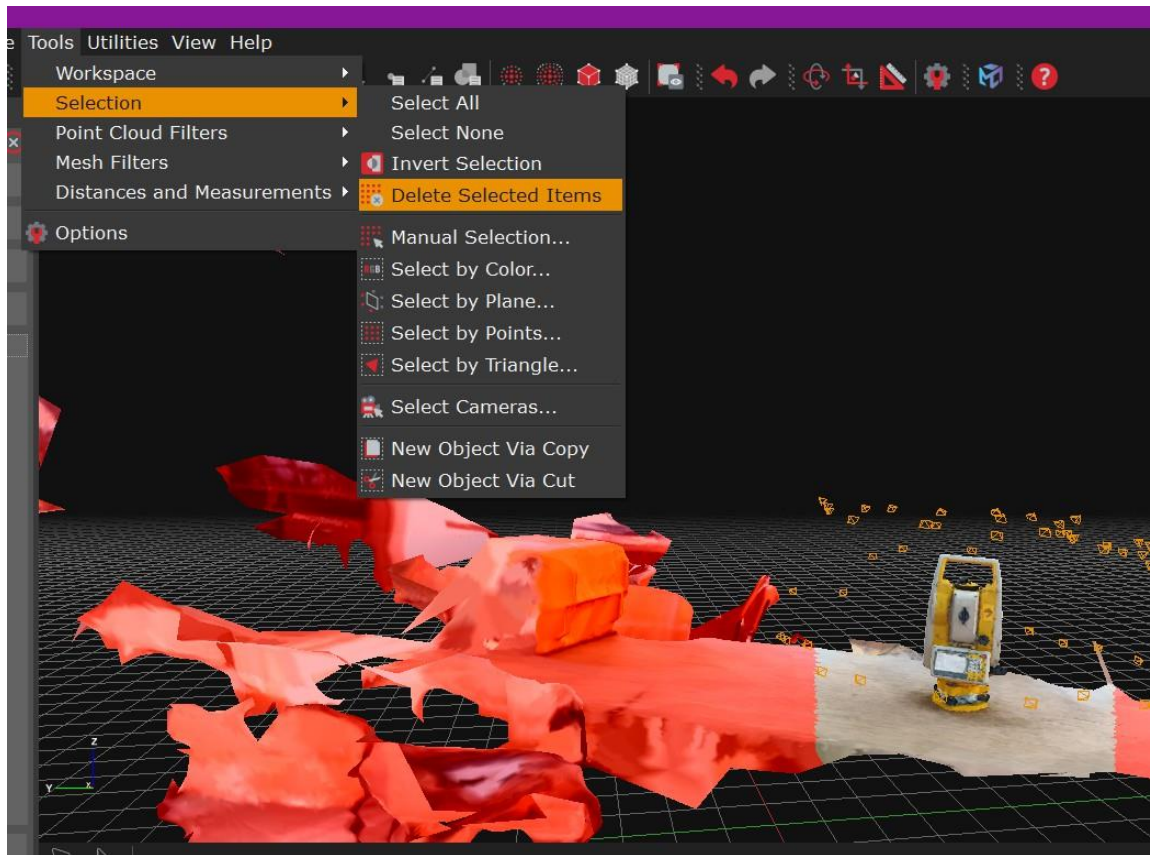


Рис. 3.17 Видалення виділених об'єктів

Видалення непотрібних об'єктів можна проводити і після етапу текстурювання, хоча в деяких випадках зовнішній шум може повпливати на результат текстурювання та подальші редагування 3D-моделі.

Щоб розпочати етап текстурювання у верхньому меню програми відкриваємо вкладку Workflow після чого вибираємо Textured Mesh Generation (рис. 3.18). Саме тут відкривається налаштування майстра створення текстур. Для того, щоб змінити параметр створення відкриваємо Presets та обираємо High details. Саме це налаштування дозволяє програмі працювати з максимальною роздільною здатністю зображень та забезпечує найкраще співвідношення якості текстур та дрібних деталей (рис. 3.19). Після вибору параметрів роботи натискаємо Next та Run, що запускає процес текстурювання. Після завершення процесу ми бачимо результат (рис. 3.20) — тривимірну модель із нанесеною текстурою, яка максимально точно відтворює вигляд реального об'єкта.

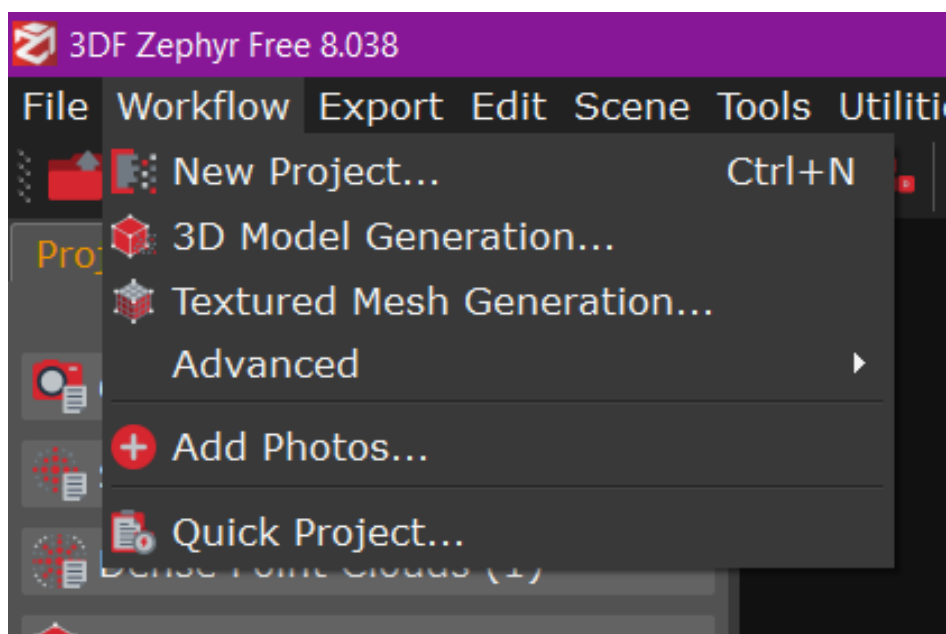


Рис. 3.18 Алгоритм текстурвання

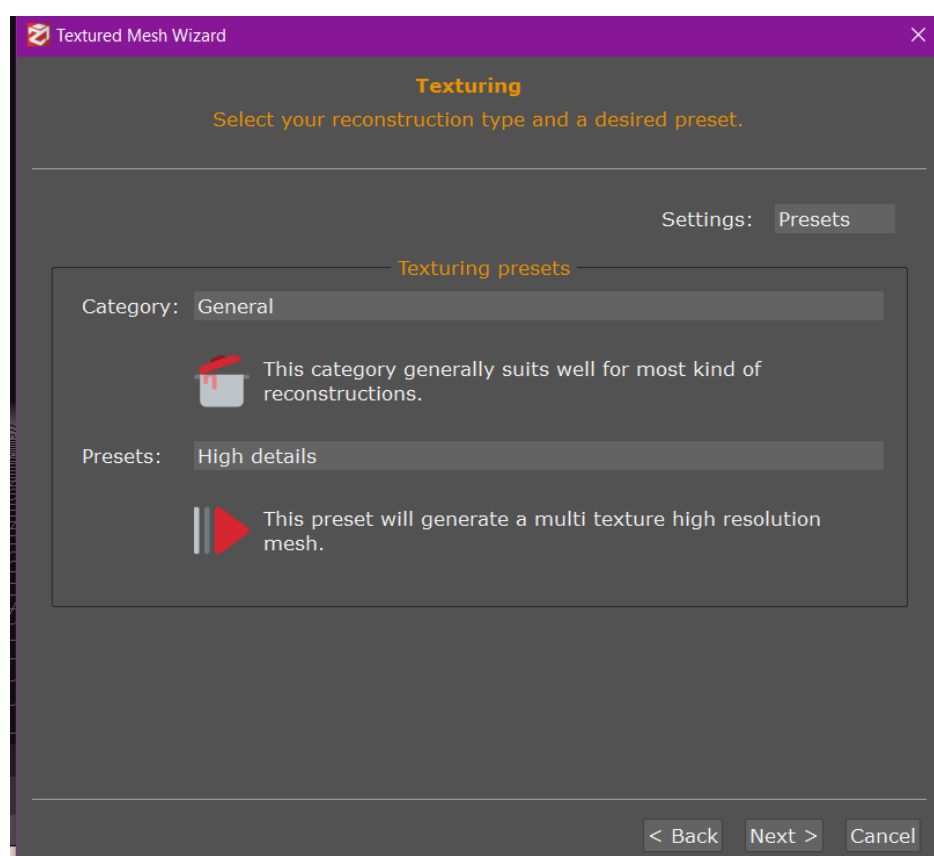


Рис. 3.19 Налаштування параметрів текстурвання



Рис. 3.20 Результат створення моделі

Щоб зберегти вигляд моделі у форматі PDF у меню вибираємо Export+Export Current View as PDF (рис. 3.21). Після натискання відкриється вікно, у якому потрібно задати ім'я файлу та місце для збереження. За потреби можна налаштувати орієнтацію сторінки (портретну або альбомну), роздільну здатність зображення (DPI) та інші параметри, що впливають на якість збереження знімка. Коли всі параметри обрано, натискаємо Save, і програма створює PDF-файл із поточного вигляду сцени. Після завершення експорту можна відкрити документ у будь-якому переглядачі PDF, щоб перевірити, як виглядає модель, чи збережено правильний ракурс і якість зображення.

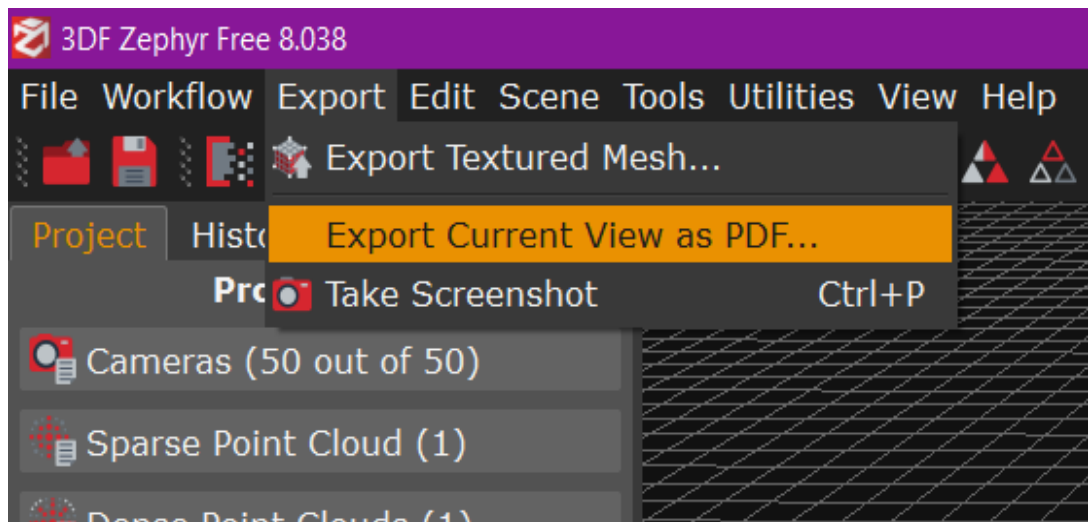


Рис. 3.21 Збереження у форматі PDF

3.2 Аналіз та оцінка 3D-моделей

Аналіз результатів проведеного дослідження демонструє прямий зв'язок між щільністю фотографій, умовами освітлення та здатністю алгоритмів Structure from Motion (SfM) коректно реконструювати геометрію об'єкта. Найбільш якісний результат було отримано за умов сценарію № 1: використання 50 фотографій з освітленням: ця вибірка забезпечила достатнє перекриття для побудови цілісної моделі, хоча навіть за таких умов проявилися артефакти. Зокрема, на глянцевиx поверхнях тахеометра виникли сильні бліки, що дезорієнтувало алгоритм пошуку спільних точок, а в глибоких тінях спостерігалися локальні спотворення геометрії через брак візуальної інформації (рис. 3.22).



Рис. 3.22 Спотворення через білі та тіні

При зменшенні кількості кадрів до 40 (сценарій № 2) у світлих умовах стабільність процесу суттєво знизилася: програма автоматично відбракувала 5 знімків (залишивши 35), що свідчить про розрив зв'язків між ракурсами, а в затінених зонах з'явилися значні деформації, які роблять модель непридатною для точних вимірювань (рис. 3.23).

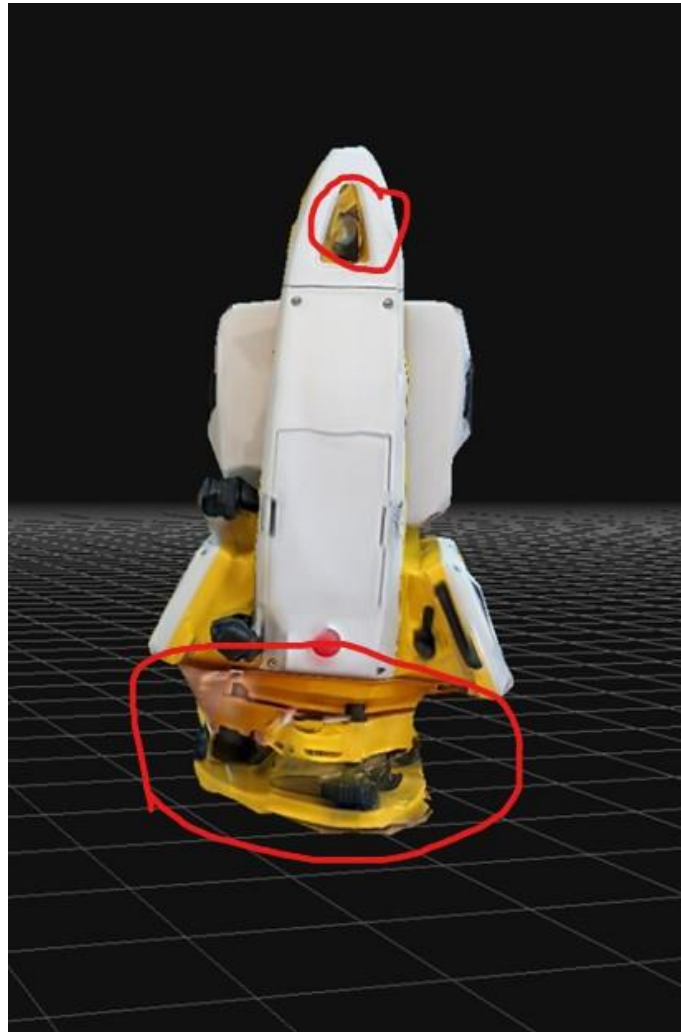
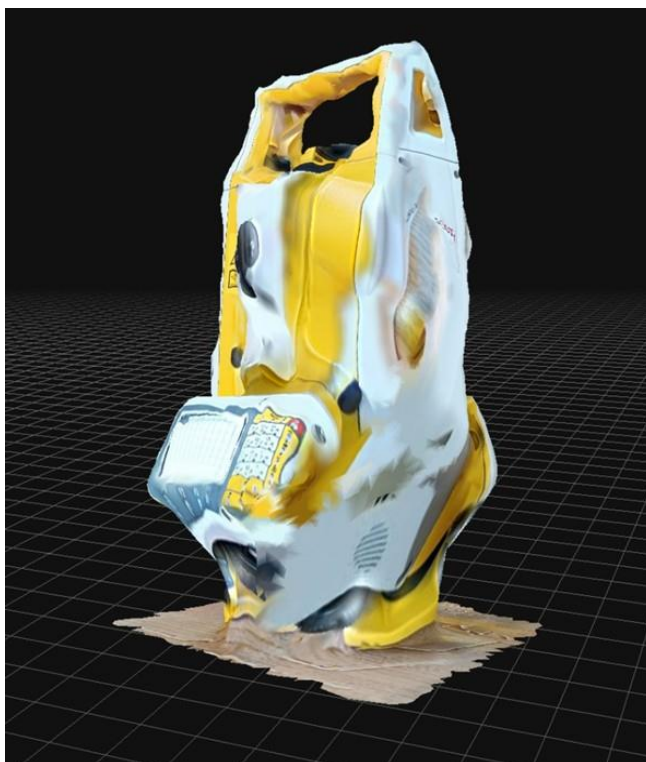


Рис. 3.23 Спотворення у сценарії № 2

Сценарій № 3 із 30 фотографіями при освітленні виявився критичним: через гостру нестачу візуального матеріалу та великий крок між точками зйомки виникли масивні геометричні спотворення, а значна частина фото була відхилена ще на етапі ініціалізації (рис. 3.24).

Цікаво, що в умовах сценарію № 4 з вимкненим освітленням та 40 фото. Було продемонстровано дещо інший характер помилок: замість різких бліків спостерігалася загальна тьмяність текстур та невеликі спотворення в тінях, спричинені, ймовірно, цифровим шумом камери при поганому світлі, що ускладнило виділення чітких рис об'єкта (рис. 3.25).



**Рис. 3.24 Спотворення при недостатній кількості матеріалу
(сценарій № 3)**



Рис. 3.25 Спотворення при поганому освітленні (сценарій № 4)

Однак повний крах методики зафіксовано у фінальному сценарії № 5 (30 фото без освітлення), де поєднання поганого освітлення та мінімального перекриття кадрів унеможливило знаходження спільних точок (tie points). Програма не змогла орієнтувати кадри в просторі та не видала жодного результату, що визначає цей поріг як межу відмови алгоритмів.

Підсумовуючи результати дослідження, можна дійти висновку, що для успішної фотограмметричної реконструкції складних інженерних приладів, таких як тахеометр South N3, критичним фактором є не стільки інтенсивність освітлення, скільки його рівномірність та надлишковість вхідних даних. Аналіз підтвердив, що ліміт у 50 фотографій є мінімумом для забезпечення цілісності моделі: при скороченні вибірки навіть на 20% збільшується кількість помилок орієнтування камер та розривів у тріангуляційній сітці.

Саме тому головною порадою для покращення якості моделювання є перехід від прямого штучного світла до використання дифузних відбивачів або зйомки в умовах "м'якого" хмарного освітлення, що дозволить усунути паразитні відблиски та вирівняти експозицію в затінених зонах. Для компенсації відбраковування кадрів програмою варто дотримуватися правила 60% перекриття між сусідніми знімками та виконувати зйомку за двома або трьома колами на різних рівнях висоти, що забезпечить надійне "замикання" геометрії та дозволить отримати деталізовану текстуру навіть на складних вузлах приладу без залучення дорогого професійного світла.

Висновки до розділу 3

Перевіривши на власному досвіді можу сказати, що програма 3DF Zephyr є хорошим інструментом для побудови тривимірних моделей об'єктів на основі цифрових знімків. Серед основних переваг програми варто відзначити високий рівень автоматизації процесів, зручний інтерфейс та підтримку повного циклу обробки даних. Програма демонструє хорошу точність визначення геометрії об'єкта, особливо за умови достатньої кількості якісних фотографій та правильного дотримання принципів

фотозйомки. Значною перевагою є також можливість працювати без спеціалізованого обладнання, використовуючи звичайну цифрову камеру, що робить фотограмметричні технології доступнішими для наукових досліджень та практичного застосування.

Потрібно взяти до уваги те, що якість реконструкції суттєво залежить від умов освітлення, текстури поверхні об'єкта та кількості початкових даних. При недостатньому перекритті знімків або наявності сильних відблисків програма може помилково орієнтувати камери, що призводить до виникнення розривів у тріангуляційній сітці чи втрати окремих ділянок моделі. Дослідження підтвердило, що навіть незначне зменшення кількості фотографій негативно впливає на цілісність моделі та збільшує кількість похибок під час побудови геометрії. Саме тому ефективна робота в програмі потребує ретельної організації процесу фотозйомки, дотримання достатнього перекриття між кадрами та забезпечення максимально рівномірного освітлення. При дотриманні всіх цих нюансів та правильного використання функціоналу програми можна отримати деталізовану 3D-модель навіть на складних елементах конструкції.

ВИСНОВКИ

Повністю підсумовуючи дослідження, можна сказати, що сучасна фотограмметрія пройшла розвиток від класичних аналітичних методів до повністю автоматизованих цифрових систем, ставши чудовим інструментом для відтворення реальності у тривимірному просторі. Аналізуючи історичний розвиток галузі, стає зрозуміло, що на основі фундаментальних геометричних принципів були побудовані надскладні сучасні алгоритми комп'ютерного зору. Процес побудови 3D-об'єкта за його знімками сьогодні є синергією математичної точності та обчислювальної потужності, де перехід від пошуку спільних точок на зображеннях до генерації щільних хмар точок, побудови полігональних сіток і фінального текстуровання відбувається з мінімальним втручанням оператора, але з високим рівнем достовірності.

Знайомство з програмою 3DF Zephyr Free підтвердило, що сучасні програми мають високу адаптивність до різних умов зйомки та типів об'єктів. Досвід роботи з програмним забезпеченням показав, що ключовим фактором успіху є не лише алгоритмічна база, а й якість стартових даних. У цьому аспекті підкреслюється важливість розуміння фізичних основ формування зображення. 3D-моделювання є революційним способом збереження інформації для архівації культурної спадщини, промислового проектування, медицини та створення інтерактивного контенту. Фотограмметрія забезпечує унікальну можливість документації об'єктів із надвисокою точністю, що робить її незамінною у сферах, де критично важливим є збереження метричних параметрів.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що тривимірна реконструкція на основі знімків є не просто технічним процесом, а стратегічним напрямом розвитку цифрових технологій. Вона відкриває нові горизонти для візуалізації та аналізу даних, дозволяючи переносити фізичні об'єкти у цифрове середовище з максимальною автентичністю.

Подальший розвиток галузі, ймовірно, буде пов'язаний із впровадженням штучного інтелекту для покращення якості текстур та автоматичної сегментації моделей, проте фундаментальна геометрична основа, описана в доповіді, залишатиметься незмінним ядром технології. Саме тому, опанування фотограмметричних методів сьогодні є необхідною умовою для фахівців, що працюють із просторовими даними, а розвиток таких інструментів, як 3DF Zephyr, робить ці складні технології доступними для широкого кола дослідників та практиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Altuntas, C. (2021). *Triangulation and time-of-flight based 3D digitisation techniques of cultural heritage structures*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/352825251 TRIANGULATION AND TIME-OF-FLIGHT BASED 3D DIGITISATION TECHNIQUES OF CULTURAL HERITAGE STRUCTURES](https://www.researchgate.net/publication/352825251_TRIANGULATION_AND_TIME-OF-FLIGHT_BASED_3D_DIGITISATION_TECHNIQUES_OF_CULTURAL_HERITAGE_STRUCTURES)
2. Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2008). Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), 346–359. [https://www.researchgate.net/publication/225761164 SURF Speeded up robust features](https://www.researchgate.net/publication/225761164_SURF_Speeded_up_robust_features)
3. Cazals, F. (2006). *Delaunay triangulation based surface reconstruction*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/226036877 Delaunay Triangulation Based Surface Reconstruction](https://www.researchgate.net/publication/226036877_Delaunay_Triangulation_Based_Surface_Reconstruction)
4. Dai, F., et al. (n.d.). *Application of photogrammetry: 3D modeling of a historical building*. SciSpace. <https://scispace.com/pdf/application-of-photogrammetry-3d-modeling-of-a-historical-286cz5sw7d.pdf>
5. Dorozhynskyy, O. L. (2014). *Fotogrametriya: Pidruchnyk [Photogrammetry: Textbook]*. Lviv Polytechnic Publishing House. <https://studfile.net/preview/16666986/>
6. Guzman S. B. (May 2025). *From reality to virtual worlds: The role of photogrammetry in game development*. (n.d.). ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/391991435 From Reality to Virtual Worlds The Role of Photogrammetry in Game Development](https://www.researchgate.net/publication/391991435_From_Reality_to_Virtual_Worlds_The_Role_of_Photogrammetry_in_Game_Development)

7. Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362–1376.
https://www.researchgate.net/publication/221364612_Accurate_Dense_and_Robust_Multi-View_Stereopsis
8. Ghosh, S. K. (1992). History of photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(6), 311–314.
https://www.isprs.org/proceedings/xxix/congress/part6/311_xxix-part6.pdf
9. Grimm, A. (1980). The origin of the term photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry*, 23(B10), 114–121.
<https://www.isprs.org/society/history/grimm-the-origin-of-the-term-photogrammetry.pdf>
10. Gros, J. S. (2020). On Laussedat's contribution to the emergence of photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020, 893–899.
<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B2-2020/893/2020/>
11. Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). *Multiple view geometry in computer vision* (2nd ed.). Cambridge University Press.
https://books.google.com.ua/books/about/Multiple_View_Geometry_in_Computer_Vision.html?id=e30hAwAAQBAJ
12. Hirschmüller, H. (2007). Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), 328–341.
https://www.researchgate.net/publication/224798969_Accurate_and_Efficient_Stereo_Processing_by_Semi-Global_Matching_and_Mutual_Information
13. Jiang, S. (2024). *3D reconstruction of spherical images based on incremental structure from motion*. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/379532910_3D_reconstruction_of_spherical_images_based_on_incremental_structure_from_motion

14. Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans* (2nd ed.). De Gruyter.
<https://books.google.com.ua/books/about/Photogrammetry.html?id=sjP-IvYCYkQC>
15. Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110.
[https://www.researchgate.net/publication/316240097 Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints](https://www.researchgate.net/publication/316240097_Distinctive_Image_Features_from_Scale-Invariant_Keypoints)
16. Luhmann, T., Robson, S., Boehm, J., & Harley, I. (2014). *Close-range photogrammetry and 3D imaging* (2nd ed.). De Gruyter.
[https://www.researchgate.net/publication/344995043 Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging English ed 3](https://www.researchgate.net/publication/344995043_Close-Range_Photogrammetry_and_3D_Imaging_English_ed_3)
17. Lukianchenko, I. O. (2025). Generation of a three-dimensional model of an object based on its photographic images. *Agricultural and Resource Economics*, 11(4), 45–60. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-45>
18. McGlone, J. C. (Ed.). (2013). *Manual of photogrammetry* (6th ed.). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
[https://www.academia.edu/69009469/Manual of photogrammetry](https://www.academia.edu/69009469/Manual_of_photogrammetry)
19. Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley & Sons.
[https://www.researchgate.net/publication/243768411 Introduction to Modern Photogrammetry](https://www.researchgate.net/publication/243768411_Introduction_to_Modern_Photogrammetry)
20. Niedzielski, T. (2014). *Satellite technologies in geoinformation science: Introduction*. ResearchGate.
[https://www.researchgate.net/publication/263052542 Satellite Technologies in Geoinformation Science Introduction](https://www.researchgate.net/publication/263052542_Satellite_Technologies_in_Geoinformation_Science_Introduction)
21. Nocerino, E., Stathopoulou, E. K., Rigon, S., & Remondino, F. (2020). Surface reconstruction assessment in photogrammetric applications. *Sensors*, 20(20), Article 5920. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7594060/>

22. Pan, L., Baráth, D., Pollefeys, M., & Schönberger, J. L. (2024). *Global Structure-from-Motion revisited*. arXiv. <https://arxiv.org/html/2407.20219v2>
23. Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., & Scaioni, M. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling—current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1/C22), 25–31. https://www.researchgate.net/publication/285028412_UAV_photogrammetry_for_mapping_and_3D_modelling-current_status_and_future_perspectives
24. Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and ground-based photogrammetry: A comparison. *Remote Sensing*, 10(10), Article 1563. <https://doi.org/10.3390/rs10101563>
25. Sarlin, P. E., Malisiewicz, T., DeTone, D., & Rabinovich, A. (2020). SuperGlue: Learning feature matching with graph neural networks. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4938–4947. https://www.researchgate.net/publication/337560349_SuperGlue_Learning_Feature_Matching_with_Graph_Neural_Networks
26. Schönberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-Motion revisited. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4104–4113. <https://demuc.de/papers/schoenberger2016sfm.pdf>
27. Toutin, T. (2004). Geometric processing of remote sensing images with airborne and spaceborne sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 25(22), 4853–4890. <https://doi.org/10.1080/01431160412331268594>
28. Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., & Fitzgibbon, A. W. (2000). Bundle adjustment—A modern synthesis. In *Vision Algorithms: Theory and Practice* (pp. 298–372). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44480-7_21

29. Wahib, S. (2022). *Photogrammetry: A brief historical overview*. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/365778003_Photogrammetry_A_Brief_Historical_Overview

30. Yao, Y., Luo, Z., Li, S., Fang, T., & Quan, L. (2018). Mvsnet: Depth inference for unstructured multi-view stereo. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 767–783.

https://www.researchgate.net/publication/324387746_MVSNet_Depth_Inference_for_Unstructured_Multi-view_Stereo