Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту
(повна назва)
Кафедра Інформатики
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МОДЕЛІ І МЕТОДУ РЕКОНСТРУКЦІЇ В ПРОСТОРІ НА ОСНОВІ ЗОБРАЖЕНЬ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ІНФм-18-2
Шевченко В.М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 122 Комп’ютерні науки
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформатика
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Путятін Є.П.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ____________ Путятін Є.П.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту
(повна назва)

Кафедра Інформатики
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 122 Комп’ютерні науки
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформатика
(повна назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри ______________
(підпис)
« 21 » жовтня 20 19 р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Шевченко Вікторії Михайлівни
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та розробка моделі і методу реконструкції в просторі на основі зображень

затверджена наказом по університету від « 21 » жовтня 2019 року № 1506Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25 листопада 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи вибірка зображень для 3D реконструкції, Python, 3D програми, програми для візуалізації моделей, камери, камери вимірювання глибини, операційна система Linux (CentOs)

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Основні відомості фотограмметрії образів
2. Огляд апаратних пристроїв для фотограмметрії.
3. Огляд програмних методів фотограмметрії
4. Основні положення реалізація проекту

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Етапи фотограмметрії, Дісторсія зображень, Контактний сканер, Безконтактний сканер, Виділення контурів на зображенні, Приклад результату PointSetGen, Приклад рузельтату 3D-R2N2

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на атестаційну роботу	21.10.2019	
2	Аналіз завдання, підбір літератури	05.11.19-10.11.19	
3	Аналіз літератури з досліджуваної проблеми	11.11.19-15.11.19	
4	Аналіз технічних засобів	16.11.19-18.11.19	
5	Розробка методу	19.11.19-22.11.19	
6	Програмна реалізація	22.11.19-24.11.19	
7	Оформлення пояснювальної записки	25.11.19-01.12.19	
8	Перевірка на плагіат	22.11.19	
9	Рецензування	23.11.19	
10	Підготовка презентації та доповіді	23.11.19	
11	Занесення роботи в електронний архів	24.11.19	
12	Попередній захист атестаційної роботи	25.11.19	

Дата видачі завдання 21 жовтня 2019 р.

Студент ____________________
(підпис)

Керівник роботи ____________________ проф. Путятін Є.П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ/ABSTRACT

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 81 с., 17 рис., 43 джерело.

3D-РЕКОНСТРУКЦІЯ, КАРТА ГЛИБИНИ, НЕЙРОМЕРЕЖА, 2D ЗОБРАЖЕННЯ, OPENCV, ДИСТОРСІЯ.

Метою роботи є розробка методів та моделей, що базуються на 2d зображенні можуть реконструювати його у 3d модель. Тривимірна реконструкція це процес отримання форми і вигляду реальних об'єктів.

Об’єктом дослідження є послідовність різноракурсних зображень об’єктів для подальшого їх перетворення у 3D модель.

3D-реконструкція з декількох зображень - це створення тривимірних моделей із набору зображень. Це зворотний процес отримання 2D-зображень із 3D-сцен. Суть зображення - це проекція зі сцени 3D на 2D площину, під час якої втрачається глибина.

Використано методи бібліотеки OpenCV. Проведено дослідження методів реконструкції моделей на основі зображень, та аналізу зображень на рівень шуму. Були отримані карти глибини для знаходження об’єктів у простору для 2D зображення. Отримано зображення з декількох ракурсів для застосування його у 3D реконструкції.

У результаті роботи здійснена програмна реалізація системи підготовки зображень для 3D реконструкції.

3D-RECONSTRUCTION, DEPTH MAP, NEURAL NETWORK, 2D IMAGE, OPENCV, DISTORTION.

The goal is to develop methods and models that are based on 2d images can reconstruct from them a 3d model. 3D reconstruction is the process of denying the form and the appearance of real objects.

The object of the study is the sequence of multi-point image objects for their own transformation into 3D models.

3D reconstruction from multiple images is the creation of three-dimensional models from a set of images. It is the reverse process of obtaining 2D images from 3D scenes. The essence of an image is a projection from a 3D scene onto a 2D plane, during which process the depth is lost.

The OpenCV library methods have been used. Methods of image-based model reconstruction and noise analysis were investigated. Depth maps were obtained to locate objects in space for 2D images. The sequence of multi-point image objects was obtained for use in 3D reconstruction.

As a result of implemented software implementation of the image preparation system for 3D reconstruction was made.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів 7
Вступ 8
1 Основні відомості фограметрії образів 9
  1.1 Сфери застосування 9
  1.2 Фотограмметрія 12
  1.3 Класифікація фотограмметрії 16
  1.4 Об’єкти 3D моделювання 18
  1.5 Основні відомості нейромереж 19
  1.6 Постановка задачі дослідження 21
2 Технології створення 3D моделей 22
  2.1 Відомі підходи 22
  2.2 Стереоскопічне спостереження 25
    2.2.1 Оптичний метод 25
    2.2.2 Анагліфічних спосіб 26
    2.2.3 Поляроїдний спосіб 27
  2.3 Методи обробки зображення 27
  2.4 Карта глибини 31
  2.5 Елементи внутрішнього орієнтування 33
  2.6 Програмне забезпечення 38
    2.6.1 Створення за допомогою 3D сканерів 38
    2.6.2 Лазерні сканери 42
    2.6.3 Программні додатки 44
3 Комп’ютерна 3D модель з зображень 49
  3.1 Обґрунтування вибору середовища програмної реалізації 49
  3.2 Порядок виконання роботи 51
  3.3 Побудова карти глибини 56
  3.4 Труднощі фотограметрії 64
  3.5 Програмна реалізація 66

Висновки 74
Перелік джерел посилання 76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НМ – нейронна мережа

Датасет – набір даних, вибірка

Tensorflow – назва бібліотеки машинного навчання

БД – база даних

ОС – операційна система

ІТ - інформаційні технології

ВСТУП

Протягом довгих років людство приділяє особливу увагу розвитку інформаційних технологій. Сучасне суспільство неможливо уявити без інформаційних технологій. Інформаційні технології як прогресують розвиток людства, так і регресують розвиток людства. Нові технології є головною рушійною силою вже до існуючих силам світового ринку.

Розробка інноваційних технологій є дуже важливою і цікавою сферою діяльності людини. Людина може розробити щось нове, створити те, що допоможе людям, при цьому він може не заганяти себе в рамки і надати собі політ думок.

Комп’ютерна графіка – галузь інформатики, що вивчає методи та прийоми обробки графічних зображень за допомогою комп’ютерної техніки. Комп’ютерна графіка розділяється за трьома основними напрямками: візуалізація, обробка зображень і розпізнавання образів. Тривимірна реконструкція може застосовуватися для відновлення вигляду об'єктів або ландшафтів. Використовується в робототехніки для отримання тривимірної розгортки місцевості, відстані до землі, визначення швидкості.

Існує цілий ряд систем з аналізу тривимірних зображень і структур. Машинний зір є частиною інформаційних технологій, безпосередньо пов'язаної з обчислювальною технікою, промисловістю, оптикою і машинобудуванням. Зазвичай, системи машинного зору запрограмовані під виконання вузькоспеціалізованих завдань, спочатку встановлених замовником.

Реконструювання 3D-моделі по фотографій - відкрита проблема через високий ступінь мінливості некаліброваних зображень. Освітлення, розташування об'єкта, камери і розширення зображення різко відрізняються від фотографії до фотографії. В останні роки велика увага приділяється реконструкції осіб з Інтернету. Тому у даній атестаційній роботі буде розглянуто методи реконструкції зображень в просторі.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ФОГРАМЕТРІЇ ОБРАЗІВ

1.1 Сфери застосування

Важко знайти іншу сферу інженерної діяльності, успіхи в якій за піввіковий період можна було б порівняти з досягненнями в області обчислювальної техніки. Це, перш за все, фантастичні результати в області зростання швидкодії комп'ютерів, обсягів оперативної і зовнішньої пам'яті, мікро - мініатюризації, мережевих технологій, розподілених баз даних, машинної графіки і мультимедійних систем.

Проте, досягнення в галузі комп'ютерного зору і слуху є непорівнянними і представляються куди більш скромними. Цей дисбаланс стає все більш нетерпимим в умовах зростання потреб у створенні інтелектуальних систем, забезпечених зором і слухом і наближаються за можливостями до людини. У розвинених країнах намітилося значне зростання публікацій і фінансування в напрямку ліквідації цього технологічного протиріччя [1].

Дедалі більшого поширення набули системи автоматизованого введення інформації через різні типи сканерів (ручні, листові, барабанні, графічні планшети, дигітайзери, факс-модеми), а також цифрові фото- і відеокамери. При цьому по роздільної здатності такі системи введення цілком наближаються до зору людини або тварин, а з урахуванням швидкодії найближчій технічної моделлю очі, очевидно, є відео- та цифрові фотокамери. Так ПЗЗ матриця цифрової фотокамери забезпечує дозвіл до 3 млн. Пікселів на кадр, а сучасним високопродуктивним комп'ютерам цілком доступна нескладна обробка в реальному масштабі часу, наприклад, просторова плоско - паралельна кореляція.

Проте, можливості інтелектуального аналізу зображень за допомогою комп'ютерів залишають бажати більшого. Необхідність поглибленої їх обробки і розпізнавання вимагають, принаймні, дві галузі технічних

додатків; робототехніка і експертні системи. Промислові роботи, забезпечені комп'ютерним зором дозволяють порівняно швидко до дешево виробляти переналагодження виробництва на випуск нової продукції, а транспортні роботи завдяки зору забезпечують надійну орієнтацію в просторі. Експертні системи, що спираються на бази даних, що включають зображення, для пошуку і розпізнавання заданих об'єктів вимагають швидкого і надійного аналізу оцифрованої відеоінформації в спеціалізованих архівах зображень або в базах Інтернет.

Найбільш поширені пакети растрової і векторної графіки (Adobe Illustrator, PhotoShop, CorelDraw, CorelPhotoPaint, 3D Studio Max, Maya і ін.) Мають потужні засоби створення зображень, в тому числі об'ємних і динамічних, однак, обробка обмежується фактично придушенням випадкових перешкод і Муар з допомогою обмеженого набору фільтрів (типу згладжують і медіанний). Значного прогресу досягла обробка документів зі сканера. Остання версія FineReader 13.0 вже дозволяє виробляти автоматичну сегментацію сторінок документа, тобто виділення блоків тексту, таблиць, картинок і графіків, підписів під рисунками. Підвищено також надійність розпізнавання тексту за рахунок застосування вдосконаленого алгоритму, заснованого на структурно-диференціальному контурним підході. Завдяки цьому з'явилася можливість розуміти тексти на 176 мовах народів світу і основних мовах програмування.

Таким чином, успіхи по розпізнаванню букв і цифр у документах і текстах вражають, також як і інші значні досягнення з аналізу зображень спеціального виду (наприклад, розпізнавання треків ядерних частинок, ідентифікація автомобілів-порушників за фотознімками, аналіз і розпізнавання сигналів в медицині і геології) . Однак, універсальних методів обробки зображень, які можна порівняти за ефективністю з інтелектуальними можливостями людини, ще не знайдено, що стимулює активну діяльність вчених в цьому напрямку.

Досить довгий час завдання розпізнавання графічних образів розглядалася людиною з боку біологічного і психологічного аспектів. При цьому вивчення піддавалися лише якісні характеристики, які не дозволяли точно описати механізм функціонування. Отримання функціональних залежностей було, як правило, пов'язане з дослідженням рецепторів органів слуху, дотику або зору. Однак принципи формування рішення залишалися загадкою. Вважається, що основним помилкою на зорі дослідження була думка про те, що мозок функціонує за певними алгоритмами, а отже, з'ясувавши цю систему правил, можна її відтворити за допомогою обчислювальних і технічних засобів.

Сьогодні є безперечним значний науковий та практичний інтерес до обчислювальних структур нового типу — штучних нейронних мереж. Він спричинений низкою успішних застосувань цієї нової технології, яка дозволила розробити ефективні підходи до вирішення проблем, що вважалися складними для реалізації на традиційних комп'ютерах. На назву “нейронні мережі” зараз претендують усі обчислювальні структури, які в тій чи іншій мірі моделюють роботу мозку. Але таке моделювання, здебільшого, є дуже фрагментарним, і говорити про створення у найближчому майбутньому штучного мозку або навіть деякої його моделі, яка дублювала б роботу мозку найпримітивніших живих створінь, ще зарано. Такий висновок випливає з надзвичайної складності цього загадкового витвору природи.

Створення пристроїв, що виконують функції розпізнавання різних об'єктів, в більшості випадків забезпечує можливість заміни людину спеціалізованим автоматом. Завдяки цьому, значно розширюються можливості складних систем, що виконують різні інформаційні, логічні, аналітичні завдання [1-2].

Розпізнавання образів (об'єктів) - задача ідентифікації об'єкта або визначення будь-яких його властивостей по його зображенню (оптичне розпізнавання) або аудіозаписи (акустичне розпізнавання) та інші характеристики.

Образ - класифікаційне угруповання в системі класифікації, яка об'єднує (виділяє) певну групу об'єктів за певною ознакою. Образи мають характерні властивості, які виявляються в тому, що ознайомлення з кінцевим числом явищ 11 з одного і того ж безлічі дає можливість дізнаватися як завгодно велике число його представників. Методика віднесення елемента до якого-небудь образу називається вирішальним правилом.

Ще одне важливе поняття - метрика - спосіб визначення відстані між елементами універсальної множини. Чим менший цей період, тим більш схожими є об'єкти (символи, звуки та ін.) нате, що ми розпізнаємо. Зазвичай елементи задаються у вигляді набору чисел, а метрика - у вигляді функції. Від вибору уявлення образів і реалізації метрики залежить ефективність програми, один алгоритм розпізнавання з різними метриками буде помилятися з різною частотою.

Останнім часом в рамках теорії структурного розпізнавання образів були розроблені нові алгоритми відновлення просторової конфігурації об'єктів по стереопару знімків. Ці алгоритми дозволяли відновлювати поверхню у вигляді цільної безперервної поверхні як результату одночасної обробки всіх рядків на зображеннях. Відновлення рельєфу в кожному пікселі зображенні накладає обмеження як на рельєф в сусідніх по горизонталі пікселів, так і на рельєф в сусідніх по вертикалі пікселів.

1.2 Фотограмметрія

В даний час, методи отримання тривимірних моделей і векторних обмірних креслень історичних і архітектурних пам'яток забезпечують високу достовірність і точність одержуваних результатів, але є досить трудомісткими і дорогими присвячена велика кількість робіт. Тому проблема зниження трудомісткості і вартості робіт зі створення архітектурних обмірних креслень і 3D-моделей історичних і архітектурних комплексів

можна, якщо для їх створення використовувати знімки, отримані в результаті виконання планово-перспективної аерофотозйомки досліджуваних об'єктів.

У той час як більшість досліджень зосереджуються на геометриці багатовидового вигляду, наприклад, SFM та SLAM, в ідеалі, слід очікувати, що 3D може бути реконструйований із великої кількості зображень, що переглядаються одноразово.

Свій початок фотограмметрія бере, безумовно, з появи фотографії і майже відразу ж стереофотографії. Зародження фотограмметрії зв'язується з відкриттям фотографії в 1839 році винаходом паризького художника Луї Жака Манді Дагера способу отримання зображення на шарі галоїдного срібла.

На можливість застосування таких фотознімків для цілей топографії в 1852 році першим вказав французький військовий інженер Еме Лосседа, який сконструював спеціальний прилад для отримання фотознімків (прообраз фототеодоліта) і розробив прийоми складання планів по наземним фотознімками. Відсутність ефективних технічних засобів отримання фотознімків і недосконалість застосовуваної в той час технології отримання світлочутливих шарів не сприяли розвитку цієї науки.

Загалом, поле, як передбачити геометрію в кінці мода - цілий край. Зокрема, наш вихід, встановлений у 3D-точці, досі не є типовим об'єктом у спільноті глибокого навчання. Набір точок містить замовлені зразки з простору метричних вимірювань. Тому визначаються еквівалентні класи до перестановки; крім того, слід враховувати відстань до землі. Наскільки нам відомо, ми не усвідомлюємо попередніх систем глибокого навчання, здатних передбачати такі об'єкти.

Розвиток техніки, літальних апаратів, оптики привело до величезного розвитку фотограмметрії і використання її в картографуванні. Значні успіхи в розвитку наук і нових галузей: радіоелектроніки, автоматичних систем управління, математичного апарату і обчислювальної техніки, фізичних відкритті і приладобудування, космічної геодезії та картографії,

комп'ютерних технологій інформаційних систем сприяли сучасному рівню і станом фотограмметрії зараз. Виникають способи аерофотограмметричних, морських, космічних зйомок з різними методами отримання інформації про поверхні земної та водної поверхні [4].

Вимірювання по світловим записів це, мабуть, найкоротший і точне визначення фотограмметрії, що відбувається з грецького перекладу цього складного слова. Більш детальне академічне пояснення можна сформулювати в наступному вигляді. Наука, що дозволяє за допомогою фотографування, способів обробки знімків і спеціальних технологій отримувати зображення і визначати по ним просторове положення фізичних об'єктів на місцевості і їх характеристики має назву фотограмметрія. Крім цього фотограмметрію можна вважати новою технологією дистанційного зондування при визначенні геометричних властивостей предметів, процесів, їх аналізу та надання в графічному вигляді відомостей по групі фотознімків, знятих з різних положень фотокамери.

Основою методу фотограмметрії є фотознімки. Вивчення і вимірювання геометрії фізичного зображення знімків надає цій основі рівень наукового підходу та практичного застосування.

Рисунок 1.1 – Етапи фоторгаметрії

Використання для вивчення об'єктів і їх кількісних характеристик і властивостей одиночних фотознімків є фотограмметричних способом. Застосування для цього двох знімків вже вважається стереофотограмметрію методом.

Основними завданнями такої науково-технічної дисципліни, як фотограмметрія вважаються:

– вивчення геометричних властивостей, зображених на фотографічних знімках, всіляких об'єктів місцевості, що знімається поверхні;

– розтин всіляких аналітичних зв'язків між точками місцевості і знімків;

– встановлення розбіжностей зв'язків і виключення їх причин; встановлення розбіжностей зв'язків і виключення їх причин;

– підготовка і реалізація, розроблених фотограмметричних технологій по перетворенням зображень;

– отримання планових і картографічних відображень і картини місцевості;

– постійний моніторинг, регулярні спостереження і оновлення яких завгодно змін ситуації на поверхні місцевості;

– отримання різнохарактерної оперативної інформації.

В останні роки фотограмметрія знайшла своє місце в сучасній кіноіндустрії, об'ємне зображення фільмів по так званій 3D технології отримало особливу популярність у молоді. Головний метод мультиплікації з її самого початку розвитку завжди заворожував своїми кінцевими результатами у вигляді популярних мультиплікаційних фільмів.

Особливо слід відзначити застосування технологічного процесу фотограмметрії в розробці сучасних комп'ютерних ігор. Він полягає в покроковому якісному фотоскану і отриманні за допомогою спеціальних програм об'ємної геометрії від численних фотозображень різних ракурсів.

В Україні діють Київська, львівська, донецька школи фотограмметристів, які успішно розв'язують велику Кількість наукових и практичних завдань для непотребу різних галузь та проводять и підготовку спеціалістів.

1.3 Класифікація фотограмметрії

При класифікації всередині фотограмметрії можна виділити 2 основні частини:

- загальна;
- прикладна.

Прикладна фотограмметрія, базуючись на досягненнях загальної фотограмметрії, розробляє методи, технології, засоби стосовно вирішення конкретних завдань різних галузей науки і техніки.

Геодезична фотограмметрія займається завданнями геодезії за визначенням форми і розміру Землі, планет і інших космічних об'єктів, а так само при створенні сете опорних геодезичних точок.

Топографічна фотограмметрія розглядає питання застосування фотограмметрії для цілей картування при створенні загальнодержавних топографічних карт масштабом 1: 100000 і крупніше.

Застосування фотограмметрії при дослідженні природних ресурсів вирішують завдання створення топографічних основ різноманітних масштабів.

Координуючи явища різних об'єктів дешифрування застосовується при наступних явищах:

- загально-географічних;
- геологічних;
- геофізичних;
- гідрологічних;
- гідрогеологічних;
- ландшафтних;
- болотоведческіх.

Певну роль займає фотограмметрія в гірничій справі, тобто для вирішення маркшейдерських завдань: підрахунок обсягу вийнятих робіт,

вивчення стійкості оголених порід при відкритих і підземних розробках родовищ, оцінка результатів вибухових робіт на кар'єрах.

Науково-технічна (спеціальна) фотограмметрія розглядає питання застосування фотограмметрії для вирішення науково-технічних завдань у фізиці, медицині, механіці, балістики, приладобудуванні, археології, криміналістиці, архітектурі.

В останні роки фотограмметрія знайшла своє місце в сучасній кіноіндустрії, об'ємне зображення фільмів по так званій 3D технології отримало особливу популярність у молоді. Головний метод мультиплікації з її самого початку розвитку завжди заворожував своїми кінцевими результатами у вигляді популярних мультиплікаційних фільмів.

Особливо слід відзначити застосування технологічного процесу фотограмметрії в розробці сучасних комп'ютерних ігор. Він полягає в покроковому якісному фотосканів і отриманні за допомогою спеціальних програм об'ємної геометрії від численних фотозображень різних ракурсів.

Фотограмметричні методи мають ряд переваг перед геодезичними:

– отримання більш точних результатів при зйомці рухомих об'єктів;

– фіксація просторового положення ряду точок в один фізичний момент при зйомці в умовах діючих підприємств;

– при зйомці в розширеній області спектра електро магнітного випромінювання (від рентгенівських променів до радіохвиль).

Розрізняють дві форми запису зображення: аналогову і цифрову. Цифрова форма записи дуже зручна для зберігання та обробки великих масивів зображень, володіє великою оперативністю, тому що на відміну від аналогового запису не потрібно фотохимическая обробка фотоплівки, відсутні процеси, пов'язані з виготовленням діапозитивів, за якими проводять фотограмметричні вимірювання. Зйомка і обробка зображень може проходити майже одночасно. За принципами побудови зображення знімальні системи діляться на кадрові та сканерне.

До кадрових систем відносяться фотокамери, у яких всі крапки кадру фіксуються в один момент часу (в момент відкриття затвора) на площині в центральній, перспективної проекції, що забезпечує сувору геометрію побудови зображення.

Принцип роботи сканерна знімальних систем полягає в тому, що реєстрація світлового потоку, що йде від об'єкта, виробляється або через підрядник, або поточечно. Якщо реєстрація виконується через підрядник, то в один момент часу фіксуються всі точки, складові рядок кадру. Положення всіх точок в рядку будуть отримані з одного центру проекції і будуть відповідати центральному проектування.

1.4 Об’єкти 3D моделювання

В якості основи для створення 3D-моделі можуть бути використані:

- фотографії;
- креслення;
- 3D-сканер (результати 3D-сканування);
- реальний об'єкт (3D-модель створена за хмари точок);
- усний опис необхідного об'єкта;
- малюнок (або малюнок) об'єкта від руки.

Креслення виступають в якості шаблонних зображень. Для того щоб створити 3D-модель за кресленнями необхідно мати три креслення об'єкту - спереду, зверху і збоку, а в ідеалі ще й ззаду.

3D моделювання по фотографії називається фотограмметрії. Нагадаємо, що існує безліч "аматорських" програм, що створюють 3D-моделі по фотографії, але, в більшості випадків, такі програми будують псевдотривимірне зображення.

Якісну 3D-модель можна побудувати лише в професійною програмою для роботи з тривимірною графікою. При цьому, як і в разі с 3D-

моделюванням за кресленнями, нам необхідно мати зображення, як мінімум трьох граней об'єкта: вид зверху, збоку і спереду.

Сучасні 3D-сканери дозволяють провести 3D сканування об'єкта будь-якого розміру і форми. Лазерні 3D сканери, на основі отриманих даних, самі будують 3D-модель об'єкта. А, в подальшому, отримане тривимірне зображення клопітливо опацьовивує 3D-дизайнер.

Такий спосіб 3D-моделювання є одним з найбільш економічно вигідних, адже тимчасові і технічні витрати на створення 3D-моделі в такому разі -Мінімальна. Такий спосіб можна використовувати як для создания 3D-моделі невеликого об'єкта (наприклад, створення дизайну пляшки), так і для трьох вимірного моделювання більших об'єктів (наприклад, архітектурне 3D-моделювання).

Найчастіше даний спосіб 3D моделювання застосовується в разі відсутності 3D-сканера і неможливості зробити якісну фотографію об'єкта. Сам об'єкт, в даному випадку, повинен бути невеликим за розміром і транспортабельним, адже інженеру доведеться працювати безпосередньо з об'єктом - переміщати і рухати його, а при необхідності і розбирати об'єкт на окремі частини.

1.5 Основні відомості нейромереж

Успішний розвиток теорії нейронних мереж за останнє десятиліття дозволив реалізувати ряд таких глобальних властивостей. Найвідомішими з них є навчання, узагальнення та абстрагування [3].

Розвиток штучних нейронних мереж надихається біологією. Структура штучних нейронних мереж була змодельована як результат вивчення людського мозку. Штучні нейронні мережі надзвичайно різноманітні за своїми формами, функціональності і цільовим призначенням. Розглядаючи мережеві конфігурації і алгоритми, дослідники мислять їх в термінах

організації мозкової діяльності, але на цьому аналогія може і закінчитися. Подібність між ними дуже незначно, однак, навіть ця скромна емуляція мозку дає відчутні результати.

Властивість навчання проявляється у здатності нейронної мережі змінювати свою поведінку в залежності від стану навколишнього середовища. Завдяки саме цій властивості нейронні мережі привертають до себе значну увагу. Існує велике розмаїття алгоритмів навчання нейронних мереж, кожен з яких має свої сильні та слабкі сторони, але сьогодні ще не сформовано єдиної думки про те, чому можна навчити нейронну мережу і як таке навчання має проводитись. Таку зовнішню коригування в навчанні прийнято називати "заохоченнями" і "покараннями". Механізм генерації цієї коригування практично повністю визначає алгоритм навчання. Самонавчання відрізняється від навчання тим, що тут додаткова інформація про вірність реакції системі не повідомляється.

Властивість узагальнення дає можливість нейронній мережі знижувати чутливість до незначних флуктуацій вхідних сигналів. Ця властивість дуже важлива для об’єктів, які існують у реальному середовищі. Особливістю нейромережного підходу в даному випадку є те, що узагальнення — це результат властивостей структури, а не роботи спеціальної програми на традиційному комп’ютері.

Властивість абстрагування дозволяє створювати на нейронній мережі нову сутність, виходячи з аналізу вхідної інформації. Особливо ця властивість проявляється для задач розпізнавання образів. Завдяки їй нейромережа може створювати деякий ідеальний образ, керуючись вхідною інформацією, яка має деякі властивості цього образу.

Впровадження сучасних комп'ютерних технологій в різні галузі науки і техніки все частіше змушує звертатися до питань аналізу, обробки і моделювання зображень. Існує цілий ряд систем з аналізу тривимірних зображень і структур. Машинне зір є частиною інформаційних технологій, безпосередньо пов'язаної з обчислювальною технікою, промисловістю,

оптикою і машинобудуванням. Зазвичай, системи машинного зору запрограмовані під виконання вузькоспеціалізованих завдань, спочатку встановлених замовником.

1.6 Постановка задачі дослідження

У цій атестаційній роботі ми просуваємо напрямок реконструкції одного зображення та пропонуємо алгоритм для отримання трикутної сітки 3D з одного кольорового зображення. Замість того, щоб безпосередньо синтезувати, наша модель вчиться деформувати сітку від середньої форми до цільової геометрії. Це корисно для нас з кількох аспектів. Глибока мережа краще прогнозувати залишкові, наприклад просторова деформація, а не структурований вихід, наприклад графік.

Оскільки, як правило, неможливо створити функцію, яка говорить про те, чи так це, дискримінаційна мережа навчається робити оцінку, і оскільки мережі є диференційованими, ми також отримуємо градієнт, який ми можемо використовувати для спрямування обох мереж у потрібне русло. Зазвичай генератор представляє основний інтерес - дискримінатор - це адаптивна функція втрат, яка відкидається після навчання генератора.

Наше завдання побудувати умовну генеративну мережу для точкових множин. Подання 3D форми з єдиної точки зору - це основна функція зору людини, але надзвичайно складна для комп'ютерного зору. Останнім часом досягнуто великого успіху для створення 3D форми з одноколірного зображення з використанням методів глибокого навчання.

2 ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ 3D МОДЕЛЕЙ

2.1 Відомі підходи

Генерація 3D-даних глибокою нейронною мережею привертає все більшу увагу в дослідницькій спільноті. Більшість існуючих творів вдаються до регулярних уявлень, таких як об'ємні сітки або колекція зображень; однак ці уявлення затьмарюють природну інваріантність фігур 3D під геометричними перетвореннями, а також страждають від ряду інших питань. У цій роботі ми розглядаємо проблему 3D-реконструкції з одного зображення, генеруючи прямолінійну форму координат хмарних даних.

Поряд з цією проблемою виникає унікальне і цікаве питання, що форма основної істини для вхідного зображення може бути неоднозначною. Керуючись цією неортодоксальною формою випуску та притаманною неоднозначністю наземної правди, ми розробляємо архітектуру, функцію втрати та парадигму навчання, які є новими та ефективними. Наше остаточне рішення - це пробовідбірник умовної форми, здатний передбачити декілька правдоподібних 3D-хмарних точок із вхідного зображення. В експериментах не тільки наша система може перевершити найсучасніші методи на 3D-зображенні на основі одного зображення

показники реконструкції; але він також демонструє високу ефективність для завершення 3D форми та перспективну здатність робити багато правдоподібних прогнозів.

Для вирішення завдання реконструкції одного зображення, або фотограмметрії за допомогою побудови об'ємних моделей, можуть бути використані стерео камери. Даний спосіб дозволяє проаналізувати вхідні дані про об'єкт по більшій кількості параметрів в результаті стерео реконструкцій і побудови 3D моделі, що позитивно позначається на якості розпізнавання об'єктів.

Використання стерео камер дозволяє знизити загрози, пов'язані з помилковими вхідними даними. Також, в даному випадку, освітлення, що грає величезну роль в разі ідентифікації осіб по одній камері, вносить набагато меншу похибка в кінцевий результат. У випадку з однією камерою, рівень освітленості ділянок на обличчі людини є функцією геометрії особи, властивостями камери і джерела світла. У зв'язку з цим, створити модель особи, в рівній мірі враховує всі ці фактори, досить складно.

У розпізнаванні за двома і більше камерам, стерео зору, рівень яскравості джерела світла впливає лише на текстуру особи, в той час як реконструкція поверхні зберігає всі необхідні властивості. Ще однією проблемою при роботі з 2D розпізнаванням є різке зниження якості при найменшому горизонтальному зміщенні голови щодо об'єктива камери. У стерео распознаванії дана проблема компенсується наявністю, мінімум, двох камер в горизонтальній площині, що дозволяє бачити об'єкт з різного кута, і в подальшому дозволить створити об'ємну модель об'єкта, що цікавить.

Часопролітної лазерний 3D-сканер - це активний сканер, який використовує лазерний промінь, щоб досліджувати об'єкт. В основі цього типу сканера лежить времяпролётний лазерний далекомір. У свою чергу, лазерний далекомір визначає відстань до поверхні об'єкта, виходячи з часу прольоту лазера туди і назад.

Тріангуляційні лазерні 3D-сканери також відносяться до активних сканерів, які використовують лазерний промінь для того, щоб прозондувати об'єкт. Подібно времяпролётним 3D-сканерів тріангуляційні пристрої посилають на об'єкт сканування лазер, а окрема камера фіксує розташування точки, куди потрапив лазер.

Як времяпролётние, так і тріангуляційні сканери володіють своїми сильними і слабкими сторонами, що визначає їх вибір для кожної конкретної ситуації. Перевага времяпролётних пристроїв в тому, що вони оптимально підходять для роботи на дуже великих відстанях аж до декількох кілометрів. Вони ідеальні для сканування будівель або географічних об'єктів. У той же

час, до їх недоліків можна віднести точність вимірювань. Адже швидкість світла досить висока, тому при підрахунку часу, яке потрібно променю, щоб подолати відстань до і від об'єкту, можливі деякі огріхи (до 1 мм). А це робить результати сканування приблизними.

Що ж стосується тріангуляційних далекомірів, то у них ситуація з точністю до навпаки. Діапазон їх дії становить лише кілька метрів, а ось точність відносно висока. Такі пристрої можуть виміряти відстань з точністю до десятків мікрометрів.

Негативно на точність роботи времяпролётних сканерів впливає дослідження краю об'єкта. Лазерний імпульс посилається один, а відбивається відразу з двох місць. Координати розраховуються, виходячи з позиції самого сканера, при цьому береться середнє значення двох відображень променю лазера. Це призводить до того, що точка буде визначена в неправильному місці.

При використанні сканерів з високою роздільною здатністю шанси на те, що лазерний промінь потрапить точно на край об'єкта зростають, але при цьому за краєм з'явиться шум, що негативно відіб'ється на результатах сканування. Сканери з невеликим променем можуть вирішити проблему сканування краю, але у них обмежений діапазон дії, тому ширина променю перевищить відстань. Існує також спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє сканеру сприймати тільки перше відображення променю, ігноруючи при цьому друге.

Методи створення тривимірної моделі будь-якого об'єкта різноманітні. З розвитком нових технологій постійно з'являються нові методи, незважаючи на те, що тривимірна графіка - досить молода технологія і ступінь вивченості даної технології в науковій літературі не дуже висока.

Нові технології і методики з'являються занадто швидко, і не вистачає часу на їх доскональне вивчення. Поки вивчається одна технологія, на наступний день з'являється інша, яка перевертає все уявлення про старою технологією і доводиться знову вивчати все заново. Тому в сфері тривимірної

графіки дуже важливо вибрати оптимальний спосіб для створення моделі будь-якого об'єкта в залежності від переслідуваної мети і очікуваного результату.

2.2 Стереоскопічне спостереження

Фотограмметрична обробка знімків - вимір і дешифрування - поки неможлива без використання зору людини. Навіть в майбутньому, коли можливо буде вирішена задача автоматичної обробки знімків, за людиною залишаться контрольні операції за роботою приладів. У зв'язку з цим коротко зупинимося на особливостях зору людини, який може спостерігати предмети монокулярна і бінокулярна.

Монокулярний зір - спостереження об'єктів одним оком. Зображення об'єкта будується на сітківці в перспективній, центральної проекції за допомогою кришталика, що забезпечує різкість зображення шляхом зміни своєї кривизни, що називається акомодацією.

Головною умовою отримання стереоефекту за фотознімками є роздільне їх спостереження, при якому кожне око бачить один з двох знімків. Ця умова можна виконати, спостерігаючи і неозброєними очима. Але при такому спостереженні виникає невідповідність між конвергенцією очей і акомодацією, так як відстань від очей до знімків невелика, а зорові осі очей встановлюються майже паралельно один одному, що ускладнює отримання стереоефекту і викликає швидке стомлення.

2.2.1 Оптичний метод

Оптичний метод заснований на розгляданні знімків через оптичні системи. Простий оптичною системою є дзеркально-лінзовий стереоскоп,

який можна використовувати і при обробці знімків на комп'ютері. В цьому випадку стереоскоп встановлюють перед екраном, на який одночасно виводять обидва знімки: лівий знімок - на ліву половину екрану, а правий знімок - на праву половину.

2.2.2 Анагліфічних спосіб

Щоб полегшити стереоскопічне спостереження знімків, використовують оптичні бінокулярні спостережні системи або застосовують Анагліфічних, поляроїдів або растровий способи.

Анагліфічних спосіб отримання стереоефекту за фотознімками заснований на використанні кольорових світлофільтрів, що дозволяють спостерігати роздільно два кольорових зображення. Сутність цього способу полягає в тому, що два зображення отримують у двох взаємно додаткових кольорах (одне зображення фарбують у синій колір, інше - у червоний. Причому їх накладають одне на інше, а потім спостерігають через окуляри з кольоровими світлофільтрами, так що одне око дивиться через синій світлофільтр, інший - через червоний. Так як кожен світлофільтр пропускає світлові промені тільки свого кольору, то кожен очей спостерігача бачить лише одне з двох зображень, а при їх злитті виникає уявна стерео модель в сіро-білих тонах.

Недоліки способу:

– наявність окулярів;

– втрата світла в поляроїда становить 50%;

– при відображенні від екрану може відбуватися часткова деполяризація, що погіршує стереозображення.

Анагліфічних спосіб стереоскопічного спостереження фотознімків застосовується, наприклад, на стереофотограмметричних приладі - мультиплексі. А також при перегляді стерео кінокартин. Його можна

використовувати при обробці знімків на комп'ютері, але для цього потрібен спеціальний монітор.

2.2.3 Полароїдний спосіб

У полароїдним способу, запропонованого Ж. Андертоном в 1891 р., принцип отримання стереозображення такий же, як і у анагліфічного способу, тільки використовують полароїдні світлофільтри з кутом поляризації між ними, рівним 90 градусом. Спосіб дозволяє розглядати чорно-білі і кольорові знімки.

У різних оптичних системах поперечне збільшення дещо змінюється в міру віддалення від оптичної осі, що призводить до аберації точок зображення, званої дісторсией. В результаті дисторсии прямі на краях поля зору зображуються кривими. Дисторсію зі зростаючим від оптичної осі збільшенням називають подушкообразной, а з убутним – бочкообразной.

Стереоскопічне спостереження і вимір пари знімків дає можливість отримати результати з більшою вірогідністю і більш високою точністю, ніж при монокулярном спостереженні і вимірі кожного знімка стереопари окремо. Це пояснюється тим, що гострота стереоскопічного зору в півтора-два рази вище.

2.3 Методи обробки зображення

В області прикладної фотограмметрії актуальним завданням є розробка технологій, що дозволяють оперативна і з необхідною точністю отримувати цікаві замовнику відомості про об'єкти, процеси, явища. Аналіз стану знімальної техніки і фотограмметричних методів обробки знімків дозволяє

зробити висновок, що подібні технології повинні ґрунтуватися на використанні мало-і середньо неметричних камер.

Такі камери мають ряд переваг:

- загальнодоступність;
- порівняно низька вартість;
- мала маса;
- простота в управлінні;
- наявність допоміжного обладнання та змінних об'єктивів;
- хороша роздільна здатність і широкий діапазон фокусування.

По ряду характеристик до класу неметричних можна віднести і широко поширені останнім часом різні цифрові фото- і відеокамери, які, швидко вдосконалюючись, тіснять традиційну фотоапаратуру. Відмінною особливістю таких камер є можливість отримання фотографічної інформації відразу в цифровому вигляді з подальшою фотограмметричної обробкою її на персональній ЕОМ.

Але незважаючи на всі ці переваги, Неметричні камери практично не використовуються там, де вимоги до точності визначення геометричних характеристик об'єкта досить високі (наприклад, при дослідженні конструкцій і визначенні деформацій споруд, вивченні скульптур і пам'ятників архітектури, випробуванні на моделях і ін). У цих випадках фотографування об'єкта з близьких отстояния і класичні методи фотограмметрії не вирішують проблеми. Виникає необхідність розробки спеціальних прийомів і методів обробки, які враховують особливості неметричних знімків. В ході фотограмметричної обробки знімків виникає необхідність різного роду їх перетворень, пов'язаних як з поліпшенням читання, так і зі зміною розмірів зображення (наприклад, при зменшенні або збільшенні знімків в процесі їх обробки).

Методи розпізнавання графічних образів можна розділити на три групи:

- попередня фільтрація і підготовка зображення;

– логічна обробка результатів фільтрації;

– алгоритми прийняття рішень на основі логічної обробки.

Межі між групами умовні. Для вирішення завдання далеко не завжди потрібно застосовувати методи з усіх груп, буває достатньо двох, а іноді навіть одного.

Фільтрація. До цієї групи відносяться методи, які дозволяють виділити на зображеннях області, без їх аналізу. Велика частина цих методів застосовує єдине перетворення на всі точки зображення. На рівні фільтрації аналіз зображення не проводиться, але точки, які проходять фільтрацію, можна розглядати як області з особливими характеристиками.

Саме простіше перетворення - це бінаризація зображення по порогу. Для RGB зображення і зображення в градаціях сірого порогом є значення кольору. Зустрічаються ідеальні завдання, в яких такого перетворення досить. Припустимо, потрібно автоматично виділити предмети на білому аркуші паперу: вибір порога, за яким відбувається бінаризація, багато в чому визначає процес самої бінаризація. В даному випадку, зображення було бінаризованими за середнім кольором. Зазвичай бінаризація здійснюється за допомогою алгоритму, який адоптивно вибирає поріг.

Методи нормалізації при розпізнаванні займають проміжне місце між сигнальними кореляційними і однаковими алгоритмами. На відміну від прізнакових при нормалізації зображення не "втрачається", а тільки заміщається зображенням того ж класу еквівалентності. У той же час, на відміну від кореляційних методів, безліч вхідних зображень замінюється безліччю нормалізованих зображень. Кожне нормалізоване зображення, в загальному випадку, знаходиться набагато ближче до свого ідеалу (з позиції групових перетворень), що значно скорочує кількість кореляцій на завершальному етапі розпізнавання. Суть нормалізації полягає в автоматичному обчисленні невідомих параметрів перетворень, яким піддані вхідні зображення, і подальшому приведенні їх до еталонного вигляду.

Процедура перетворень проводиться за допомогою операторів нормалізації (нормализаторов), а обчислення параметрів виконується функціоналами, діючими на безлічі зображень. У монографії [3] детально викладаються паралельні і послідовні, параметричні і стежать нормалі затори, які знайшли ефективне застосування для базових перетворень: зсувів, поворотів, розтягнень, косих зрушень і деяких їх комбінацій.

Тоді будь-яку систему усунення систематичних спотворень і переходу до системи координат, заснованої на положенні головною точки, можна представити у вигляді деякої послідовності перерахованих функцій. Кожна з цих функцій у відповідності зі своїми параметрами здійснює перетворення результатів, отриманих від попередньої функції. Причому параметри перетворень не залежать від інших функцій та їх параметрів.

Виняток з цього правила становлять перетворення між різними видами систем координат цифрового зображення (вони природним чином залежать від вихідної системи координат цифрового зображення) і перенесення системи координат в задану точку, так як положення точки може бути задано нема на попередньому етапі перетворення, а на якомусь чи іншому (в інший, реформованій системі координат).

Розглянемо кілька варіантів обробки вимірювань на цифрових знімках.

Варіант 1 (Програми MonoSDS, «Калибратор»):

– початок система координат цифрового зображення - лівий нижній кут, вісь x - вправо, вісь y - вгору, прив'язка до краю пікселя;

– у разі переходу до системи координат, заснованої на центрі радіальних спотворень;

– потім виконується корекція вимірювань з урахуванням дисторсии;

– потім здійснюється перехід до системи координат знімка, заснованої на положенні головною точки.

Переходу до міліметрів не здійснюється, отже, фокусна відстань визначається в пікселя.

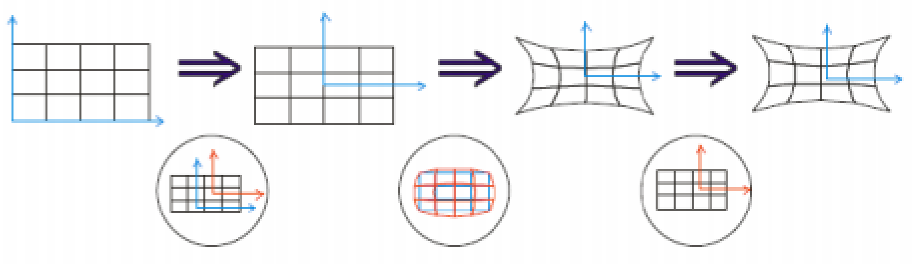

Рисунок 2.1 – Схема обробки даних в Calibrator

Варіант 2 (Photomod) :

– початок системи координат цифрового зображення - лівий нижній кут, вісь x - вправо, вісь y - вгору, прив'язка до центру пікселя;

– здійснюється перехід до міліметрів шляхом множення на константу;

– здійснюється перехід до системи координат знімка, заснованої на положенні головною точки;

– виконується облік дисторсии.

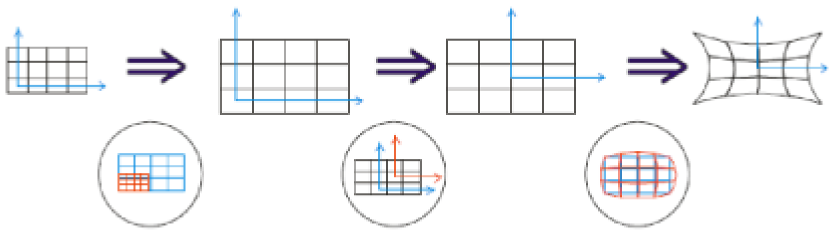

Рисунок 2.2 – Схема обробки даних в Photomod

2.4 Карта глибини

Одна з важливих завдань стерео зору - процес перетворення двох плоских зображень в тривимірну сцену з відновленням інформації про глибину кожної точки плоского зображення (відстані від стерео зору до відповідної точки реальної сцени).

Знаючи інформацію про глибину (функція двох змінних) можна генерувати 3D моделі ландшафту та інших природних об'єктів для використання в різних додатках, таких як віртуальна реальність, симуляція

польоту, робототехніка. Зокрема, знання про віддаленість точок зображення від реального прообразу дозволяє робити захоплення опорних точок рухомого об'єкту для отримання тривимірних координат, що важливо в індустрії спецефектів, кіно і телебаченні. Захоплення координат опорних точок дозволяє будувати унікальні безконтактні людино-машинні інтерфейси, управління в яких здійснюється рухами пальців рук або взагалі жестів в просторі на деякій відстані від стерео камери.

На даний момент відомі активні і пасивні методи відновлення інформації про глибину реальної сцени. Активні методи використовують ультразвукові перетворювачі або лазерне освітлення робочого простору, що дають на виході швидку і точну інформацію про глибину [2, 6]. Однак у цих методів є обмеження по відношенню до діапазону вимірювань і вартості апаратних компонентів.

Пасивні методи, засновані на комп'ютерному зорі, зазвичай реалізуються більш простими і недорогими сенсорами, що визначають відстань. Такі методи здатні генерувати інформацію про глибину за отриманою парі зображень і параметрами двох камер [1, 7].

Одна з фундаментальних проблем стерео зору полягає у встановленні точної відповідності між лівим і правим зображенням стереопари. Під відповідністю розуміється відстань (диспаритет) між пікселями одного і того ж об'єкта на лівому і правому зображенні. Існуючі локальні методи по обчисленню карти диспаритету засновані на принципі «ковзного вікна» [8]. Вони характеризуються певною збалансованістю швидкості-якості, добре масштабуються і реалізуються на таких паралельних архітектурах, як відеокарти.

Для вирішення цього основного рівняння для значень глибини були розроблені різні обмеження та спрощення для зниження ступеня свободи рівняння, що призводить до різних алгоритмів оцінки глибини, кожен з яких підходить для вирішення задачі в певній області. Деякі з них чітко обчислюють поле руху перед тим, як відновити інформацію про глибину;

інші оцінюють 3D-структуру безпосередньо з полем руху, інтегрованим у процесі оцінки. Варто зазначити, що достатньо невеликий середній просторовий розбіжність відповідних точок у послідовних кадрах сприятливий для стабільності та надійності тривимірної реконструкції від інтеграції часу довгих послідовностей кадрів. З іншого боку, коли середня невідповідність кадрів велика, реконструкцію глибини можна виконати таким чином, як бінокулярна невідповідність. Поле руху стає рівним карті стерео нерівномірності лише в тому випадку, якщо просторові та часові відхилення між кадрами досить малі.

2.5 Елементи внутрішнього орієнтування

Орієнтація знімка в просторі в момент фотографування визначають елементи зовнішнього орієнтування. Під поняттям знімок треба мати на увазі зв'язку проектують променів, відновлену на етапі внутрішнього орієнтування, коли були задані елементи внутрішнього орієнтування знімка.

Збереження головних зв'язків, виражених загальними рівняннями можливо, якщо виправити помилкові елементи моделі або включити додаткові невідомі - параметри калібрування. Калібрування - встановлення залежності між показаннями вимірювального приладу і вимірюваної величиною. Принципово калібрування можна проводити при вирішенні всіх відомих задач: зворотній просторової зарубки, побудови одиночної моделі, маршрутної і блокової фотограмметричних мереж, трансформування одиночних і пари знімків (взаємне орієнтування). В якості опорних (твердих) даних при реалізації зв'язків можуть бути використані величини, розташовані в просторі об'єктів, кількісні характеристики яких визначені з необхідним ступенем точності.

До основних з них належать такі:

– координати точок об'єктного простору (місцевості);

– кути;
– відстані між точками;
– координати точок фотографування;
– різниці висот точок фотографування;
– похилі дальності;
– кути нахилу знімків і інші дані.

Таким чином, в основу всіх способів калібрування належить аналітичне рішення однієї з фотограмметричних задач, в яку включені додаткові невідомі - параметри калібрування. З цього основного положення випливає, що рішення задачі може здійснюватися спеціально для визначення параметрів калібрування або параметри калібрування можуть бути визначені і враховані в процесі вирішення практичного завдання фотограмметрії.

Аналіз помилок знімків показує, що систематичні спотворення центральної проекції всіх знімків, отриманих в одних і тих же умовах, практично однакові.

Загальний принцип підходу до вироблення конкретної технології має базуватися на максимальному використанні всіх наявних опорних даних, результатів лабораторних калибровок знімальної апаратури і виборі найнадійнішого в даних умовах способу калібрування. Калібрування реалізують по знімках виробничої зйомки (рішення виробничого завдання з одночасною калібруванням знімків) або для калібрування отримують 2-3 групи знімків з необхідними параметрами, але в тих же умовах, що і виробнича зйомка.

В останньому випадку завдання вирішують по кожній групі незалежно. Порівняння результатів, отриманих за різними групами, служить контролем якості калібрування. Середні значення цих результатів приймають за остаточні параметри калібрування. Ці значення використовують при вирішенні фотограмметричної завдання по знімках виробничої зйомки. Число зон або тип інтерполюючого полінома попередньо встановлюють на

підставі наявних даних, остаточно - дослідним шляхом в процесі калібрування.

Фотограмметричну завдання слід вирішувати за етапами. На першому етапі потрібно визначити невідомі, обчислювані найбільш надійно, на другому і наступних етапах - включати послідовно наступні по надійності визначення невідомі. У найпростішому випадку на першому етапі визначаються наближені значення елементів фотограмметричної завдання, а на другому етапі отримують остаточні значення елементів фотограмметричної завдання і параметри калібрування.

При виконанні фотограмметричних вимірів по зображеннях, отриманих цифровими камерами, виникає проблема переходу від внутрішньої системи координат знімка (пікселів) до системи координат, заснованої на положенні головною точки знімка.

Щоб пояснити сутність проблеми, покажемо послідовність переходу від однієї системи координат до іншої в традиційній аналогової фотограмметрії.

Вимірюємо координати точок знімка в системі координат приладу (стереокомпаратора). Ця система координат не є самостійною, що проявляється в зміні координат тієї ж точки на тому ж знімку при зміні положення знімка в снімкодержателе.

Перехід до системи координат знімка, яка визначається (як правило) за допомогою координатних міток приладу. Система координат знімка може здаватися двома способами: через відстань між мітками і координатами головною точки, або безпосередньо координатами координатних міток. Потім виконується перехід до системи координат знімка з урахуванням систематичних помилок (дісторсії).

Під поняттям «дісторсія» зазвичай маються на увазі геометричні викривлення об'єктів, спотворення ліній, що з'являються в процесі формування зображень.

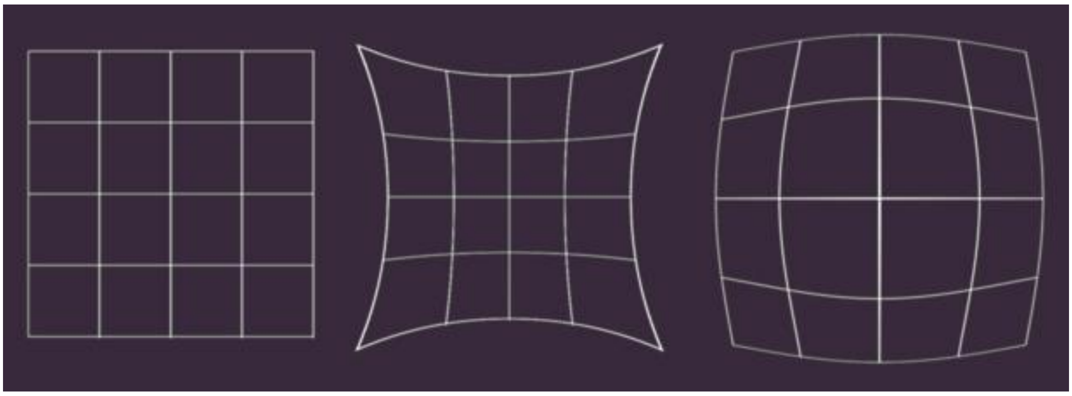

Рисунок 2.3 – Дісторсія зображень

Дісторсія може виникати з кількох причин. Однією з них є сходження паралельних ліній, коли фотоапарат знаходиться в похилому положенні або його нахиляє фотограф - найчастіше це спотворення виникає під час зйомки високих будівель з нижнього ракурсу. Крім того, дісторсія може виникнути і в разі використання дешевих об'єктивів сумнівної якості. Взагалі, дана особливість властива зум-об'єктивів, тобто, об'єктивам із змінною фокусною відстанню. А об'єктиви, у яких фокусна відстань є постійним, забезпечує бездоганно чітку композицію без жодних геометричних спотворень.

Дісторсія найбільш помітна коли в кадрі присутні прямі лінії по всій його площі. Наприклад, при зйомці архітектури ширококутним або понад-ширококутним об'єктивом вам неодмінно потрібно буде зайнятися корекцією дісторсії подушкообразной.

Обробка ж знімків, отриманих цифровими камерами, має кілька особливостей. По-перше, система координат приладу (цифрової камери, цифрового зображення) не є тимчасовою, вона цілком самостійна, і вимірювання можуть зберігатися і з використанням даної системи. По-друге, до цих пір немає загальноприйнятого стандарту щодо системи координат цифрового зображення. Відмінності виражаються в напрямку осі у (вгору або вниз), в положенні початку системи координат (лівий нижній, лівий верхній кути, центр знімка), в прив'язці початку системи координат до краю пікселя або його центру. Найбільш часто вживані варіанти систем координат цифрових знімків представлені на малюнку 2.2.

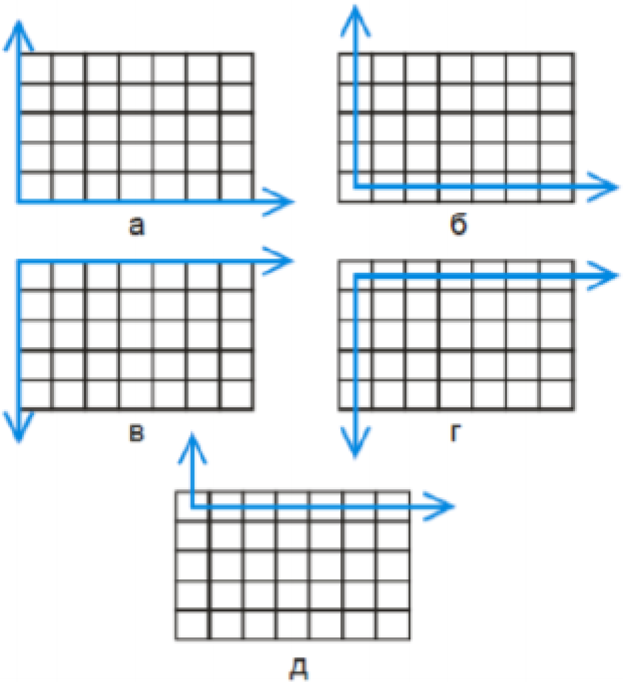

Рисунок 2.4 – Варіанти систем координат цифрового зображення:
а) початок СК - лівий нижній кут, вісь у - вгору, прив'язка до краю пікселя (MonoSDS, Calibrator); б) початок СК - лівий нижній кут, вісь у - вгору, прив'язка до центру пікселя (PhotoMod); в) початок СК - лівий верхній кут, вісь у - вниз, прив'язка до краю пікселя (MapInfo); г) початок СК - лівий верхній кут, вісь у - вниз, прив'язка до центру пікселя (WorldFile: ArcView, ArcGIS, MapInfo); д) початок СК - лівий верхній кут, вісь у - вгору, прив'язка до центру пікселя (Erdas Imagine).

По-третє, для цифрових камер лінійні розміри в мікрометрів (як і фокусна відстань в міліметрах) не мають ніякого сенсу, так як реальні розміри матриці і фокусної відстані неможливо виміряти з потрібною точністю (мінімум 4 значущих цифри), а використовувати грубо наближені значення для фотограмметричних вимірювань недоцільно. Крім того, одиниці вимірювання фокусної відстані повинні відповідати одиницям виміру по осях х і у. Однак, на практиці «рідним» фокусною відстанню користуються рідко, вважаючи за краще так зване «еквівалентну», тобто відповідне знімку, має такий же кут огляду, але отриманого плівковою камерою з розміром кадру 24 * 36 мм. Це ще більше заплутує справу.

По-четверте, піксель матриці не обов'язково є квадратним.

Тоді будь-яку систему усунення систематичних спотворень і переходу до системи координат, заснованої на положенні головною точки, можна представити у вигляді деякої послідовності перерахованих функцій. Кожна з цих функцій у відповідності зі своїми параметрами здійснює перетворення результатів, отриманих від попередньої функції. Причому параметри перетворень не залежать від інших функцій та їх параметрів.

Виняток з цього правила становлять перетворення між різними видами систем координат цифрового зображення (вони природним чином залежать від вихідної системи координат цифрового зображення) і перенесення системи координат в задану точку, так як положення точки може бути задано нема на попередньому етапі перетворення, а на якомусь чи іншому (в інший, реформованій системі координат).

2.6 Програмне забезпечення

Існує безліч програм для фотограмметрії, які можна використовувати для обробки знятих зображень. Зазвичай всі вони дають досить хороші результати. Однак одні додатки можуть мати переваги в деяких областях. Але все-таки варто зауважити, що хоча правила зйомки фотографій і однакові для всього ПО, існують специфічні для різних додатків рекомендації, тому що кожна програма обробляє дані по-своєму. Ці рекомендації дозволяють повністю використовувати можливості ПО.

2.6.1 Створення за допомогою 3D сканерів

3D сканер - це периферійний пристрій, аналізує фізичний об'єкт і на основі отриманих даних створює його 3D модель. 3D сканер досліджує

фізичний предмет та відтворює його точну цифрову модель. Сучасні 3D сканери можуть виглядати як ручний прилад невеликого розміру, або бути стаціонарним пристроєм, що використовують в якості підсвічування лазер або спеціальну лампу, щоб збільшити точність вимірювань.

Принцип роботи визначається за цією технологією, проте в будь-якому випадку даний пристрій має справу з визначенням відстані до об'єкту сканування предмета. Сканер досліджує відстань до об'єкта, задіюючи дві вбудовані камери і підсвічування за допомогою цих «очей» прилад вимірює відстань до об'єкта в різних точках, а потім зіставляє отримані від камер картинки. Всі вимірювання записуються, після чого проводиться аналіз і на екран вже виводиться готова цифрова модель.

Рисунок 2.5 – Контактний сканер

Рисунок 2.6 – Безконтактний 3D сканер

Сканування може здійснюватися і лазерним променем, який переміщається над поверхнею предмета і вимірює відстань в конкретній точці. Таким способом записуються координати всіх вимірюваних точок, що відкриває можливість для створення тривимірної комп'ютерної моделі.

Автомобільні лазерні сканери поєднують в собі риси авіаційних і наземних. Збір даних в динамічному режимі із застосуванням інерційної і супутникової систем навігації визначає однаковість технології роботи авіаційних і автомобільних сканерів. А робота сканерів, по суті на земній поверхні, дає результати, подібні даними, отриманих від наземних сканерів. Спосіб установки сканера залежить від габаритів самого приладу. На основі цього їх можна розділити на стаціонарні і портативні.

3D-сканери, що працюють за технологією структурованого світла, є проекцію світловий сітки безпосередньо на об'єкт, деформація цього малюнка і являє собою модель сканируемого предмета. Сітка проектується на об'єкт за допомогою рідкокристалічного проектора або іншого постійного

джерела світла. Камера, розташована трохи в стороні від проектора, фіксує форму мережі і обчислює відстань до кожної точки в поле зору.

Сканування структурованим світлом досі залишається активною областю досліджень, якій щорічно присвячується досить багато науково-дослідних робіт. Ідеальні карти також визнані корисними, як структуровані світлові візерунки, які можуть вирішити проблеми відповідності і дозволяють не тільки виявити помилки, але і виправити їх.

Перевага 3D-сканерів, що використовують структурований світ, в їх швидкості і точності роботи. Замість сканування однієї точки в один момент часу, структуровані сканери сканують одночасно кілька точок або все поле зору відразу. Сканування всього поля зору займає частку секунди, а згенеровані профілі є більш точними, ніж лазерні тріангуляції. Це повністю вирішує проблему спотворення даних, викликаного рухом. Крім того, деякі існуючі системи здатні сканувати навіть рухомі об'єкти в режимі реального часу. Наприклад, VisionMaster - скануюча система в форматі 3D - володіє 5-мегапіксельною камерою, завдяки чому кожен кадр містить 5 мільйонів точок.

Сканери, що працюють в режимі реального часу, використовують цифрову проекцію краю і фазоссуваючу техніку (одна з методик застосування структурованого світла), що дозволяє захопити, відновити і створити комп'ютерну модель з високою щільністю деталей динамічно змінюються об'єктів (наприклад, міміка) при 40 кадрах в секунду. Нещодавно був створений новий тип сканера. Різні моделі можуть бути використані в цій системі. Частота кадрів для захоплення і обробки даних досягає 120 кадрів в секунду. Цей сканер може обробляти і окремі поверхні. Наприклад, 2 рухомі руки. Використовуючи метод бінарної дефокусировки, швидкість зйомки може досягати сотень, а то і тисяч кадрів в секунду.

2.6.2 Лазерні сканери

В останні роки все більшого поширення набувають лазерні Сканерні системи, які не тільки будують поточечно зображення об'єкта, а й фіксують координати точок зображення в знімальному системі координат. Правда, поки ці системи знаходять застосування при зйомці інженерних об'єктів, а не для створення топографічних карт.

Принцип роботи лазерного сканера аналогічний принципу роботи безвідбивачевого електронного тахеометра і полягає в вимірі часу проходження лазерного променя від випромінювача до поверхні, що відбиває і назад до приймача. Шляхом ділення цього часу на швидкість поширення лазерного променя визначається відстань до об'єкта. Сканер складається з лазерного далекоміра, адаптованого для роботи з високою частотою і блоку розгортки лазерного променя. Як блок розгортки в сканері виступають сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривод відхиляє промінь на задану величину в горизонтальній площині, при цьому повертається вся верхня частина сканера. Розгортка у вертикальній площині здійснюється за рахунок обертання або коливання дзеркала.

В основу методу роботи сучасних лазерних далекомірів, використовуваних в сканерах, покладені імпульсний і фазовий безвідбивачеві методи вимірювання відстаней. У процесі сканування фіксується напрямок поширення лазерного променя і відстань до точок об'єкта. Результатом роботи сканера є масив (хмара) точок лазерних відображень від об'єктів, що знаходяться в полі зору сканера, з п'ятьма характеристиками, а саме просторовими координатами (x, y, z), інтенсивністю і реальним кольором. Зазвичай, характеристики реального кольору для кожної точки виходить за допомогою цифрової камери. Швейцарська компанія Leica Geosystems є загальновизнаним світовим лідером розробки лазерних технологій і виробництва лазерних сканерів.

Хоча перші скануючі системи з'явилися відносно недавно, технологія лазерного сканування показала свою високу ефективність і активно витісняє менш продуктивні методи вимірювань.

Метод, що дозволяє створити цифрову модель всього навколишнього простору, представивши його набором точок з просторовими координатами. Основна відмінність від традиційних тахеометрів - принципово інша швидкість виконання вимірювань, сервопривід, автоматично повертає вимірювальну головку в горизонтальній і вертикальній площинах.

Принцип роботи сканера той же, що і простого тахеометра - вимір відстані до об'єкта і двох кутів, що в кінцевому підсумку дає можливість обчислити координати. Пучок лазера виходить з випромінювача, відбивається від поверхні об'єкта і повертається в приймач.

До переваг технології відноситься висока точність вимірювань, що дозволяє знизити обсяг конструктивних робіт, витрати на виконання виконавчої / топографічної зйомок і виключити перетинання основних магістралей і конструкцій. Додайте до цього високу швидкість, поставте себе на місце забудовника і ви зрозумієте, що комплекс інженерно-геодезичних вишукувань дозволить швидко знайти відхилення від архітектурних креслень, оперативно змінити розрахунки і виключити негативні наслідки у вигляді, наприклад, прогину окремих елементів, відхилень по горизонталі або деформацій .

Лазерне сканування в промисловості використовується в якості методу досліджень під реконструкцію або виконавчої зйомки. Швидкість методу дозволяє вкрай швидко отримати точну та актуальну 3D-модель виробництва «як є» або «як побудовано». Наявність таких даних дозволяє на іншому якісному рівні спроектувати реконструкцію або проконтролювати хід будівництва.

Лазерне сканування в архітектурі застосовується для геодезичної зйомки фасадів, інтер'єрів будівель. Архітектурний обмір за даними лазерного сканування містить фасади, плани, розрізи, деталі, шаблони, при

цьому достовірність цієї інформації за рахунок високої автоматизації на порядок вище, ніж при використанні традиційних геодезичних засобів. Найбільш затребуване лазерне сканування пам'ятників архітектури, зйомка будівель для монтажу навісних фасадів.

Автомобільні лазерні сканери поєднують в собі рісд авіаційних и наземних. Збір даних до дінамічному режимі Із застосування інерційної и супутникової систем навігації визначає однаковість технології роботи авіаційних и автомобільних сканерів. А робота сканерів, по суті на земній поверхні, дає результати, подібні даним, отриманий від наземних сканерів. Способи установки сканера залежить від габаритів самого приладнати. На основі цього їх можна розділити на стаціонарні и портативні.

На об'єктах транспорту ефективність лазерного сканування визначається можливістю зйомки лінійних об'єктів без зупинки руху. 3D сканування тунелів, мостів, доріг як правило виконується з метою створення топографічних планів, профілів, перетинів для проектування ремонту, реконструкції, для наповнення автоматизованого електронного банку даних об'єктивними просторовими даними про фактичний стан об'єктів транспорту.

Лазерне сканування в археології застосовується для фіксації розкопок, археологічних знахідок. Швидкість зйомки важлива в охоронній археології. Висока детальність хмари точок дозволяє згодом створити точну і реалістичну 3D-модель пам'ятника археології, використовувати цю модель в інтерактивному додатку при музеєфікації або для забезпечення віртуального доступу до об'єкту наукового співтовариства.

2.6.3 Программні додатки

Як і багато речей, програмне забезпечення для фотограмметрії поставляється в багатьох формах і розмірах. Основні розробники

програмного забезпечення опублікували комерційні рішення, які ідеально підходять для промислових та інженерних застосувань.

	OpenMVG OpenMVS	OpenMVG PMVS	Photoscan	MVE	Recap360	123D Catch	PPT-GUI
Open sparse cloud and cameras in Blender	YES	YES	YES	NO	NO	NO	YES
Opens in MeshLab and Blender	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Dense cloud generator	YES	YES	YES	YES	--	--	NO
Dense cloud quality	EXCELLENT	GOOD	EXCELLENT	EXCELLENT	--	--	GOOD
Vertex Color	YES	YES	YES	YES	NO	NO	YES
Image Texture	YES	NO	YES	YES	YES	YES	NO
Automatic Texture	YES	NO	YES	YES	YES	YES	NO
Texture Quality (Image)	EXCELLENT	--	EXCELLENT	GOOD	EXCELLENT	EXCELLENT	--
Automatic CCD	NO	NO	YES	YES	YES	YES	NO
Total Calculation Time	MEDIUM	MEDIUM	SLOW	FAST	FAST	FAST	SLOW
Operational Systems	Lin-Win-Mac	Lin-Win-Mac	Lin-Win-Mac	Lin-Win-Mac	Navegador online	Lin*-Win-Mac-Android-IOS	Lin-Win
3D Mesh	EXCELLENT	EXCELLENT	EXCELLENT	REGULAR	EXCELLENT	EXCELLENT	--

Рисунок 2.7 – Програми 3D реконструкції

Вище у нас є таблиця, яка містить важливі аспекти кожної з систем. В цілому по крайній мере мабуть, немає жодної системи, яка виділяється набагато більше, ніж інші.

Наприклад, через повільність обчислень в Agisoft ви можете прагнути записати в одне зображення якомога деталей. А Reality Capture прагне фільтрувати ці фонові деталі, тому що вони можуть вносити шум. Однак Reality Capture швидше, тому для неї можна просто зробити більше фотографій.

Компанія Auotodesk розробила хмарний сервіс під назвою 123D Catch, який дозволяє в автоматичному режимі побудувати 3D модель об'єкта по набору фотозображень. Autodesk 123DCatch, хмарне ПО для фотограмметрії, обмежене 50 зображеннями на проект, які стискаються до 3 мегапікселів. Після нього було випущено ПО для ПК Memento, яке пізніше перейменували в Remake. Воно може працювати як офлайн, так і в хмарі. У Remake процес

генерації виконується одним кліком, і користувач майже не може контролювати обробку даних.

Програма поки доступна тільки у версії для Windows, хоча підтримка інших операційних систем обіцяна найближчим часом. Якщо в двох словах, то ця хмарна утиліта перетворює звичайні фотознімки в тривимірні полігональні моделі з високою роздільною здатністю.

Хоча завжди можна зробити кілька десятків фотографій і створити 3D-модель вручну, ReMake автоматизує процес, перетворюючи знімки в високоякісні, кастомізіруемие цифрові моделі. «Отримані меши можна чистити, виправляти, редагувати, масштабувати, вимірювати, порівнювати і оптимізувати для подальшого з використання - все це за допомогою ReMake», - заявляє Autodesk. «ReMake забезпечує можливість зворотної інженерії, як робочий інструмент для дизайнерів і розробників, кошти оцифровки об'єктів для розширеної і віртуальної реальності, фільмів та ігор, методу збереження предметів мистецтва і культурної спадщини в цифровій формі, інструменту для цифрового виробництва та інтерактивних публікацій в мережах».

Завдяки ReMake в ряді випадків можна уникнути довгих годин проектування в CAD-редакторі і навіть відмовитися від придбання спеціалізованого 3D-сканера. Існують безкоштовна і професійна версії. У безкоштовної версії є обмеження в 125 зображень на проект і доступна тільки хмарна обробка. Після обробки скана можна відредагувати його, очистити всередині Remake або імпортувати сітку в інше програмне забезпечення. Це корисна опція, якою я часто користуюся, хоча непогано було б мати більше контролю над процесом генерування сітки. У додатку також є оптимізатор, що знижує кількість полігонів сітки і опції запікання текстур, що дозволяють швидко створити болванки об'єктів для рівнів гри.

Agisoft Photoscan - це дуже популярний додаток, широко використовується в індустрії розваг. Agisoft забезпечує відмінні результати сканування. надає контроль над процесом генерування сіток і має зручний

інтерфейс з докладною документацією. Незважаючи на те, що в Agisoft немає обмежень на кількість зображень, чим більше фотографій ви використовуєте, тим більше потужний комп'ютер вам потрібен для обробки. Не кажучи вже про те, що час обробки може бути досить великим.

Reality Capture - це додаток може обробляти дані набагато швидше за своїх конкурентів, і управлятися з величезною кількістю зображень на звичайному настільному комп'ютері, якщо в ньому є графічний процесор NVidia. Reality Capture перевершує інше програмне забезпечення завдяки функції швидкого вибудовування, що дозволяє вибудувати зображення за кілька секунд навіть на ноутбуці. Це відмінний інструмент для перевірки даних прямо на місці зйомки, щоб переконатися, що зображень досить. У Agisoft майже таких же швидкостей вибудовування можна досягти при більш низьких налаштуваннях, але RC перевершує і значно швидше Agisoft в реконструкції хмари точок. Варто зауважити, що поки Reality Capture не підтримує 16-бітний висновок. Втім, це досить нове ПЗ, яке часто оновлюється, і підтримка 16 біт рано чи пізно з'явиться.

Якщо вам потрібно обробити більше 2500 зображень, і у вас разовий проект. Додаток може обробляти великі обсяги даних на потужних комп'ютерах, і воно трохи швидше Agisoft. Через спеціалізованого набору інструментів це ПО в основному поширене в промисловості і сільському господарстві. На каналі в YouTube у Pix4d є цікаві вебінари, в яких розповідається про ефективне використання ПЗ і наводяться поради та підказки по фотограмметрії. Треба зауважити, що при тестуванні мені не дуже сподобалася якість одержані текстур, проте вдалося поліпшити їх невеликий налаштуванням параметрів.

Є також пакет SuRe, який цікавий тим, що навіть робота з ним багато чому вас вчить - у нього є GUI (найперші версії працювали тільки з командним рядком) і автори дуже відкрито розповідають про те, що вони пропонують. Проте, SuRe майже повністю направлена на використання з камерами великого формату, автори продають свій код для включення в

більш зручне користувачам оточення. У SuRe навіть немає етапу «вибудовування», він покладається на дані, експортовані з Pix4D, Agisoft або інших продуктів. Він має перевагу в швидкості генерування щільних хмар точок і дивно точно текстурируются моделі, але неймовірно жадібний до ОЗУ, навіть більше, ніж Agisoft. Крім того, створювані їм моделі (сітки) мають прекрасну деталізацію, проте з ними складно працювати, якщо у вас немає потужного комп'ютера.

OpenMVG - це бібліотечна ціль для фотограмметрії, яка популярна у спільноті Multiple View Geometry (MVG) та вчених з комп’ютерного зору. Він схильний зосереджувати увагу на структурі з техніки руху (SfM) фотограмметрії, яка має цілий ряд інтегрованих інструментів. Усі його характеристики та моделі тестуються, щоб переконатися, що вони не тільки працюють належним чином, але й працюють належним чином у реальних ситуаціях. Цей трубопровід фотограмметрії вимагає компіляції для використання та вимагає певної комп’ютерної кмітливості для роботи та роботи в Windows або Linux. Він розроблений навколо мантри "Зробити це просто, тримати його доступним", доступність OpenMVG, орієнтована на спільноти, робить його доступним інструментом, який вписується в робочі процеси інших інструментів фотограметрії.

3 КОМП'ЮТЕРНА 3D МОДЕЛЬ З ЗОБРАЖЕНЬ

3.1 Обґрунтування вибору середовища програмної реалізації

У рамках атестаційної роботи був розроблений алгоритм для обробки зображень за допомогою високочастотних фільтрів для подальшого їх використання у побудові 3D моделі. Для реалізації була обрана бібліотека OpenCV. OpenCV (англ. Open Source Computer Vision Library, бібліотека комп'ютерного зору з відкритим вихідним кодом) - бібліотека алгоритмів комп'ютерного зору, обробки зображень та чисельних алгоритмів загального призначення з відкритим кодом. Реалізована на C / C ++, також розробляється для Python, Java, Ruby, Matlab, Lua та інших мов.

OpenCV була створена для забезпечення загальної інфраструктури додатків для комп'ютерного зору і прискорення використання сприйняття машини в комерційних продуктах. Будучи ліцензованим BSD продуктом, OpenCV спрощує бізнес для використання і модифікації коду [10].

В якості мети для розробки даної бібліотеки було поставлено підвищення ефективності в додатках реального часу. Функціонал бібліотеки реалізований на мові C. OpenCV має можливість використовувати багатоядерні процесори. У разі необхідності автоматичної оптимізації на платформах Intel, можливо додаткове придбання та інтеграція з бібліотекою IPP.

До складу бібліотеки входить більше 2500 оптимізованих алгоритмів, які включають в себе повний набір класичних і сучасних алгоритмів комп'ютерного зору і машинного навчання. Дані алгоритми можуть використовуватися для виявлення і розпізнавання осіб, ідентифікації об'єктів, класифікації дій людини на відео, відстеження рухомих об'єктів і рухів самої камери. OpenCV має більше 47 тисяч користувачів спільноти, а передбачувана кількість завантажень перевищує 14 мільйонів. Бібліотека

широко використовується в компаніях, дослідницьких групах і в урядових органах.

Крім таких відомих компаній як Google, Yahoo, Microsoft, Intel, IBM, є безліч різноманітних стартапів, таких як Applied Minds, VideoSurf і Zeitera, які так само використовують функціонал OpenCV.

Операційна система Windows надає розроблювачам додатків потужні засоби Інтерфейсу Графічних Пристроїв GDI (Graphics Device Interface) для побудови графічних зображень незалежно від типу використовуваного пристрою висновку. На жаль, GDI обтяжує програмістів безліччю додаткових дій (зокрема, по керуванню системними ресурсами), які відволікають розроблювача від його основного завдання – створення графіки.

OpenCV бере на себе всю допоміжну роботу GDI, звільняючи розроблювачів від непродуктивного програмування з пошуком загублених дескрипторів зображень і не звільнених ресурсів пам’яті. Це зовсім не означає, що прямий обіг додатків до окремих функцій Windows GDI забороняється – ви завжди зможете при необхідності викликати їх. Однак, інкапсуляція графічних функцій Windows візуальними компонентами являє собою більше перспективну методику створення графіки у вашім додатку.

OpenCV інкапсулює функції Windows GDI на різних рівнях. Найбільш важливим тут є спосіб, за допомогою якого графічні компоненти представляють свої зображення на екрані монітора. При прямому виклику функції GDI необхідно передавати їм дескриптор контексту пристрою (device context handle), що задає обрані вами знаряддя малювання – пір’я, кисті й шрифти. Після завершення роботи із графічними зображеннями, ви зобов’язані відновити контекст пристрою у вихідний стан і тільки потім звільнитися від нього.

Замість того щоб змушувати працювати із графікою на такому рівні деталізації, Canvas (Канва) - це властивість задає правильний контекст пристрою й звільнить його в потрібний час, коли ви припините малювання.

За аналогією з функціями Windows GDI канва має вкладені властивості, що представляють характеристики пера, кисті й шрифту.

Єдине, що повинен зробити користувач, працюючи із графічними компонентами, – це визначити характеристики використовуваних знарядь малювання. Вам не буде потрібно стежити за системними ресурсами при створенні, виборі й звільненні знарядь. Канва сама подбає про це.

3.2 Порядок виконання роботи

Фотограмметричні методи є методами збору інформації про об'єкт дослідження. Знімки великого масштабу можуть бути отримані з використанням зйомки різними способами. Наприклад за допомогою легких вертольотів, легкомоторних літаків, безпілотних літальних апаратів, наземної стерео-фотозйомкою і використовуя різноманітні цифрові фотокамери (професійними та аматорськими) середнього і малого формату.

Для визначення тривимірних координат всіх характерних точок об'єкта потрібно вирішити такі завдання:

- вибір параметрів зйомки;
- фотограмметрична калібрування;
- побудова карти глибини;
- створення векторної моделі по стереопару цифрових знімків;
- відображення отриманих результатів.

Слід зазначити, що до сих пір цифрова фотограмметрія, для фахівців зі збереження культурної спадщини практично невідома широкому загалу, в тому числі архітекторів та реставраторів.

Вибір конфігурації зйомки. Якість вимірювань істотно залежить від обраного масштабу зйомки, розташування знімальних камер, власної форми об'єкта, а також від обмежень, що накладаються умовами зйомки. Тому для забезпечення необхідних показників якості моделі в кожному конкретному

випадку необхідно для заданого класу об'єктів вирішувати задачу вибору кількості, параметрів і розташування камер.

Завдання калібрування. Під завданням фотограмметричної калібрування розуміють визначення елементів внутрішнього орієнтування (f, x0, y0) і поправок за дисторсію знімальної камери (δx, δy).

Знаючи інформацію про глибину (функція двох змінних) можна генерувати 3D моделі ландшафту та інших природних об'єктів.

Завдання створення векторної моделі. Проблема створення векторної моделі полягає в ідентифікації на перекриваються знімках відповідних точок. Завдання отримання тривимірних координат точок об'єкта складної форми. Стереоскопічне спостереження стереопару з більшою різницею масштабів буває утруднено. Тому доводиться вдаватися до монокулярним вимірам відповідних точок.

Найкращі результати під час реконструкції отримують від чітких знімків без затиску кольорової гами. Гострота тут є дуже важливим фактором.

Рисунок 3.1 – Виділення контурів на зображенні

На першому зображенні представлений приклад поганої експозиції. Темні або затиснуті ділянки забезпечують погану реконструкцію. На другій картинці приклад поганих зображень із занадто великою розфокусировкою, діафрагмою f / 2.8. Кордон соснової шишки є повністю розмита через глибину різкості та реконструкція - це невдача. Третє зображення – це приклад правильного фокусування та експозиції.

Кольорова перевірка використовується для врівноваження білого фотографії, але також як показник масштабу віртуального ресурсу. Знання розмірів реконструйованих об'єктів важливо, оскільки процес фотограметрії втрачає цю інформацію. Знайдіть гарне місце для перевірки кольорів. Досить близький до теми, але його не слід затінювати. Знайдіть місце в сцені, яке можна легко зняти під час процесу, або цифровим способом розфарбуйте його. Кольорова перевірка зазвичай повинна бути звернена до неба.

Необхідно також оцінити важливість захоплення об'єкта. Для активів, які відображаються поблизу камери у вашій грі, буде потрібно більше тексту в грі, ніж фонові активи. Ви повинні визначити текстурні бюджети для різних активів, і ці рішення спричинять вибір, який ви робите на своїй програмі Shoot. Відстань зйомки від об'єкта залежить від розміру самого об’єкта, масштабування об'єктива та бюджету текстури. Об'єкт повинен заповнити більшість ваших зображень, щоб досягти максимальної якості реконструкції.

Коли потрібна більш висока роздільна здатність, потрібні ближче зображення. Зауважте, що для покриття великого об'єкта, як пень з деревом з мікро розділенням, може знадобитися тривалий час (див. Розділ з текстурою деталей). Причому реальність Capture має обмеження на кількість фотографій, які ви можете надати як джерело для реконструкції залежно від обраної ліцензії.

Процес фотограмметрії покладається на фотографічні джерельні зображення. Однак усі зйомки можна зробити за допомогою Gopro або будь-якого подібного 4К відео пристрою, з якого все-таки можна витягти кадри. Оскільки таких пристроїв відеозапису мало, вони дозволяють охопити всі частини об’єкта дуже швидко і можуть бути дуже близько до об'єкта, таким чином, що може бути складніше для більшої камери.

При виконанні стереофототопографіческой зйомки використовують фотокамери, в конструкцію яких входить кутомірні пристрій, який називається орієнтує пристроєм. Воно забезпечує встановлення головної оптичної осі фотокамери в заданому напрямку щодо базису фотографування.

Фотозйомка ведеться, в основному, на фотопластинки, хоча є фотокамер, у яких передбачена зйомка і на фотопластинки, і на фотоплівки. Не у кожної фотокамери є затвор, тому що при фотографуванні нерухомих об'єктів він необов'язковий. Формат кадру, в основному, прямокутний. Довга сторона кадру орієнтується в горизонтальному напрямку.

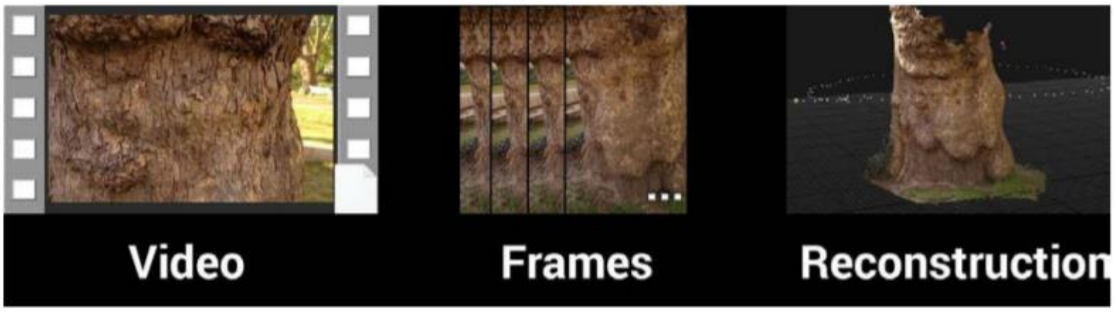

Рисунок 3.2 – 3D реконструкція по відео та фотографіях

Рекомендується використовувати відеозаписи безпілотників замість фотографій для такого величезного об'єкта, оскільки якість не є значно кращою, а відео дозволить легко охопити об’єкти. Можна змішати близькі постріли, зроблені вручну, з далекими пострілами, зробленими безпілотником.

В якості альтернативи, дрон може бути використаний для створення області заповнення або тимчасового елемента. Наступний приклад показує область, реконструйовану програмою Reality Capture із фотографіями, вилученими з відео безпілотника. Його можна використовувати як швидкий макет заповнювача.

На практиці для зйомки такого великого предмета, як цей пень з кінцевою текстурою в 4096x4096, фотографії слід робити на відстані від 1 до 2 метрів. Під час зйомки об'єкта важливо повне його охоплення. Усі частини об'єкта повинні бути охоплені декількома зображеннями, щоб програмне забезпечення для реконструкції могло створювати групи подібних пікселів, щоб у кінцевому ресурсі не було отворів або ділянок, що не були

пробовідробленими. В ідеалі розташування знімків має виглядати приблизно так.

Візерунок робиться шляхом переміщення навколо об'єкта та багатьох далеких знімків, а також декількох менших знімків з ближнього зображення, щоб надати більше деталей на етапі реконструкції. У кожному місці горизонтальної камери важливо також висвітлювати об'єкт вертикально. На практиці може бути важко пройти цей ідеальний шлях.

Спеціальний пристрій для обессвечіванія - це спеціальний пристрій зазвичай використовується для обессвечіванія, тобто видалення інформації про світло (наприклад, прямого освітлення, загального освітлення, відбитого освітлення). відноситься до вихідної середовищі, в якій знаходився сканований об'єкт. Це дозволяє додати іншу інформацію про світлі, відповідну новому середовищі, в яку поміщається скан. Epic Games використовувала цей пристрій для створення демо Kite і написала пост про те, як створювалися ресурси для демо у відкритому світі, ще один пост про вибір обладнання та третій, в якому описується процес обессвечіванія. Пристрій складається з 3 елементів: відображає хромового кулі, матового сірого кулі і калібрувальної мішені, про яку я вже розповідав.

Це пристрій зазвичай має який-небудь спосіб зйомки панорамних зображень HDR середовища, в яку воно поміщено. Пізніше пристрій використовується для відтворення тих же умов освітлення від сканованого об'єкта. Потім зняте панорамне зображення використовується для орієнтування віртуального хромового кулі так само, як був розташований реальний. Матовий сірий куля використовується для вимірювання рівня освітлення. За допомогою цієї інформації можна розрахувати вихідне освітлення, запекти його на від сканованому об'єкті, а потім відняти від вихідної текстури, отримавши неосвітлених об'єкт. Якщо такий пристрій вам недоступно, спробуйте використовувати іншу програмну техніку, що дозволяє видалити інформацію про світлі з об'єкта. Вона застосовувалася в Star Wars Battlefront.

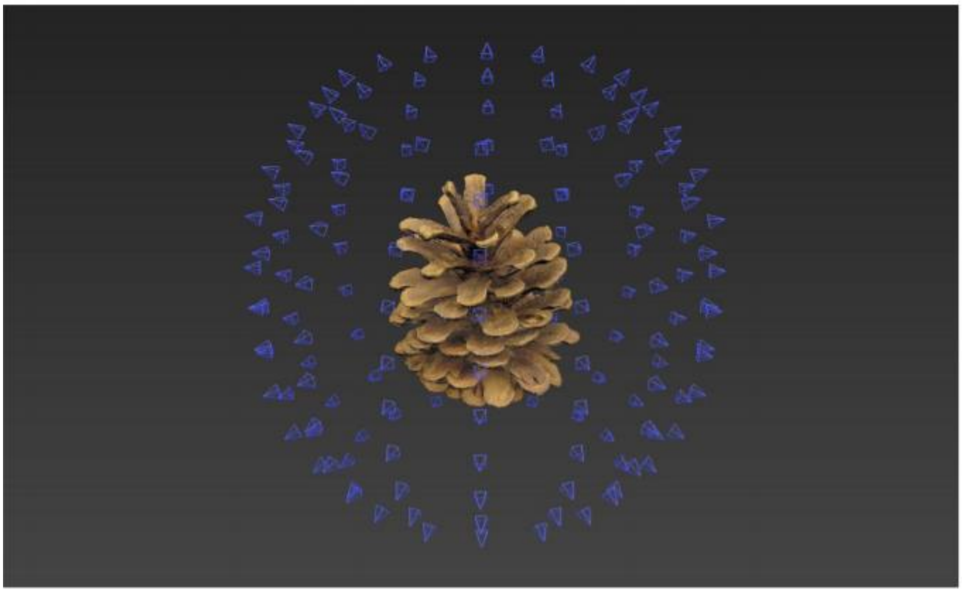

Рисунок 3.3 – 3D реконструкція

Щоб можна було захопити невеликий предмет з усіх кутів, необхідно вміти його обертати з усіх кутів. Невеликі предмети можна тримати перед камерою за допомогою опорного затискача, в ідеалі з якомога меншим контактом з предметом. Отже, перший крок - знайти хорошу підтримку. Точний характер підтримки, який вам знадобиться, залежить від форми та структури об'єкта, який ви захоплюєте. Оскільки важко перевезти все обладнання під час подорожі, часто бажано зібрати невеликі предмети, повернути їх у вашу студію та захопити їх у безпечне місце поруч із комп'ютером за допомогою програмного забезпечення для відновлення.

3.3 Побудова карти глибини

Більшість напівавтоматичних методів стерео перетворення використовують карти глибини та відображення на основі глибини зображення [4, 5].

У тривимірній комп'ютерній графіці карта глибини - це зображення або канал зображення, який містить інформацію, що стосується відстані поверхонь предметів сцени від точки зору. Тут можна побачити дві різні карти глибини, разом із оригінальною моделлю, з якої вони отримані. Перша

карта глибини показує яскравість пропорційною відстані від камери. Близькі поверхні темніші; далі поверхні легші. Друга карта глибини показує яскравість по відношенню до відстаней від номінальної фокусної площини. Поверхні ближче до фокусної площини темніші; поверхні, розташовані далі від фокусної площини, легші (як ближче, так і далі від точки зору).

Ідея полягає в тому, щоб окремий допоміжний малюнок, відомий як "карта глибини", створювався для кожного кадру або для серії однорідних кадрів для позначення глибини предметів, присутніх у сцені. Карта глибини - це окреме зображення сірого масштабу, що має ті ж розміри, що і вихідне 2D зображення, з різними відтінками сірого для позначення глибини кожної частини кадру. Хоча картографування глибин може створювати досить потужну ілюзію 3D-об’єктів у відео, воно по суті не підтримує напівпрозорі об'єкти чи ділянки, а також не дозволяє явно використовувати оклюзію, тому ці та інші подібні проблеми слід вирішувати окремим способом.

Існує безліч методів заповнення областей карти глибини, які засновані на алгоритмах реконструкції зображень.

Перша група включає в себе методи, засновані на рішенні диференціальних рівнянь в приватних похідних (PDE) [3]. Основним недоліком таких підходів є поява розмиття різких перепадів яскравості на зображенні, тому вони застосовуються в основному тільки для відновлення подряпин або маленьких ділянок на зображеннях.

Друга група використовує обробку в частотної області [4]. Методи засновані на ортогональної трансформації і вимагають апріорної інформації для вибору параметрів, ортогонального базису і розміру блоків спектрального уявлення. Слід зауважити, що при відновленні великих ділянок зображення також спостерігається помітне розмиття лінійних структур і різких перепадів яскравості. А велика кількість ітерацій призводить до значних обчислювальних вимогам.

Використання оригінального методу текстурного аналізу [5] для відновлення пошкоджених ділянок карти глибини може призводити до

артефактів і помилок на кордонах об'єктів, що пов'язано з низьким дозволом вихідного зображення. У пропонованому методі в розрахунок береться також інформація, що отримується з RGB камери пристрою Kinect, що дозволяє більш точно реконструювати лінійні структури на зображенні [6].

Для коригування артефактів на оригінальному документі, пропонується використовувати адаптивний медіанний фільтр, який бере до уваги не тільки інформацію про глибину сцени, а й інформацію з кольорової камери пристрою Kinect. В даному методі використовується LPA-ICI метод, який дозволяє формувати блоки медіанного фільтра, форма яких чутлива до перепадів яскравості на зображенні [7]. В результаті маска фільтра формується по кольоровому зображенню, а сама фільтрація застосовується на мапі глибини.

Методи, засновані на синтезі текстури (даний підхід вперше запропонував Criminisi) дозволяють відновлювати зображення шляхом пошуку схожих блоків на оригінальному документі і копіюванні їх у пошкоджені ділянки [5]. Дана група методів добре відновлює лінійні ділянки і не призводить до розмиття, проте не підходить для відновлення криволінійних ділянок.

Основними недоліками відомих методів відновлення при реконструкції карти глибини, є розмиття різких перепадів яскравості, лінійних структур, нездатність відновлення великих ділянок без спотворень.

Основними кроками методів перетворення на основі глибини є п’ять пунктів. По перше, це - глибинне розподілення бюджету - скільки загальної глибини сцени та де буде площина екрана. По друге, сегментація зображень, створення матів або масок, як правило, ротоскопією. Кожну важливу поверхню слід ізолювати. Рівень деталізації залежить від необхідної якості конверсії та бюджету. Створення карти глибини - кожній ізольованій поверхні слід призначити карту глибини. Окремі карти глибини повинні бути складені в карту глибини сцени. Це ітеративний процес, що вимагає регулювання об'єктів, форм, глибини та візуалізації проміжних результатів у

стерео. Мікрорельєф глибинний, 3D форма додається до більшості важливих поверхонь, щоб запобігти ефекту "картону", коли стереообраз виглядає як комбінація плоских зображень, що встановлюються на різній глибині.

Стереогенерування на основі 2D + глибини з будь-якою додатковою інформацією, наприклад, чистими табличками, відновленим фоном, картами прозорості тощо. Коли процес завершиться, буде створено зображення зліва і справа. Зазвичай вихідне 2D зображення трактується як центральне зображення, так що формуються два стереовиди. Однак деякі методи пропонують використовувати вихідне зображення як зображення одного ока, а також генерувати лише зображення іншого ока, щоб мінімізувати витрати на конверсію [4]. Під час стерео генерування пікселі вихідного зображення зміщуються вліво або вправо залежно від карти глибини, максимально вибраного паралакса та положення поверхні екрана. Реконструкція та фарбування будь-яких непокритих ділянок, не заповнених стерео генератором.

Процес обчислення глибини зображення використовує значення контрасту та різкості. Близькі об'єкти виявляють більш високий контраст і більшу різкість, ніж предмети, розташовані далі. Тож контраст і різкість обернено пропорційні глибині. Суміжні області демонструють близькі значення кольоровості, тим самим вказуючи, що вони мають однакову глибину. Хромність - це міра для композиції 2D зображення.

Стереосистема може бути представлена в будь-якому форматі для цілей попереднього перегляду, включаючи анагліф. Кроки, що займають багато часу, - це сегментація / ротоскопізація зображень, створення карти глибини та заповнення непокритої області. Останнє особливо важливо для перетворення найвищої якості.

Існують різні методи автоматизації створення карт глибини та реконструкції фону. Наприклад, автоматичне оцінювання глибини може використовуватися для створення початкових карт глибини для певних

кадрів і кадрів. Людей, які займаються такою роботою, можна назвати художниками глибини.

Розробка в області глибокого картографування, багатошарового вирішення проблем обмеження глибинного відображення шляхом введення декількох шарів сірих масок глибини для реалізації обмеженої напівпрозорості. Подібно до простої техніки, багатошарове планування передбачає нанесення карти глибини на більш ніж один "зріз" плоского зображення, що призводить до набагато кращого наближення глибини та випинання. Чим більше шарів обробляється окремо на кадр, тим вище якість 3D-ілюзії має тенденцію.

3D-реконструкція та реконструкція можуть використовуватися для стерео перетворення. Він включає створення 3D-моделі сцени, вилучення оригінальних поверхонь зображення у вигляді текстур для 3D-об'єктів і, нарешті, надання 3D-сцени з двох віртуальних камер для придбання стерео-відео. Підхід працює досить добре у випадку сцен із статичними жорсткими предметами, такими як міські знімки із будівлями, внутрішні знімки, але має проблеми з нежорсткими тілами та м'якими нечіткими краями.

Інший метод полягає у встановленні як лівої, так і правої віртуальних камер, обидві зміщені від оригінальної камери, але розділення різниці зміщення, а потім фарбування оклюзійних країв ізольованих об'єктів та символів. По суті, очищення декількох елементів фону, середини та переднього плану.

Бінокулярна невідповідність також може бути отримана з простої геометрії.

Можна автоматично оцінити глибину, використовуючи різні типи руху. У разі руху камери може бути розрахована карта глибини всієї сцени. Також рух об'єкта можна виявити, а ділянки, що рухаються, можуть присвоювати менші значення глибини, ніж фон. Виключення забезпечують інформацію про відносне положення рухомих поверхонь.

Підходи такого типу називають також "глибина від розфокусування" та "глибина від розмиття" [11, 13]. На підходах "глибина від розфокусування" (DFD) інформація про глибину оцінюється виходячи з кількості розмитості розглянутого об'єкта, тоді як підходи "глибина від фокусування" (DFF) мають тенденцію до порівняння різкості об'єкта над діапазоном зображень зроблено з різними відстанями фокусування, щоб дізнатись його відстань до камери. Для правильної роботи DFD потрібно лише два-три при різному фокусуванні, тоді як DFF потребує від 10 до 15 зображень принаймні, але є більш точним, ніж попередній метод.

Якщо в оброблюваному зображенні виявлено небо, також можна врахувати, що більш віддалені предмети, крім того, що вони туманні, повинні бути ще більш насиченими та синюватими через товстий повітряний шар.

Загальний порядок обчислень складається з предобработки вхідних даних, обчислення диспаритету пікселя і кінцевої обробки поста вихідних даних медіанного фільтром.

Перший крок обчислень - отримання градієнтних зображень стереопари методом згортки.

$$C_i(x, y) = \sum_{(i,j)\in N(x,y)} I(i, j) \cdot M(i, j) \tag{3.1}$$

C_i - оброблений піксель лівого зображення;

$I(i, j)$ - вихідний піксель на лівому зображенні;

N (x, y) - околиця 3 × 3 пікселів;

$M(i, j)$ - - елемент відомої матриці згортки.

$$M = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

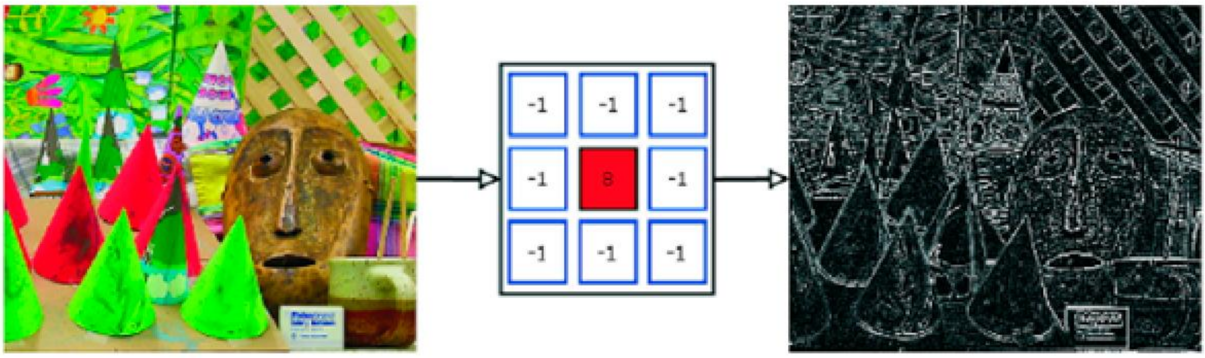

Рисунок 3.4 – Виділення контурів на зображенні

Далі обчислюється лінійна комбінація градієнтного і вихідного зображень з варійованим параметром k. Використання такої попередньої обробки значно зменшує ймовірність помилки обчислення глибини пікселя, особливо при наявності на стереопарі однорідних, мало контрастних областей.

Диспаритет пікселя d за визначенням дорівнює відстані між відповідними пікселями лівого і правого зображень (встановлення відповідності виконується через підрядник перебором пікселів на вибраному рядку зображень y).

$$d = |x_r - x_l|, \quad (3.3)$$

де (x_l - положення обраного пікселя фіксованого рядка y на лівому зображенні, (x_r - положення відповідного пікселя цього рядка на правому зображенні. Щоб знайти (x_r, для кожного елемента (x, y) рядки y правого зображення обчислюється сума вартостей пікселів C з околицями.

Далі з усіх отриманих методом перебору значень суми вартостей вибирається мінімальне значення, що відповідає положенню пікселя з координатами (x_l - d, y) на правому зображенні. Такий принцип в різних варіаціях використовується в багатьох роботах, зокрема в роботі з реалізацією адаптивного вікна [8]. Так, найбільш схожі пікселі і їх околиці на

лівому і правому зображенні уздовж горизонтальної лінії будуть формувати мінімальну вартість.

У локальних методах, при збільшенні розмірів ковзного вікна, з одного боку, зменшується ймовірність помилки визначення диспаритету пікселя, а з іншого боку, значно зростає обсяг обчислень, що робить даний метод малопридатним для розрахунків на стереопару високого дозволу в реальному часі. Крім того, з'являється ефект «роздування» переднього плану.

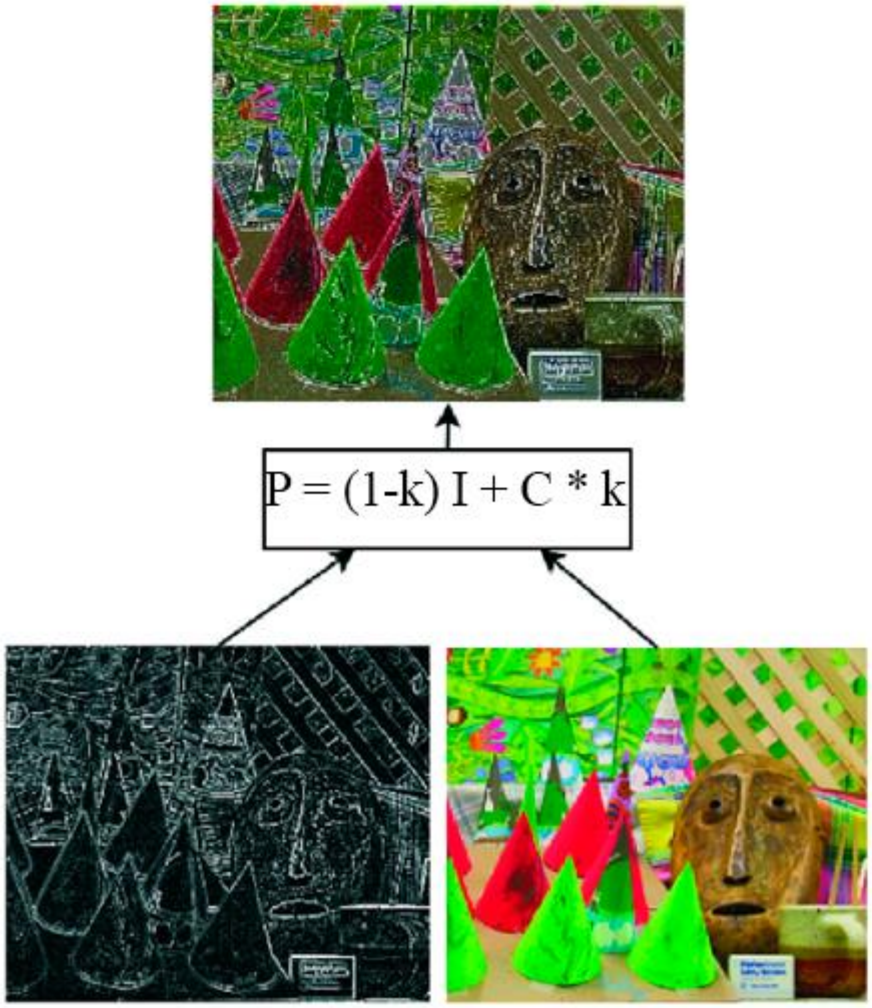

Рисунок 3.5 – Ефект «роздування» переднього плану

Якщо використовувати вікна з адаптивною структурою, можна отримати досить хорошу якість карти глибини, але при цьому знову потрібні значні обсяги обчислень.

У пропонованому методі для досягнення оптимального балансу між швидкістю і якістю використовується два одновимірних розріджених вікна - вертикальне і горизонтальне. Кожне вікно будується з центру розглянутого пікселя. Під розрядженням розуміється, що вікно складається не з найближчих один до одного пікселів, а з пікселів, що знаходяться на деякій заданій відстані один від одного, наприклад, два, чотири, шість пікселів. Це дозволяє істотно збільшити швидкість обчислень при незначному збільшенні помилки.

В процесі розробки даного методу позначилися шляху можливого поліпшення якості та оптимізації швидкості обчислень. Так, для практично повного видалення шумів і підвищення чіткості меж об'єктів на карті глибини можна використовувати сегментацію вхідного зображення. Це дозволить знаходити карту глибини не для кожного конкретного пікселя зображення, а для набору сегментів-площини зображення. Інший підхід - обробка запропонованим алгоритмом тільки цікавлять регіонів зображення або обчислення значення глибини тільки для рухомих об'єктів в кадрі стерео камери.

3.4 Труднощі фотограметрії

Під час зйомки у зовнішніх умовах погода є найважливішим фактором, який слід враховувати. Погода має великий вплив на процес фотограметрії.

Дощ та сніг - найгірші ситуації. Поверхні можуть бути рухомими (ковзання по них води, випадання снігу вниз), відбиття сильніше і кришталик модифікується краплями води або сніжинками. У цих умовах рекомендується скасувати зйомку.

Вітер - ще один елемент, з яким важко впоратися. Вітер може змусити дерева, траву, пил та пісок переміщуватись на ваших зображеннях, що може призвести до поганого результату реконструкції. Для невеликих предметів (деревних шматочків, гілок, соснових шишок) ви можете зібрати їх і

повернути до закритого приміщення, щоб сфотографувати їх у безпечнішому місці. Однак деякі об’єкти, чутливі до руху вітром, можуть бути захоплені лише на місці, наприклад дерева, кущі та трава. Для цього вам потрібно буде переконатися, що ви фотографуєте їх у день без вітру, щоб об’єкти залишалися повністю нерухомими.

Сонце створює яскраві яскраві та сильні тіньові напрямки. Ситуацію, яку слід уникати, оскільки важко мати хорошу експозицію з результатом високого діапазону експозиції. На фотографії з високою контрастністю шум має тенденцію до появи сильних тіней. Більше того, виділення або тіні з напрямками важко видалити зі сформованої дифузної текстури альбедо - кроку, необхідного для того, щоб мати змогу знову освітлити захоплений об’єкт.

Нижче наводиться приклад місця з сильним спрямованим освітленням, що надходить від сонця через листя. Згенерована текстура з цього місця демонструє багато освітлення та сильну оклюзію, які важко видалити.

Рисунок 3.6 – Місцє з сильним спрямованим освітленням.

Переважними умовами для зйомки є сонячні дні, але із застосуванням темної тканини для ізоляції об'єкта від спрямованого освітлення. Це створює м'якіші фотографії, схожі на замулене небо, але з кращим рівнем освітленості для зйомки.

Нарешті, для стабільного освітлення важливо мати послідовне зображення для програмного забезпечення для реконструкції.

Швидко рухаються хмари, що проходять перед сонцем, можуть стати проблемою. Другий найважливіший фактор - сезон. Сезонні відмінності в освітленні впливають на появу органічних / живих об'єктів, таких як листя, дерева або квіти (особливо восени). Крім того, діапазон промінівзалежить від сезону, а в зимові дні діапазон променів, доступний для зйомки предметів, вужчий. Доступне денне світло також залежить від пори року.

3.5 Програмна реалізація

Наша мета - відновити повну 3D-форму об'єкт з одного 2D зображення (RGB або RGB-D). Ми представляють 3D фігури у вигляді невпорядкованого набору точок:

$$S = \{(x_i, y_i, z_i)\}^N, \quad (3.3)$$

де N - наперед визначена константа.

Наше завдання побудувати умовну генеративну мережу для точкових наборів складне, через не упорядковану форму репрезентація та притаманна неоднозначність основної правди.

Найважливішим завданням є створення гарної функції втрат для порівняння прогнозованої хмари точок та земної правди. Для підключення до нейронної мережі відповідна відстань повинна відповідати щонайменше трьом умовам:

– диференційованим щодо точкових місць;

– ефективний для обчислення, оскільки дані будуть передаватися та поширюватися назад багато разів;

– надійний проти невеликої кількості сторонніх точок у наборах (наприклад, відстань Хаусдорфа не вийде).

Шукаємо відстань d між підмножинами в R^3 , так що функція втрат $L(\{S_i^{pread}\},\{S_i^{gt}\})$ приймає форму:

$$L(\{S_i^{pread}\},\{S_i^{gt}\}) = \sum d(S_i^{pread}, S_i^{gt}) \quad (3.4)$$

де і індексує навчальні зразки S_i^{pread} та S_i^{gt} є прогнозом та основою істини для кожного зразка відповідно.

Визначимо відстань Фаски між $S_1, S_2 \subseteq R^3$ як:

$$d_{CD}(S_1, S_2) = \sum_{x \in S_1} \min_{y \in S_2} \|x - y\|_2^2 + \sum_{y \in S_2} \min_{x \in S_1} \|x - y\|_2^2 \quad (3.5)$$

У строгому сенсі d_{CD} не є функцією відстані, оскільки трикутність нерівності не виконується. Ми все-таки використовуємо термін "відстань" для позначення будь-якої негативної функції визначено на парах заданих точок. Для кожної точки алгоритм відстані Фаски знайдемо найближчого сусіда в іншому наборі і сумуємо відстань квадрата вгору.

Розглянемо це як функцію точкових розташувань у S_1 та S_2, відстань Фаски є безперервною та шматково рівною. Пошук діапазону для кожної точки незалежний, таким чином, тривіально паралельний. Також просторові структури даних, такі як дерево KD, можуть використовуватися для прискорення пошуку найближчого сусіда. Хоча простота, відстань Фаски дає практичні результати високої якості.

Система фаски пропонує високоефективне рішення для виявлення об'єктів на основі форми. Він охоплює виявлення об'єктів довільної форми, параметризованих чи ні. Оскільки система вивчає розподіли фігури цільових об'єктів з прикладів, вона гнучка і легко адаптується, без перепрограмування. Його кореляційний підхід на основі пікселів виключає необхідність сегментування контуру, схильного до помилок. Основною перевагою є ієрархічний підхід системи (як у формі, так і в просторі трансформації); це призводить до значного підвищення ефективності порівняно з еквівалентним

методом узгодження шаблону грубої сили. Виміряно збільшення швидкості на кілька порядків.

Система фаски застосовується в широкому спектрі застосувань - від виявлення об'єктів на борту розумних транспортних засобів, до завдань огляду промислового зору та розпізнавання цілей у військових умовах.

В основі системи фаски лежить відповідність форми за допомогою дистанційних перетворень. Розглянемо випадок виявлення трикутників у зображенні сцени. Дивіться схему нижче. Форма цільового об’єкта фіксується двійковим шаблоном. Зображення сцени попередньо обробляється шляхом вилучення функції (тобто виявлення краю) та так званого перетворення відстані; це призводить до отримання відстані зображення, де пікселі містять відстані до найближчих пікселів даних на зображеному зображенні.

Узгодження складається з перекладу та розміщення шаблону в різних місцях відстані зображення; міра відповідності визначається значеннями пікселів зображення відстані, які лежать під пікселями даних перетвореного шаблону. Чим нижчі ці значення, тим краще відповідність зображення та шаблону в цьому місці. Наприклад, якщо середнє значення відстані лежить нижче певного порогу, цільовий об'єкт вважається виявленим.

Можна також використати відстань Вассерштейна. Розглянемо $S_1, S_2 \subseteq R^3$ рівнозначні $s = |S_1| = |S_2|$. Відстань Вассерштейна між A та B представлена нижче:

$$d_{EMD}(S_1, S_2) = \min_{\phi: S_1 \to S_2} \sum_{x \in S_1} \|x - \phi(x)\|_2, \qquad (3.6)$$

де $\phi: S_1 \to S_2$ це біекція.

Біекція - це відображення, яке є одночасно і сюр'ектівним, і ін'єкційних. При биективному відображенні кожному елементу однієї множини відповідає рівно один елемент іншої множини, при цьому визначено зворотне відображення, яке має ту ж властивість. Тому биективному відображення

називають також взаємно однозначним відображенням (відповідністю), одно-однозначним відображенням.

Якщо між двома множинами можна встановити взаємно однозначну відповідність (біекція), то такі безлічі називаються рівнопотужними. З точки зору теорії множин, рівнопотужності безлічі невиразні.

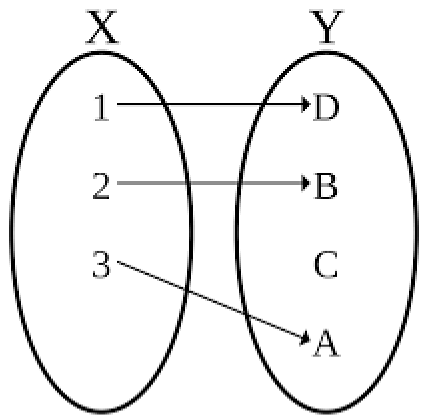

Рисунок 3.7 – Схема біекції

Відстань Вассерштейна вирішує оптимізаційну задачу, а саме проблема завдання. Для всіх, окрім підмножини нульового міру пар точкових наборів, оптимальна біекція ϕ є унікальним і інваріантним при нескінченно малому русі точок. Таким чином, відстань Вассерштейна є диференційованим майже скрізь. На практиці точні обчислення відстані Вассерштейна занадто дорогі для машинного навчання, навіть на потужному графічному обладнанні.

Ми підштовхуємо напрямок реконструкції одного зображення та пропонуємо алгоритм для отримання трикутної сітки з одного кольорового зображення. Замість того, щоб безпосередньо синтезувати, наша модель вчиться деформувати сітку від середньої форми до цільової геометрії. Це корисно для нас з кількох аспектів.

По-перше, глибока мережа краще прогнозувати залишкові, наприклад просторова деформація, а не структурований вихід, наприклад графік. По-друге, ряд деформацій можна скласти разом, що дозволяє поступово доопрацьовувати форму. Це також дозволяє контролювати компроміс між

складністю моделі глибокого навчання та якістю результату. Нарешті, це дає можливість кодувати будь-які попередні знання до початкової сітки, наприклад топологія. Як піонерське дослідження, в цій роботі ми спеціально працюємо над об'єктами, які можна наблизити за допомогою 3D-сітки з родом 0 шляхом деформування еліпсоїда з фіксованим розміром. На практиці ми виявили, що більшість часто зустрічаються категорій можна добре обробляти під цим параметром, наприклад автомобіль, літак, стіл тощо. Для досягнення цієї мети існує декілька притаманних завдань.

Перший виклик полягає в тому, як представити сітчасту модель, яка по суті є неправильним графіком, в нейронній мережі і все ще здатна ефективно витягувати деталі форми з заданого кольорового зображення, представленого в двовимірній регулярній сітці. Це вимагає інтеграції знань, отриманих із двох модальностей даних. На стороні 3D-геометрії ми безпосередньо будуємо графік на основі повністю згорнутої мережі на сітчастій моделі, де вершини та ребра в сітці безпосередньо представлені у вигляді вузлів та з'єднань у графі. Інформація про кодування мережі для форми 3D-форми зберігається у кожній вершині. Завдяки розповсюдженню вперед, згорнуті шари дозволяють обмінюватися функціями по сусідніх вузлах і врешті регресувати 3D-розташування для кожної вершини.

Щоб з'єднати ці два, ми розробляємо шар об'єднання перцептивних можливостей, який дозволяє кожному вузлу в GCN (згорткова мережа) об'єднувати функції зображення зі своєї 2D-проекції на зображення, яку можна легко отримати, вважаючи відому внутрішню матрицю камери. Об'єднання перцептивних ознак є увімкнено один раз після декількох згортків, використовуючи оновлені 3D-місця, і, отже, функції зображення з правильних місць можуть бути ефективно інтегровані з фігурами 3D.

З огляду на графічне подання, наступним завданням є ефективне оновлення місця розташування вершин у напрямку до основної правди. На практиці ми спостерігаємо, що мережа, навчена безпосередньо передбачати сітку з великою кількістю вершин, швидше за все, помилиться на початку і

важко виправити пізніше. Однією з причин є те, що вершина не може ефективно отримувати функції з інших вершин з відірваною кількістю ребер, тобто обмеженим сприйнятливим полем.

Щоб вирішити цю проблему, ми розробили графік розкручування шару, який дозволяє мережі ініціювати меншу кількість вершин і збільшуватися під час прямого поширення. З меншою кількістю вершин на початкових етапах мережа вчиться розподіляти вершини навколо найбільш репрезентативного місця, а потім додавати локальні деталі, оскільки кількість вершин згодом збільшується. Окрім шару розгортання графіків, ми використовуємо глибинний GCN (згорткова мережа), підсилений сполученнями ярликів [13], як основу нашої архітектури, яка дає можливість приймати великі сприйнятливі поля для глобального контексту та більше кроків рухів.

Представлення фігури на графіку також корисно для процедури навчання. Відоме з'єднання дозволяє нам визначати функції втрати вищого порядку через сусідні вузли, які важливі для регуляризації фігур 3D. Зокрема, ми визначаємо нормальні втрати поверхні, щоб сприяти гладкій поверхні; втрата краю для заохочення рівномірного розподілу сітчастих вершин для високого виклику; і лаплаціанської втрати, щоб запобігти сітчасті грані не перетинатися один з одним. Усі ці втрати є важливими для створення якісної привабливої сітчастої моделі, і жодна з них не може бути тривіально визначена без графічного подання.

Внески цього документу в основному в трьох аспектах. Спочатку ми пропонуємо нову архітектуру нейронної мережі, що генерує 3D-сітку з одного RGB-зображення. По-друге, ми розробляємо шар проекції, який включає в себе риси перцептивного зображення в геометрію 3D, представлену GCN (згорткова мережа). По-третє, наша мережа передбачає тривимірну геометрію, яка є більш надійною і легкою для вивчення.

Ми оцінюємо потенціал нашого методу для одноразового перегляду реконструкція. Ми якісно порівнюємо наші результати з трьома

найсучасніших методи, PointSetGen, 3D-R2N2 та HSP. Для проведення порівняння для PointSetGen та 3D-R2N2 ми використовували навчених моделі, доступні в Інтернеті авторами. Для HSP, ми попросили авторів запустити їх метод на зображеннях. Зауважте, що оскільки їх модель була навчена зображенням згенерований за допомогою іншого рендерінга, це порівняння не є абсолютно справедливо. Щоб усунути упередження, ми також порівняли нашу результати з HSP на реальних зображеннях, для яких не було навчено жодного із методів, що також демонструє здатність нашої мережі для узагальнення до реальних зображень.

Архітектура генератора точкових наборів (PointSetGen) - це Мережа для прогнозування набору точок ледве вивчена в літературі, залишаючи для нас величезний відкритий простір для дослідження варіантів дизайну. В ідеалі мережа повинна найкращим чином використовувати свої статистичні дані та мати достатню потужність представлення. Ми пропонуємо мережу з двома гілками прогнозування, одна користується високою гнучкістю у захопленні складних структур, а інша використовує геометричну безперервність.

Рисунок 3.8 – Приклад результату PointSetGen.

3D-R2N2 реконструює 3D з одиночних або багатовидових зображень у об'ємне зображення. Щоб увімкнути порівняння, ми повторно тренували наші мережі за набором даних, використовуваним авторами 3D-R2N2.

Рисунок 3.9 – Приклад рузельтату 3D-R2N2

Наша проблема 3D-структурного відновлення з одного зображення є незрозумілою, тому неоднозначність ґрунтової істини виникає під час тестів. Принципово важливо охарактеризувати неоднозначність основної істини для заданого вкладу, і практично бажано мати можливість генерувати численні прогнози. Дивно, але ця мета може бути досягнута тактовно, просто використовуючи мінімальну функцію в якості обгортки для запропонованих вище втрат або за допомогою умовного варіаційного автокодера.

Нейронна мережа успішно відгадує пропущені частини моделі. Використовуючи пріори фігур, вбудовані в сховище об'єктів, система може використовувати сигнали як симетрії (наприклад, літаки повинні мати симетричні сторони), так і функціональності (трактори повинні мати колеса). Гнучке представлення набору точок полегшує вирішення загальної форми та топології об'єкта. Більш дрібнозернисті методи, які безпосередньо використовують локальні геометричні сигнали, можуть бути каскадовані після наших прогнозів для збагачення деталей більш високої частоти.

ВИСНОВКИ

У рамках атестаційної роботи ми представили підхід до отримання 3D-трикутних сіток із окремих зображень. Ми використовуємо ключові переваги, які може представити нам сітчаста презентація, та ключові питання, необхідні для вирішення успіху. Перший включає нормальні обмеження поверхні та розповсюдження інформації по краях; остання включає перцептивні риси, витягнуті з зображень як настанову.

Ми ретельно розробляємо нашу мережеву структуру і пропонуємо дуже глибокий каскадний графічний згортковий нейронну мережу з "ярликом" з'єднання. Сітки прогресивно вдосконалюються нашою мережею, навченою в кінці, зі втратою фаски та нормальною втратою. Наші результати значно кращі за попередні стани, використовуючи інші форми форми, такі як 3D-об'єм чи 3D-хмара. Таким чином, ми вважаємо, що представлення сітки - це наступна велика річ у цьому напрямку, і ми сподіваємось, що ключові компоненти, виявлені в нашій роботі, можуть підтримувати подальші роботи, які надалі сприятимуть прямій реконструкції 3D-сітки з окремих зображень.

Наш метод виробляє лише сітки з тією ж топологією, що і початкова сітка. В майбутньому ми поширимо наш підхід до більш загальних випадків, таких як реконструкція рівня сцени, і навчимося з кількох зображень для реконструкції з кількома видами.

В останні роки фотограмметрія знайшла своє місце в сучасній кіноіндустрії, об'ємне зображення фільмів по так званій 3D технології отримало особливу популярність у молоді. Головний метод мультиплікації з її самого початку розвитку завжди заворожував своїми кінцевими результатами у вигляді популярних мультиплікаційних фільмів.

Особливо слід відзначити застосування технологічного процесу фотограмметрії в розробці сучасних комп'ютерних ігор. Він полягає в покроковому якісному фотосканіровані і отриманні за допомогою

спеціальних програм об'ємної геометрії від численних фотозображень різних ракурсів.

Автоматичне 3D-моделювання - дуже складна і важлива задача, тому що тепер на ці цілі потрібно витратити досить багато обчислювальних і трудових ресурсів.

Розглянута технологія фотограметрії може знайти застосування в медицині, військовій справі, освіті, електронної комерції, кінематографі, анімації, дизайні, індустрії розваг і. Більш того, тепер 3D-графіка може стати повсякденним і повсюдним інструментом і знайти застосування в принципово нових сферах, де раніше її не було й близько.

Результати були апробовані у 32-ому збірнику Національного технічного університету України ”Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” та міжнародної науково-технічної конференції "Наукові теорії сьогодення та перспективи розвитку наукової думки" [45].

У якості подальшого розвитку теми реконструкції у просторі на основі зображень має сенс збільшення кількості зображень для 3D реконструкції, а також використання більш професійного обладнання для вимірювання глибини зображення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Путятин, Е. П. (1990). Обработка изображений в робототехнике. Москва.
2. Путятін, Є. П., Гороховатський, В. О., & Матат, О. О. (2006). Методи та алгоритми комп’ютерного зору: навч. посіб. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ».
3. Гороховатский, В. А. (2014). Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении.
4. Lyashenko, V., Kobylin, O., & Ahmad, M. A. (2014). General methodology for implementation of image normalization procedure using its wavelet transform. *International Journal of Science and Research (IJSR), 3*(11), 2870-2877.
5. Gorokhovatskyi, V., Gorokhovatskyi, O., Yevgenyi, P., & Olena, P. (2018, August). Quantization of the Space of Structural Image Features as a Way to Increase Recognition Performance. In *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)* (pp. 464-467). IEEE.
6. Putyatin, E.P. (2019, September 12). Normalization and image recognition. Retrieved from http://sumschool.sumdu.edu.ua/is-02/ms/lectm-es/pytyatin/pytyatin.htm.
7. Путятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. М: Машиностроение, 1990. 320 с.
8. Гиренко, А. В., Ляшенко, В. В., Машталир, В. П., & Путятин, Е. П. (1996). Методы корреляционного обнаружения объектов. Харьков: АО “БизнесИнформ, 112.
9. Путятин, Е. П. (2012). Нормализация и распознавание изображений [Электронный ресурс]/Сумский гос. ун-т, летняя научно-практическая школа «Интеллектуальные системы». Режим доступа: URL: http://sumschool.sumdu.edu.ua/is-02/rus/lectures/pytyatin/pytyatin.htm.

10. Панченко, Д. С., & Путятин, Е. П. (1999). Сравнительный анализ методов сегментации изображений. Радиоэлектроника и информатика, (4 (9)).

11. Путятин, Е. П., & Гороховатский, А. В. (2006). Построение инвариантных моментных признаков изображений с использованием одномерных проекций.

12. Гороховатский, А. В., & Путятин, Е. П. (2005). Применение преобразования Радона для нормализации изображений.

13. Путятин, Е. П., Яковлева, Е. В., & Любченко, В. А. (1998). Разложение матрицы центроаффинного преобразования для нормализации изображений. Радиоэлектроника и информатика, (4 (5)).

14. Gorokhovatskyi, V., Gadetska, S., & Ponomarenko, R. (2019, May). Recognition of Visual Objects Based on Statistical Distributions for Blocks of Structural Description of Image. In International Scientific Conference "Intellectual Systems of Decision Making and Problem of Computational Intelligence" (pp. 501-512). Springer, Cham.

15. Гороховатский, В. А., Кацалап, С. Ф., & Путятин, Е. П. (1986). Анализ изображений в условиях локальных искажений. Автометрия, (6), 46.

16. Любченко, В. А., & Путятин, Е. П. (2000). Математические модели нормализации перспективы. Проблемы бионики, (53), 22-27.

17. Gorokhovatskyi, V., Vasylchenko, A., Manko, K., & Ponomarenko, R. (2018). Дослідження модифікацій методу встановлення релевантності зображень об'єктів за описами у вигляді множини дескрипторів ключових точок. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 5(51), 74-78.

18. Гороховатский, А. В., & Путятин, Е. П. (2007, September). Распознавание изображений на основе признаков проекций. In Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы: Матер. 8-й Межд. научно-техн. конф.–Донецк: ИПИИ (pp. 203-207).

19. Mashtalir, V., Mikhnova, E., Shlyakhov, V., & Yegorova, E. (2006, November). A novel metric on partitions for image segmentation. In 2006 IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance (pp. 18-18). IEEE.

20. Путятин, Е. П., Гороховатский, В. А., Добрынин, А. А., Ересько, Ю. Н., & Сытник, О. В. (1992). Определение параметров объектов по серии изображений. Автометрия, (4), 18-23.

21. Kinoshenko, D., Mashtalir, V., Yegorova, E., & Vinarsky, V. (2005, July). Hierarchical partitions for content image retrieval from large-scale database. In International Workshop on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition (pp. 445-455). Springer, Berlin, Heidelberg.

22. Geostrat. Фотограмметрия. Retrieved from https://geostart.ru/post/293.

23. Басов С.А (2016). Разработка алгоритма калибровки стереокамер, построения карт глубин различных объектов, в частности, человеческих лиц, для последующего анализа и применения в алгоритмах идентификации. Retrieved from http://elib.spbstu.ru/dl/2/v17-1121.pdf/download/v17-1121.pdf.

24. Литвинов С. (2018). Реконструкция 3D-модели головы по нескольким фотографиям. Retrieved from https://neurohive.io/ru/papers/rekonstrukcija-3d-modeli-golovy/.

25. Журов Х.В (2016). Разработка методики создания 3D моделей сооружений на основе фотосканирования. Retrieved from https://sibsutis.ru/upload/017/%D0%92%D0%9A%D0%A0_%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B0-%D0%A1%D0%B0%D0%BB_%D0%A0%D0%98-27.pdf

26. Galabov M.N. (2017). A Real Time 2D to 3D Image Conversion Techniques. Retrieved from: https://www.researchgate.net/ publication/272474479_A_Real_Time_2D_to_3D_Image_Conversion_Techniques.

27. Azzam J. (2017) всё, что нужно знать о фотограмметрии. Retrieved from: https://habr.com/ru/post/319464/.

28. Курков В.М. (2016). Разработка фотограмметрической технологии обмеров архитектурных объектов. Retrieved from:

http://www.miigaik.ru/upload/iblock/1f0/1f0f6d5b283e77b083e5d2186f2764cc.pdf.

29. Kamal J. (2017). Use of photogrammetry in 3D modeling and visualization of buildings. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/255651498_Use_of_photogrammetry_in_3D_modeling_and_visualization_of_buildings.

30. T. Schenk (2008). Introduction to Photogrammetry. Retrieved from: http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf.

31. Sébastien Lachambre (2017). Unity Photogrammetry Workflow. Retrieved from: https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf.

32. Краснопевцев Б.В. (2011) Фотограмметрия.Retrieved from: http://www.miigaik.ru/upload/iblock/eec/eec5799a3ead6011d48e5c3c2e4a7f2c.pdf

33. Прикладная фотограмметрия. Retrieved from: https://docplayer.ru/54183241-Konspekt-lekciy-po-discipline-prikladnaya-fotogrammetriya-obshchie-svedeniya-o-prikladnoy-fotogrammetrii.html.

34. Все о 3D-сканерах: от разновидностей до применения. Retrieved from: https://can-touch.ru/blog/vse-o-3d-skanerax/

35. Котюжанский Л.А. (2019) Вычесление карты глубины стереоизображения на графическом процессре в реальном времени. Retrieved from: https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30010.

36. Технологии лазерного сканирования. Retrieved from: https://www.vnedra.ru/tehnika/oborudovanie/tehnologii-lazernogo-skanirovaniya-102/.

37. Безменов В.М. (2010). Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции. Retrieved from: http://old.kpfu.ru/f6/b_files/fotogram_triang_!262.pdf.

38. Герасимов С.И., Костин В.И. (2015) Калибровка неметрических цифровых фото,и видеокамер для фотограмметрических измерений. Retrieved from: https://qps.ru/RhOp4.

39. En.wikipedia.org. Цифровая фотограмметрия и бесконтактные измерения. Retrieved from: https://qps.ru/4DZb8.

40. Кривенко Ю. (2016). Дисторсия. Retrieved from: http://funphoto.ua/rus/distorsio.php.

41. Hable J. (2018) AliceVision: фотограмметрия из командной строки. Retrieved from: https://habr.com/ru/post/422807/

42. En.wikipedia.org. 3D reconstruction from multiple images. (2019) Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/ 3D_reconstruction_from_multiple_images

43. Kurakin, A (2011) Основы стереозрения. Retrieved from https://habr.com/ru/post/130300/.

44. Шевченко В. М., Дослідження реконструкції моделей в просторі на основі зображень [Текст] / А. С. Вовк, наук. керівник Є.П. Путятін // Наукові теорії сьогодення та перспективи розвитку наукової думки: матеріали міжнародної наукової конференції (Т. 1), 11 жовтня, 2019 рік. Київ, Україна: МЦНД.