

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Згорткова мережа для візуалізації
3D-моделі з 2D зображення

Виконав:
студент II курсу, групи КІТМ-19-1
Ващенко А.С.

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерні інтелектуальні технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник: проф. Аксак Н.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТС Руденко О.Г.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра _____ Комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
Спеціальність _____ 123 – Комп'ютерна інженерія
Тип програми _____ Освітньо-професійна
Освітня програма _____ Комп'ютерні інтелектуальні технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.

кафедри

(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Ващенко Андрію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Згорткова мережа для візуалізації 3D-моделі з 2D зображення

затверджена наказом по університету від “ 11 ” листопада 2020 р. № 1582 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 грудня 2020 р.

3. Вхідні дані до роботи Згорткова нейронна мережа

Візуалізація 3D-моделі використовуючи 2D зображення

Фотограмметрія

Машинне навчання

Програмна бібліотека TensorFlow

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Актуальність 3D моделювання та нейронних мереж

Аналіз сучасних методів 3D моделювання

Нейромережа для створення 3D моделі на основі 2D зображення

Моделювання згорткової мережі для візуалізації 3D-моделі та порівняння з сучасними

та порівняння з сучасними методами

Висновок

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 10

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд стану проблеми та постановка задачі	11.11 – 12.11	
2	Аналіз літератури за напрямком магістерської роботи	12.11 – 17.11	
3	Вибір методів рішення для реалізації та їх обґрунтування	18.11 – 25.11	
4	Розробка згортоква нейронної мережі для візуалізації 3D-моделей на основі 2D зображення	25.11 – 2.12	
5	Оформлення пояснювальної записки	3.12 – 10.12	
6	Оформлення графічної частини	11.12 – 14.12	

Дата видачі завдання 11 листопада 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Аксак Н.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 78 с., 27 рис., 4 табл., 2 дод., 23 джерела.

ЗГОРТКОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, 3D-МОДЕЛЮВАННЯ, ФООГРАММЕТРІЯ, МАРШОВІ КУБИ, TENSORFLOW, CUDA, PYTHON, CPU, GPU.

Метою атестаційної роботи є розробка згорткової нейронної мережі для візуалізації 3D-моделей з 2D зображень.

У ході виконання атестаційної роботи розроблена згорткова нейронна мережа для візуалізації 3D-моделей на основі 2D зображення. Описаний метод моделювання тривимірної фігури за допомогою знакової функції відстані. Нейронна мережа створена за допомогою інструментів CUDA, Python та TensorFlow.

Система оснащена зручним користувацьким інтерфейсом та задовольняє усім функціональні вимогам.

ABSTRACT

Master's thesis: 78 pages, 27 figures, 4 tables, 2 appendices, 23 sources.

CONVOLVED NEURAL NETWORK, 3D SIMULATION, PHOGRAMMETRY, MARCHING CUBES, TENSORFLOW, CUDA, PYTHON, CPU, GPU.

The major goal of this thesis is to develop a convolutional neural network for visualization of 3D models from 2D images.

During the attestation work, convolutional neural networks were developed for visualization of 3D-models based on 2D images. The method of modeling a three-dimensional figure using the signed distance function is described. Neural Networks Created with CUDA, Python and TensorFlow TOOLS. The system is equipped with a user-friendly interface and meets all functional requirements.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
1 АКТУАЛЬНІСТЬ 3D МОДЕЛЮВАННЯ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	10
1.1 Історія виникнення 3D моделювання.....	10
1.2 3D-моделювання та засоби його застосування	14
1.3 Перспективи розвитку 3D в медицині.....	19
1.4 3D моделювання у промисловості.....	20
1.5 Сучасна архітектура та 3D	22
1.6 Постановка задачі.....	24
2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ 3D МОДЕЛЮВАННЯ	25
2.1. Класичне моделювання об'єктів.....	25
2.2 Фотограмметрія	31
2.3 Нейромережі для створення 3D моделей.....	37
2.4 Система DIB-R (differentiable interpolation-based renderer)	41
2.5 Нейронна мережа S3DPO	42
3 НЕЙРОМЕРЕЖА ДЛЯ СТВОРЕННЯ 3D МОДЕЛІ НА ОСНОВІ 2D ЗОБРАЖЕННЯ.....	44
3.1 Огляд методів обробки зображень	46
3.2 Метод моделювання тривимірної фігури за допомогою знакової функції відстані	47
3.2.1 Оцінка пози камери	49
3.2.2 Прогнозування SDF із згортковою нейронною мережею	51
3.3 Реконструкція ізоповерхні	53
4 МОДЕЛЮВАННЯ ЗГОРТКОВОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ 3D- МОДЕЛІ ТА ПОРІВНЯННЯ З СУЧАСНИМИ МЕТОДАМИ.....	54
4.1 CUDA	54

4.2 TensorFlow	56
4.3 Порівняльний аналіз 3D-реконструкції.....	57
4.4 Порівняльний аналіз створеної реконструкції.....	59
4.5 Оцінка параметрів камери.....	62
ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69
ДОДАТОК А	71
ДОДАТОК Б	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

2D – двовимірна графіка

3D – тривимірна графіка

VR – віртуальна реальність

CNN – згорткова нейронна мережа

ГІС – геоінформаційні системи

6D – шестивимірна графіка

AI – штучний інтелект

ПЗ – програмне забезпечення

CD – відстань пазу

SDF – знакові функції відстані

SfM – структура з руху

IoU – індекс перетину

ВСТУП

На сьогоднішній день 3D моделювання є однією з найпоширеніших професією в галузі ІТ технологій. Але більше всього вона застосовується в сфері розваг: відеоігри, кіно, реклама або мультиплікації. Розробка моделей займає занадто багато часу, саме тому на ринку стали технології, котрі зможуть зробити модель лише по одному зображенню, але на даний момент ці технології не мають можливості абсолютно чітко передати об'єм, форми та деталі, але можуть облегшити життя 3D художникам, беручи на себе чимало рутинної роботи.

До таких технологій належить фотограмметрія, яка застосовується в тих випадках, коли немає можливості відтворити 3D-модель за кресленнями. До того ж, така технологія дозволяє проводити моделювання великих географічних або промислових об'єктів без проведення натуральних вимірювань. Крім того, цей вид моделювання корисний для проведення дистанційних вимірів в умовах, де перебування людини може бути небезпечним [1].

Але значну нішу в цих технологіях займає машинне навчання. Вже давно визнали, що машинне навчання одне з найуспішніших, конструктивних, універсальних і оптимальних методів для розпізнавання об'єктів на зображеннях, відеофрагментів і електронних записах [2]. Машинне навчання показало і продовжує показувати величезне збільшення точності алгоритмів з детектування. Але чільне місце на даний момент в області машинного навчання займають згорткові нейронні мережі, які бездоганно довели свою ефективність, і не перестають покращувати результат, тому буде використовуватися саме цей метод.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ 3D МОДЕЛЮВАННЯ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

1.1. Історія виникнення 3D моделювання

В 70-тих А. Сазерленд винайшов і розробив перше програмне забезпечення для 3D-моделювання. Sketchpad [3] був першою програмою для тривимірного моделювання простих об'єктів, таких як куби або призми, доступних для персонального комп'ютера. Хоча комп'ютер був занадто дорогим і недоступним для звичайної людини в 70-х роках, з'явилося перше програмне забезпечення для 3D-моделювання, яке призвело до революції серед художників і архітекторів.

Незабаром після цього, використовуючи примітивне програмне забезпечення для тривимірного моделювання, Ед Кетмулл створив вигнуту реалістичну модель свого зап'ястя (рис. 1.1), яка привнесла деяку реалістичність в візуалізацію. Кетмалл також розробив Z Buffering [4] – алгоритми накладення текстур, критично важливі для відображення бікубічних поверхонь і форм.



Рисунок 1.1 – Перша у світі 3D модель

Ще однією важливою людиною в розробці 3D візуалізації і рендеринга, був Мартін Ньюелл. Створюючи прості тривимірні форми, він створив

чайник [5]. Чайник Юти тепер є символом рендеринга. Майже всі програми 3D-рендеринга мають значок для запуску процесу рендеринга, який виглядає як зображення чайника Ньюелла.

Використовуючи алгоритми для накладення текстур Кетмулла, Джим Блінн був першою людиною, який застосував накладення текстур і рельєфу в тривимірну модель. Прості тривимірні моделі несподівано стали реальністю. Вони не були гіперреалістичними, як сьгоднішні візуалізації, але достатньо реалістичними, щоб почати революцію і кардинально змінити світ візуалізацій. Грунтуючись на методах Кетмулла, Блінн додав алгоритм відображення і сканування для бікубічних патчів. Після того, як все стало більш доступним і покращеним, Блінн почав створювати 3D-анімацію. Таким чином, крім архітектури і промислового дизайну, 3D-візуалізація також вплинула на індустрію анімації. Оскільки в 80-ті роки метод Джима Блінна включав в себе моделі і концепції накладення текстур, в тому числі моделі бінарного поділу простору (BSP) [6], архітектори почали використовувати фрактали в комп'ютерній графіці. Коли вони зрозуміли, наскільки корисна тривимірна візуалізація, багато хто з них зацікавилися курсами комп'ютерного проектування. 3D-анімація була більш привабливою, ніж класичний рендеринг, але деякі архітектори та художники відзначили важливість 3D-рендеринга.

Протягом 80-х років програми тривимірної візуалізації стали більш доступними. Кращі архітектори та художники світу, такі як Заха Хадід і Пітер Ейзенман, перейшли від ручного малювання до процедурного дизайну. " The Peak ", 1983 Заха Хадід, є однією з її перших візуалізацій, виконаних за допомогою комп'ютерної графіки

В 90-ті роки було розроблено програмне забезпечення для 3D-візуалізації, яке ми всі ще використовуємо. Програми візуалізації і моделювання Autodesk 3D, як і багато інших програм візуалізації, засновані на трасуванні променів. Програмне забезпечення SynthaVision було першою програмою рендеринга, що застосувала цей принцип.

Хоча в кінці вісімдесятих років Том Хадсон створив додаток THUD для 3D-моделювання, в 1990 році Autodesk випустила першу 3D studio під DOS. Грунтуючись на п'яти модулях – шейпері, лофті, редакторі, редакторі матеріалів і підборі ключів, Хадсон і Ден Сільва випустили першу Autodesk 3DS Max. При цьому Autodesk [7] виступав тільки видавцем, а права на програмний пакет були викуплені лише в 2001 році. Перша версія була зручна для малювання сплайнів ліній, лофтових поверхонь, геометричних примітивів і базового редагування сітки, що також є фундаментальною особливістю останньої версії Autodesk 3DS Max.

На відміну від цього, сучасне програмне забезпечення для візуалізації набагато швидше і потужніше. Грунтуючись на наявних знаннях, розробники програмного забезпечення 3D створили потужні і корисні функції і дали нам кращі програми моделювання. Розглядаючи всю ситуацію з цієї точки зору, можна припустити, що кожен крок розвитку відбувався з певної причини. Новітні інструменти і гаджети для візуалізації забезпечили ще кращий користувальницький досвід. П'ятдесят років тому, коли з'явилося перше програмне забезпечення для 3D-моделювання, ніхто не міг сказати, що воно перетвориться на щось таке ж велике і вражаюче, як зараз. Основною метою технологічного розвитку є задоволення користувачів.

Технологія 3D-друку [8] просто вразила світ, коли вона вперше стала широко доступною кілька років тому. Після 50-ти років 3D-візуалізації розробники представили машину, здатну друкувати візуалізовані об'єкти. Спочатку 3D-принтери були призначені для певних галузей архітектури, дизайну і 3D-мистецтва, але найбільш швидко зростаюче відкриття охопило всі вертикалі нашого суспільства. Завдяки цим інтелектуальним машинам 3D візуалізація стала відчутною і більш корисною, ніж будь-коли. Візуалізовані текстури, завдяки 3D-принтерам, тепер можна торкатися і відчувати. Модернізовані версії 3D-принтерів можуть виробляти практично все, використовуючи різні матеріали, навіть продукти харчування. Існує ідея, що 3D-принтери повністю змінять ліки, використовуючи органічні речовини для

друку функціональних 3D-органів. Таким чином, 3D-візуалізація може стати чимось більшим, ніж мистецтво, і навіть знизити рівень смертності.

Перша поява VR-обладнання повністю змінила підхід до 3D-візуалізації [9]. Хоча програми для візуалізації були придатні для створення 3D-анімації протягом майже 40 років, поява гарнітур VR додало ще один вимір в 3D-візуалізацію. Наприклад, гарнітура HTC VR сумісна з останньою версією Autodesk 3DS Max, що означає, що архітектори, 3D-художники і дизайнери можуть відчувати візуалізований простір. Крім цих галузей, таке обладнання торкнулося ігрової індустрії і багато інших креативні компанії. Відомо, що тривимірна візуалізація пов'язана з творчими областями і галузями, але після появи обладнання для віртуальної реальності використання цього виду візуалізації поширилося на багато інших галузей.

Коли всі думали, що тривимірна візуалізація розвивається в повну силу, компанія Zebra Imaging Inc. довела, що всі помиляються. Те, що можна побачити тільки в науково-фантастичних фільмах, стало нашою реальністю в 2017 році. Починаючи з монохромного 2D-малюнка, простих 3D-малюнків з використанням неякісних програм, всього за 50 років мрія багатьох дітей по всьому світу здійснилася за одну ніч – передові голографічні образи нарешті стали реальні.

Новітнє середовище для відображення 3D-візуалізації з використанням голографічних зображень корисна в різних галузях, крім архітектури, включаючи військові, роздрібну торгівлю, медицину та інші.

VR-обладнання допомагає архітекторам залучити інвесторів і клієнтів, оскільки за допомогою такого пристрою вони можуть досліджувати уявний простір і впливати на подальший розвиток ідеї. Крім того, обладнання VR полегшує співпрацю на відстані і дозволяє компаніям з країн, що розвиваються приєднуватися до провідних світових компаній. Оскільки новітні технології розвиваються досить швидко, ми можемо тільки уявити, що станеться через кілька років. Голограми можуть стати нашим основним інструментом для візуалізації, точно так, як ПК з програмою для 3D-

візуалізації, яка була недоступна 50 років тому і зараз поширена, і ніхто не міг уявити, в якому напрямку вона буде розвиватися.

1.2 3D-моделювання та засоби його застосування

Тривимірна графіка сьогодні упевнено увійшла в наше життя і активно застосовується для створення зображень величезною кількістю студій комп'ютерної графіки, в кінематографі, рекламній та ігровій індустрії, в науці, промисловості, архітектурної візуалізації, в креативі революційних електронних гаджетів, широко застосовується в наукових дослідженнях, не залишилося області конструювання і проектування, що не використовувала б можливостей тривимірного моделювання об'єктів. 3D-дизайн завдяки сучасним програмам володіє багатим спектром можливостей і дозволяє побачити ще неіснуюче, відтворити будь-які проекти і фантазії. А це означає, що існує безліч галузей, де потрібні творчі люди, здатні втілювати в життя неповторні ідеї та досягати бажаних результатів, для яких відкриваються такі цікаві і затребувані професії, як дизайнер інтер'єру, промисловий дизайнер, 3D-моделер, 3D-візуалізатор, 3D-художник, 3D-аніматор, відео-дизайнер.

3D-моделлю називається цифровий «відбиток» віртуального і реального об'єкта в об'ємному вигляді. Для створення таких елементів використовується спеціальне програмне забезпечення, перелік опцій якого має базовий набір, спрямований на виконання циклу завдань, а також кілька специфічних функцій, властивих тільки тій чи іншій програмі. Тобто, 3D-принтером називають пристрій, здатний роздруковувати тривимірні об'єкти із спеціально розробленого пластику, що використовується замість класичного стандартного носія. 3D-фільм – це кінострічка, яка володіє підвищеним ступенем реалістичності через те, що картинка в кадрі представлена не у вертикальній площині, а у вигляді об'ємного зображення.

Виходячи з цього визначення, можна сказати, що 3D-моделювання являє собою процес, під час якого створюються об'ємні цифрові зображення

зворотнього об'єкта (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – 3D-модель будівлі

Існує кілька видів моделювання, в залежності від поставлених завдань. Так, наприклад, геймери створюють моделі для ігор з алгоритмом, який не підходить для інженерів-проектувальників будівель і інших конструкцій міської інфраструктури, а медичне моделювання зовсім несхоже з програмами, які використовують комп'ютерники, будують моделі для 3D-друку.

Але, незважаючи на такі відмінності, алгоритм моделювання, званий полігонній технікою, схожий для всіх напрямків. Так, поверхня 3D-моделей складається з набору візуалізованими геометричних трьох- або чотиригранних фігур, з'єднаних в один об'єкт під різними кутами. Щоб вони почали рухатися, змінюються параметри однієї з фігур, а оскільки вони пов'язані між собою, то зміна цих параметрів відразу викликає зміни даних інших полігонів, і модель починає виконувати програмовані дії.

3D-моделювання сьогодні використовується в безлічі галузей для вирішення таких завдань:

- створення комп'ютерних ігор, мультфільмів і повнометражних художніх фільмів;
- конструювання елементів внутрішніх органів в новому напрямку

медицини;

- візуалізації дизайн-проектів;
- оцінки техніко-експлуатаційних параметрів, що будується або іншого будівельного об'єкта;
- створення зменшених або збільшених прототипів виробу;
- підготовки об'єктів до друку.

Так, наприклад, особливо значущу роль відіграє 3D-моделювання в індустрії розваг [10], яку сьогодні неможливо собі уявити без таких об'єктів, адже віртуальні простори, чудовиська, космічні мутанти і навіть історичні епохи всіх комп'ютерних ігор і багатьох фільмів створюються за допомогою застосування тривимірної графіки. З індустрією розваг ми стикаємося майже кожен день. Щоб почати створювати тривимірну графіку, потрібно мати уявлення про основні інструменти (3D редакторах) і етапах виробництва (pipeline) 3D моделей.

Створення комп'ютерної графіки в фільмах – колосальна робота, над якою працюють сотні професіоналів. Від сценаристів і режисерів до цілої армії 3D-художників: вони займаються моделюванням, текстуруванням, анімацією, ріггінгом, спецефектами, візуалізацією персонажів і віртуального світу (рис.1.3). Основні чинники в процесі створення графіки: терміни робіт; рівень складності і якості моделей; бюджет проекту.



Рисунок 1.3 – Приклад накладення графіки у кінофільмах

На відміну від фільму, гра – це інтерактивна взаємодія людини і віртуального світу. Тому головні чинники при створенні гри: інтерактивність, безперебійне функціонування та візуальний аспект.

Процес моделювання для фільмів та ігор в цілому схожий, однак існують деякі відмінності, а саме:

У моделях для фільмів можна використовувати криві поверхні (NURBS-моделювання) і полігони (полігональне моделювання). В іграх зазвичай використовують тільки полігональні моделі, їх простіше всього візуалізувати. Чим більше полігонів у об'єкта, тим вище деталізація і якість. У зв'язку з цим виділяють високополігональні (high poly) і нізкополігональних (low poly) моделі. Для фільмів зазвичай створюють високополігональні моделі, рендеринг яких, проходить по кілька годин, а то й днів. В іграх же використовуються нізкополігональних моделі, візуалізація відбувається прямо по ходу гри. Часто в комп'ютерних іграх зустрічається LOD-технологія (Level of Detail – «рівень деталізації»). Вона полягає в спрощенні 3D-моделей шляхом підміни їх на більш примітивні, коли віртуальна камера (гравець) віддаляється від них. Це розвантажує систему, і вона працює над повною обробкою тільки об'єктів в межах видимості.

Хоча релізи деяких нових ігор і демонструють якісне поліпшення графіки, у графічних дизайнерів стоїть складне завдання: створити відчуття високої якості при обмеженій кількості полігонів. Існує багато програм для моделювання. Безперечним лідером є Autodesk Maya, далі йдуть Autodesk 3Ds Max і Cinema 4D. Також можна виділити Modo і Blender. Перевага останнього – безкоштовність.

В останні роки індустрія моди теж виявляла велику цікавість до 3D-технологій. Завдяки зниженню вартості 3D принтерів і впливу адаптивної технології на обробку промисловість дизайнери одягу тепер використовують 3D-друковані дизайни в якості ще одного творчого інструменту. Інженери працюють з дизайнерами одягу і створюють модні гардероби вищого класу. Зрозуміло що роль 3D в моді стає дедалі більше, представляючи кутюр'є

полотна для творчого самовираження. А тепер саме час ознайомитися з реальними прикладами використання тривимірних технологій в області створення одягу.

Не занурюючись в деталі виробництва розділимо традиційний процес створення одягу на етапи: ескіз / технічний рисунок; створення лекал; створення тестового зразка (пошив першого виробу); внесення змін.

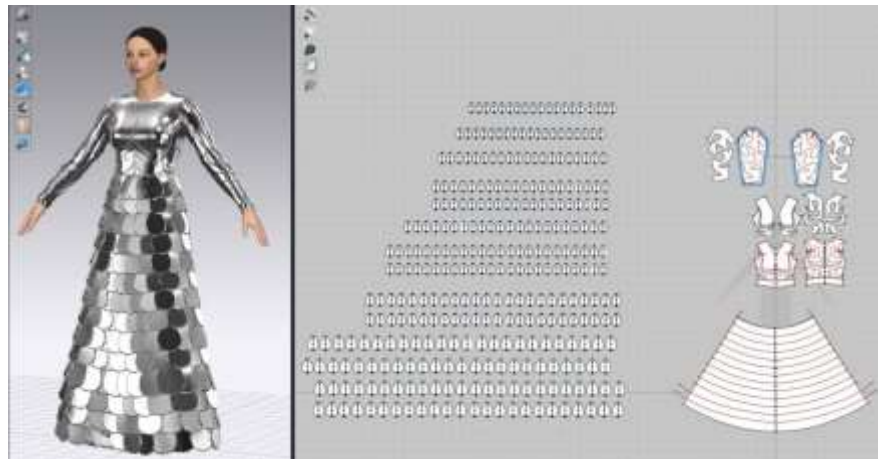


Рисунок 1.4 – Приклад роботи програми для 3D-дизайну одягу

Зараз технології візуалізації дають можливість імітувати поведінку абсолютної більшості тканин на моделі людини (рис 1.4). Без використання тканин для першого зразка є можливість побачити в яких місцях є потенційні розриви в разі помахів рук і рухів тіла. Також видно все провисання тканини і інші моменти, які побачиш тільки після пошиття першого зразка. Кожен 3D-дизайнер підтвердить, що найскладніша частина роботи – це надання максимальної реалістичності виробу і подальше використання лекал для пошиття одягу в промислових масштабах [11].

Для створення зразка одягу необхідні наступні компоненти:

- модель людини, яка називається аватар (англ. avatar). Дизайнер може задавати всі параметри фігури (зріст, талія, обхват грудей). Наприклад, при розробці одягу для спортсменів використовуються аватари із заданими параметрами, які характерні для даного виду спорту;
- лекала (англ. sewing patterns). Готові лекала можуть

імпортуватися в програмні комплекси або створюватися з нуля безпосередньо в програмі. Для того щоб правильно розкласти складові частини виробу необхідний досвід дизайну і створення реальних виробів:

- параметри тканини;
- фурнітура;
- принти.

На базі компонентів дизайнер створює виріб і моделює поведінку аватара (проходження по подіуму, біг, танець) для того, щоб оцінити як одяг поведе себе в реальному житті. Важливою складовою є можливість вивантаження лекал для подальшої передачі у виробництво.

1.3 Перспективи розвитку 3D в медицині

Медицина стала однією з перших галузей, яка вирішила використовувати потенціал 3D-принтерів в практичних цілях. Рухаючись від простого до складного, провідні медики підбирали способи впровадження адитивного друку у лікарську справу.

Творці 3D-принтерів також не стояли на місці, розробляючи матеріали, які ідеально підходять для друку зубних імплантатів, протезів, прототипів людських органів і навіть знайшли спосіб друку біологічним матеріалом [12].



Рисунок 1.5 – Приклади робіт 3D принтеру

У наш час тривимірний друк використовується практично у всіх галузях медицини: стоматології, протезуванні, хірургії та мікрохірургії очей, гінекології та багатьох інших.

3D-моделювання в медицині дозволяє створювати об'ємні моделі. Технологія знайшла застосування в естетичній стоматології, онкології, отоларингології та інших сферах.

Тривимірні моделі, надруковані на основі адитивних технологій укупі з комп'ютерною томографією, стали одним з незамінних досягнень в галузі медицини. Тривимірні знімки хворих органів трансформуються в картинку з високою якістю, а потім перетворюються в 3D-моделі.

Моделювання дає можливість максимально якісно підготуватися до проведення операції і вивчити особливості хвороби. Наприклад, при підготовці до операції з видалення пухлини лікарі ретельно вивчають розміри, форму, контури новоутворення в тривимірному вимірюванні, щоб зрозуміти, яку тактику обрати під час операції.

Підготовка до операцій за допомогою 3D-моделювання проводиться за наступним алгоритмом:

- сканування потрібного органу / пухлини;
- створення програмою тривимірного зображення;
- друк прототипу;
- вивчення моделі;
- вибір методики лікування або операції.

Таким чином, сучасні 3D-принтери допомагають лікарям належним чином підготуватися до проведення операції.

1.4 3D моделювання у промисловості

3D моделювання – це процес створення віртуальних об'ємних моделей будь-яких об'єктів, що дозволяє максимально точно уявити форму, розмір,

текстуру об'єкта, оцінити зовнішній вигляд і ергономіку виробу. Це відмінний інструмент для будівельних організацій, студій дизайну інтер'єру, ювелірних майстерень, промислових підприємств, які готують до виробництва нові вироби.

Тривимірна графіка активно застосовується для створення зображень на площині екрану або аркуша друкованої продукції в науці і промисловості, наприклад, в системах автоматизації проектних робіт, архітектурної візуалізації, в сучасних системах медичної візуалізації.

Використання 3D моделювання для вирішення завдань промислового підприємства дає деякі переваги:

- зниження витрат на виготовлення будь-яких виробів;
- дуже швидка розробка нових виробів;
- простота використання готових виробів.

Як матеріал для виготовлення виробів з 3D моделей найчастіше використовується пінопласт, але також можна використовувати: пластмасу, дерево та метал (рис. 1.6 (а)).



а)

б)

Рисунок 1.6 – а) 3D модель незнімної опалубки б) Приклад створення каркаса будинку з деталей незнімної опалубки

З таких деталей дуже легко і швидко зводяться конструкції нерухомості типу: будинок, гараж або будь-яка інша не дуже масивна конструкція (рис. 1.6 (б)).

Використання програми для 3D моделювання в промисловій сфері дає колосальну перевагу над аналоговими методами проектування і, при грамотному підході, може стабільно підвищити рівень підприємства за рахунок збільшення асортименту продуктів, що поставляються.

1.5 Сучасна архітектура та 3D

Динамічний розвиток сучасної архітектури – це постійне вдосконалення процесів, спрямоване на оптимізацію не тільки проектування, але і безпосередньо будівництва різних об'єктів. Сьогодні найбільш ефективним методом цієї оптимізації є активне застосування передових 3D технологій, що дозволяють вивести візуальні, конструктивні, інженерні та технічні рішення на новий рівень. Традиційне архітектурне проектування – це створення документації текстового і графічного характеру. Використання тривимірного моделювання та об'ємної друку в процесі проектування істотно спрощує і прискорює створення функціональних прототипів – в результаті архітектор і замовник отримують функціональний прототип, робота по фіналізації якого займає мінімум часу і володіє максимальною ефективністю.



Рисунок 1.7 – Приклад втілення ідеї у віртуальний простір

Архітектурне макетування пов'язане з великою відповідальністю – якість моделі визначає функціональні і експлуатаційні характеристики

майбутнього об'єкта і, як наслідок, є невід'ємною складовою задоволеності клієнта або замовника. Більшою мірою 3D моделювання сьогодні затребуване в замиському і комерційному житловому будівництві, проте є і багато масштабних проєктів, уявити які без використання 3D технологій практично неможливо.

Технологічна візуалізація з демонстрацією віртуальної моделі – запорука успіху в залученні інвестицій в об'єкти, що будуються і в продажі вже існуючих, так як 3D модель – це наочність.

Переваги застосування 3D технологій в архітектурі:

- швидкість в створенні макета – процес ручного макетування в залежності від складності проєкту може зайняти до декількох місяців, в той час як 3D друк дозволить вже через кілька годин отримати функціональну і максимально точну візуалізацію;

- економія коштів – для створення моделі використовуються доступні витратні матеріали на основі гіпсу, недорогі фотополімери і пластик ABS (найбільш дешевий в сегменті расходник);

- відсутність необхідності в постобробці та фарбуванні зразка – сучасні 3D принтери здатні відтворити будь-яке колірне рішення в СМΥК-палітрі;

- відмінна якість деталізації – більшість призначених для використання в галузі архітектури 3D девайсів мають високі показники точності побудови і дозволу;

- надійність моделі – щільна структура матеріалу виробництва гарантує велику довговічність готового виробу в порівнянні з аналогами, які отримуються при ручному моделюванні, також об'єкт може зазнавати деяких видів постобробки.

Наочність – золоте правило архітектурного проєктування, а з застосуванням 3D технологій дизайнери та архітектори отримують можливість якісно поліпшити, прискорити і спростити процеси моделювання завдяки високій продуктивності 3D принтерів і низьких показників

отходности матеріалів. Якщо задуматися, ще кілька років тому про 3D друк говорили, як про щось екзотичне і практично недоступе, проте сучасний ринок повний пропозиціями на будь-який смак і гаманець. Сьогодні покупка 3D принтера є інвестицією в професійний та особистий розвиток архітекторів і дизайнерів, дозволяє оптимізувати робочі процеси, збільшити кількість проектів, які одночасно можуть перебувати в роботі у фахівця і, відповідно, якісно вплинути на динаміку розвитку бізнесу. До цього слід додати зростаючу доступність 3D принтерів – якщо раніше мова йшла про сотні тисяч доларів, то сьогодні дозволити собі покупку можуть практично всі професійні архітектурні, конструкторські та дизайнерські бюро.

1.6 Постановка задачі

Мета магістерської роботи – розробка згорткової нейронної мережі для візуалізації 3D-моделей з 2D зображень.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- дослідити моделі та методи побудови згорткових нейронних мереж;
- розглянути існуючі методи навчання згорткових нейронних мереж;
- розглянути різновиди візуалізаторів 3D моделей;
- розробити та реалізувати згорткову мережу візуалізації 3D-моделей з 2D зображень.

2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ 3D МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Класичне моделювання об'єктів

Традиційне малювання здійснюється тільки в двох осях – X і Y , при цьому видно тільки одну сторону зображеного предмета. У 3D зображенні додається третя вісь Z – вісь глибини. За її допомогою виходить уявити інформацію про всі сторони предметів.

Перша перевага даного методу полягає в тому, що при наявності моделі 3D художнику досить розмістити її в кадрі і анімувати, а отримання фінального зображення лягає на спеціальну програму-візуалізатор (render).

Друга перевага в тому, що одна тривимірна модель може бути використана велику кількість разів в різних проектах, так як її можна легко змінювати, деформувати і міняти зовнішній вигляд на свій розсуд. Зі звичайним двовимірним малюнком такі дії не завжди можливі.

Третя перевага полягає в можливості створення сильно деталізованих моделей, аж до гвинтиків на годиннику. На загальному плані це не завжди може бути видно, але варто лише наблизити камеру і візуалізатор розрахує, що видно в кадрі, а що – ні.

Найпопулярнішим способом моделювання є полігональне моделювання. Суть цього методу в тому, що поверхня моделі задається у вигляді двовимірних геометричних примітивів – трикутників для комп'ютерних ігор, для інших цілей – чотирикутники і інші багатокутники. Ці багатокутники, з яких складається модель, називаються полігонами. В основному, при створенні 3D моделі, намагаються використовувати чотирикутники, тому що при експорті моделі в ігровий движок чотирикутники легко перетворюються в трикутники, а при необхідності згладжування модель з чотирикутників виходить без артефактів.

Чим більше полігонів містить модель, тим більше ця модель схожа на

оригінал. Однак, у великої кількості полігонів є і свої мінуси – зниження продуктивності. Велика кількість полігонів відповідає великій кількості точок, за якими вони будуються, що призводить до збільшення кількості даних, які доводиться обробляти процесору. Тому при створенні моделі часто доводиться йти на компроміс між продуктивністю і деталізацією моделі. У зв'язку з цим виникли такі терміни, як *high poly* (високополігональна модель) і *low poly* (нізкополігональна модель). У комп'ютерних іграх застосовуються нізкополігональні моделі, тому що візуалізація в іграх виконується в реальному часі.

Після етапу моделювання виходить лише математична модель, яка містить інформацію тільки про геометричній формі об'єкта. Для того, щоб надати моделі потрібний колір і відображення, використовуються текстури.

Текстура – це двовимірний малюнок, який накладається на тривимірну модель. Текстури бувають процедурними (тобто згенеровані за допомогою алгоритму) і намальованими в графічному редакторі. Текстура задає тільки малюнок і колір моделі, а відображаючи здатність, переломлення, рельєф і прозорість задаються у властивостях матеріалу. З точки зору тривимірної графіки, матеріал – це математична модель, яка описує параметри поверхні.

Перед тим, як накласти текстуру на модель, необхідно зробити її розгортку, тобто уявити поверхню моделі у вигляді проекції на площину.

Таким чином створення тривимірної моделі складається з декількох стадій:

- вивести ескізу моделі або ж пошук зображення того, з чого буде створена модель;
- моделювання геометричної форми об'єкта на основі ескізу або зображення;
- створення розгортки;
- створення текстур;
- налаштування параметрів матеріалу (текстур, відображення, заломлення, прозорості і т.д.);

Після виконання цих пунктів модель готова для візуалізації або ж можна продовжувати з нею роботу: налаштування ригінгу моделі та створення анімації.

У 3D графіці після виготовлення моделі її потрібно помістити в сцену до інших об'єктів, додати камеру і освітлення, і тільки після цього можна отримати фінальне зображення. Це зображення прораховується на основі фізичної моделі, це модель поширення променя світла з урахуванням відображення, заломлення, розсіювання і т.д. При традиційному малюванні художник сам малює відблиски, відображення, тіні і т.д., а в 3D графіці автор готує сцену з урахуванням геометрії, матеріалів освітлення, властивостей камери, і візуалізатор сам розраховує підсумкове зображення.

Тривимірні системи працюють з трьома координатами таким чином, при якому зміна одного виду призводить до змін на інших 13 видах. Деякі 3D системи включають в себе такі засоби автоматичного аналізу фізичних характеристик, як моменти інерції, вага, і т.д. Методи тривимірного моделювання бувають трьох видів: каркасне (дротове) моделювання, твердотільне (об'ємне, суцільне) моделювання та поверхневе (полігональне) моделювання;

Каркасна модель – це модель, яка повністю описується в термінах ліній і точок. Цей спосіб моделювання має великий ряд обмежень і вважається методом моделювання найнижчого рівня. Більшість обмежень виникає через брак інформації про грані, які знаходяться між лініями, і неможливості виділити зовнішню та внутрішню частину зображення об'ємного твердого предмета. До недоліків каркасної моделі можна віднести:

- неоднозначність – це необхідність подання всіх ребер для того, щоб представити модель;
- обмежений клас об'єктів для моделювання – неможливість розпізнавання криволінійних граней істотно звужує коло об'єктів, можливих для моделювання;
- відсутність даних про взаємне розташування двох об'єктів;

- помилки в обчисленні фізичних характеристик об'єкта;
- неможливість виконання тонових зображень через відсутність даних про грані.

Однак не можна сказати, що цей спосіб моделювання зовсім марний. Каркасна модель вимагає менше витрат ресурсів комп'ютера і підходить для вирішення простих завдань. Часто цей метод використовується не при моделюванні, а при відображенні готових моделей як один з методів з візуалізації. Приклад каркасного моделювання зображено на рисунку 2.1.

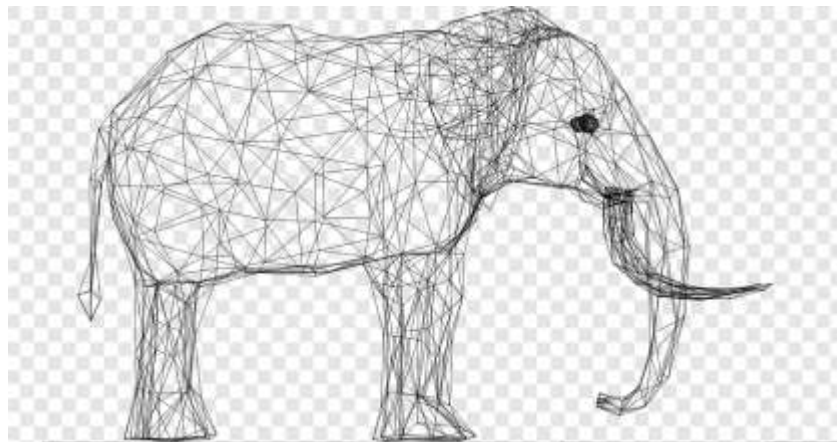


Рисунок 2.1 – Каркасна модель слона

Другим методом моделювання є поверхневе моделювання, яке визначається в термінах точок, ліній і поверхонь. Цей метод передбачає, що об'єкти обмежені поверхнями, які відокремлюють їх від навколишнього середовища. Ця оболонка зображена графічними поверхнями. Поверхня об'єкта обмежена контурами, які є результатом двох торкаючих або пересічних поверхонь. Вершини об'єктів задаються перетином трьох поверхонь.

Поверхневе моделювання має ряд переваг перед каркасним:

- можливість визначення складних криволінійних граней;
- здатність отримання тонових зображень;
- розпізнавання особливих побудов на поверхні, наприклад, отворів;
- отримання якісного зображення.

В основі поверхневого моделювання лежать два математичних положення. Будь-яка поверхня може бути апроксимована багатогранником, кожна грань якого складається з найпростішого плоского багатокутника;

Також в моделі допускаються поверхні другого порядку і поверхні, форма яких визначається за допомогою різних способів апроксимації та інтерполяції. Будь-який об'єкт, створений за допомогою поверхневого моделювання, має внутрішню і зовнішню сторону.

Існують різні типи поверхонь:

- базові геометричні поверхні – це поверхні, які виходять при пересуванні однієї плоскої кривої відносно іншої;
- поверхні обертання – це поверхні, які створюються при обертанні плоскої грані навколо деякої осі;
- поверхні сполучень і перетинів – це поверхні, які створюються в результаті сполучення або перетинання поверхонь;
- скульптурні поверхні – поверхні, які неможливо описати математичними рівняннями і які створюються лише за допомогою сплайнів, які з'єднують точки в просторі;
- аналітичні поверхні – поверхні, які описуються математичним рівнянням.

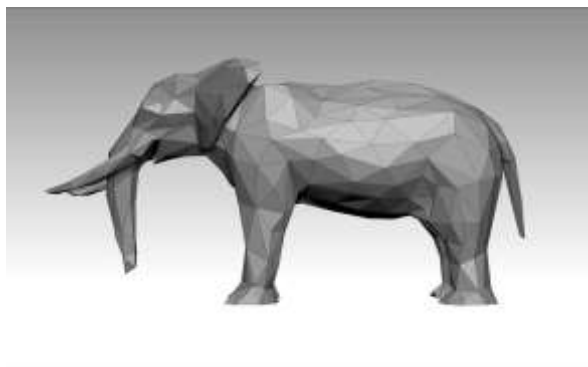


Рисунок 2.2 – Поверхневе моделювання слона

Третій метод моделювання – твердотіле моделювання. Твердотіла модель визначається в термінах того тривимірного обсягу, який займає

визначене нею тіло. Твердотіле моделювання – найдосконаліший і достовірний метод створення реального об'єкта. У цього методу є ряд переваг:

- можливість розмежування внутрішньої і зовнішньої областей об'єкта;
 - автоматичне видалення прихованих ліній;
 - автоматична побудова тривимірних розрізів об'єкта, що важливо при проведенні аналізу складних виробів;
 - використання методів аналізу з автоматичним отриманням зображення конкретних характеристик;
 - здатність отримання тонових зображень;
- способи створення твердотільних моделей бувають двох класів:
- метод конструктивного уявлення.
 - метод граничного уявлення.

Метод конструктивного уявлення полягає в тому, що з базових складових елементів (твердотільних примітивів, які визначаються формою, розмірами, точкою прив'язки і орієнтацією) створюється твердотільна модель. Твердотілі моделі створюються за допомогою булевих операцій об'єднання, перетину і різниці.

У даного методу є свої плюси і мінуси. За допомогою методу конструктивного уявлення забезпечується висока точність розрахунків фізичних властивостей об'єкта. Недолік же полягає в тому, що цей метод відрізняється від звичних способів моделювання і не завжди може бути простий в застосуванні без відповідного досвіду роботи.

Другий метод – це метод граничного уявлення. Він описує межі об'єкта і точно задає межі, що описують тіло. Це єдиний метод, який дозволяє створити точне уявлення геометричного твердого тіла. При цьому підході потрібно задати контури або межі об'єкта і ескізи різних видів об'єкта, а також вказати лінії зв'язків між цими видами для установки взаємної відповідності. Обидва методи мають свої переваги і недоліки. Метод

конструктивного представлення більш зручний при первісній побудові моделі. Крім того, цей метод займає менше місця в базі даних. Однак цей метод, на відміну від методу граничного подання, не дуже хороший для побудови складних форм.

Також, хоча в методі конструктивного уявлення дані займають менше місця, обсяг обчислень при відтворенні моделі виявляється більше. З іншого боку, метод граничного уявлення зберігає точний опис меж моделі, який займає багато пам'яті, але майже не вимагає ніяких обчислень для відтворення моделі. Перевагою систем граничного уявлення також є простота перетворення в каркасну модель і назад.



Рисунок 2.3 – Твердотіле моделювання

Поєднання конструктивного і граничного уявлень являють собою гібридну систему. Гібридне моделювання дозволяє поєднувати каркасну, твердотелу і поверхневу геометрії, а також використовувати параметричне моделювання.

2.2 Фотограмметрія

В даний час фотограмметрія знаходить застосування в самих різних сферах людської діяльності [13]. Спектр застосування цієї науки досить широкий: картографування земної поверхні, геодезія, космічні дослідження, географія, архітектура, містобудування, екологія, кадастр, медицина,

криміналістика, військово-інженерна справа, артилерія, геоінформаційні системи (ГІС) і т.д. Зокрема, для ГІС системи фотограмметрії представляють не тільки методи і датчики для збору вхідних даних, але і широкий набір алгоритмів, процедур і допоміжних коштів для переробки та аналізу, для опису і візуалізації об'єктивним товом, ситуацій і взаємозв'язків. Класична функція фотограмметричних систем в ГІС як модуля збору даних розширюється і доповнюється тепер функцією редагування, аналізу та подання даних. Ця нова функція передбачає, звичайно, використання сучасних фотограмметричних приладів з пристроями відображення цифрової інформації. За різними оцінками до 80% інформації, яка надходить в ГІС, забезпечується саме методами фотограмметрії. У розвитку фотограмметрії відзначають три етапи, відповідно до яких виділяють аналогову фотограмметрію, аналітичну фотограмметрію і цифрову фотограмметрію. Кожен етап характеризується, перш за все, приладами та технологіями, котрі застосовуються для обробки знімків з метою отримання зазначених характеристик об'єктів.

Аналогова фотограмметрія та аналітична фотограмметрія охоплюють теорію і практику визначення форми, розмірів, положення і типів об'єктів в просторі по аналоговим напівтоновим фотозображенням. При цьому, аналогова фотограмметрія характеризується тим, що фотограмметрична зарубка вирішується оптико-механічним шляхом, тобто з використанням оптико-механічних приладів. Були сконструйовані і побудовані найрізноманітніші аналогові прилади, призначені для вирішення всього ряду завдань по обробці фотознімків.

Аналітична фотограмметрія характеризується тим, що для програвання ведення зображення так само використовує оптико-механічні пристрої, а для побудови геометричної моделі об'єкта – обчислювальні пристрої.

Цифрова фотограмметрія охоплює теорію і практику визначення форми, розмірів, положення і типів об'єктів на площині і в просторі по цифровим напівтоновим зображенням на фотограмметричних пристроях, в яких

для відтворення зображення і побудови геометричної моделі об'єкта використовуються цифрові обчислювальні пристрої.

Цифрова фотограмметрія, характеризується, принаймні, двома ознаками:

- наявністю на вході системи зображення в цифровій формі;
- обробка цифрового зображення на електронно-обчислювальній машині.

Для цифрової фотограмметрії не має значення яким чином було отримано цифрове зображення – або відразу в результаті зйомки цифровою знімальною камерою, або шляхом реєстрового сканування раніше отриманого аналогового зображення.

Цифрове зображення – упорядкований масив цифрових сигналів на магнітному носії, що представляє собою півтонування при візуалізації.

Цифрове фотозображення – упорядкований масив цифрових сигналів, отриманий в процесі сканування аналогових фотознімків фотозчитувальними пристроями і представлений в стандартному форматі на магнітному носії. Під стандартним форматом розуміється встановлена форма дискретного представлення інформації про об'єкти.

У практиці цифрової фотограмметрії використовується термін "піксель", який трактується як елементарний ділянку дискретного представлення фотозображення, обмежений розмірами апертури фотосчітливої системи і описуваний координатами x , y на площині в системі координат приладу і оптичною щільністю D . Умовно елемент знімка представляється в вигляді квадрата, довжина сторони якого звана розміром пікселя, характеризує ступінь дозволу при цифруванні. Розмір пікселя повинен відповідати інформативності зображення, яка пов'язана зокрема, з роздільною здатністю. Лінійна роздільна здатність у сучасних оригінальних фотознімків на плівці досягає 100 лин / мм і більше. Якщо це співвіднести з розміром пікселя то вийде, що він повинен бути 5 мкм і менше. У цифровому знімку, отриманому з зображення форматом 6×6 см, при лінійному розмірі

елемента зображення 10 мкм – розмір пікселя, міститься 36×106 пікселів.

В даний час створені цифрові фотограмметричні робочі станції (ЦФРС), під якими розуміють клас цифрових систем, дозволяючий вирішувати всі фотограмметричні завдання зі збирання, зберігання, обробки, управління і видачі даних. Основне призначення ЦФРС – складання топографічних карт, визначення координат точок місцевості, рішення різного роду інженерних задач і т.д. ЦФРС дозволяють оброблювати наземні і аерокосмічні моно (поодинокі знімки) та стерео зображення і дозволяють досягати суттєвої продуктивності, і нових умов точності. Цифрова фотограмметрична робоча станція включає в себе комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням по обробці растрових зображень, діалогу з користувачем, системою автоматизованого проектування, а так само пристрої введення-виведення зображення і перетворення результатів обробки зображення в графічний вид. ЦФРС відрізняється від класичних фотограмметричних приладів по крайній мереже наступним:

- відсутністю вимог високої точності;
- наявністю системи робастних (завадостійких) вимірювань вільною від зносу;
- відсутністю необхідності в калібрування і ручній обробці зображень;
- стабільністю зображень і несхильність деформацій;
- єдиною системою збору, обробки, редагування, зберігання і організації даних;
- можливістю роботи в режимі "on-line" і "off-line".

Слід зазначити, що розвиток цифрової фотограмметрії не тільки йшло успішно і гладко. Уже в середині 70-х років з'явилися досить потужні графічні станції, які дозволяли моделювати окремі фотограмметричні процеси. Проте, перші досліди не дали бажаного результату, так як були відсутні прецизійні сканери високої роздільної здатності, що перетворюють аналогові зображення – фотознімки, в растровий вигляд. До середини 80-х

років цей стримуючий бар'єр був подоланий і зарубіжні фірми (EPSON, LEICA, INTERGRAPH, CARL-ZEISS і ін.) налагодили серійний випуск даного обладнання.

З середини 80-х років почався бурхливий розвиток цифрової фотограмметрії за кордоном. У нашій країні розвиток цифрової фотограмметрії стримувалося відсутністю відповідної вітчизняної апаратури і недостатністю імпоротної апаратури. Поява на ринку відносно дешевих персональних комп'ютерів стало серйозним імпульсом в активізації досліджень вітчизняної науки в даній області.

До розвитку методів цифрової фотограмметрії підштовхувала розробка застосування нових видів знімальної апаратури з цифровим записом зображення, що наближається по роздільній здатності до фотографічної. Застосування такої знімальної апаратури дозволяє істотно спростити технологічну схему обробки зображень, так як при цьому відпадає проміжний процес перетворення аналогових знімків в цифровий вигляд. Більш того, в цьому випадку можна домогтися найвищої оперативності в обробці інформації такого роду, так як дана інформація може передаватися безпосередньо споживачеві по радіоканалу, наприклад, з борту літака в процесі аерозйомки. У цифровій фотограмметричній системі процес стереоскопічного спостереження координат точок зображень дуже схожий на традиційний.

Для стереоскопічного спостереження зображень і їх вимірів використовуються різні способи:

- поляризація зображення;
- стереоскопічні насадки;
- система вимірних марок і система маніпулювання зображенням.

Тобто все як в традиційній класичній фотограмметрії, тільки замість громіздких і дорогих оптико-механічних пристроїв використовуються персональні комп'ютери (ПК) з відповідним програмним забезпеченням.

Таким чином, створення ЦФРС зводиться до об'єднання в єдине ціле

серійно випускаються технічних засобів і розробці відповідного програмного забезпечення. Одним зі стандартних елементів сучасних ЦФРС є побудова фототриангуляції.

Фототриангуляція – згущення вихідної геодезичної мережі по знімках (аерознімків, космічних знімках, наземним знімкам). Основна мета просторової фототриангуляції – максимально скоротити трудомісткі польові геодезичні роботи по забезпеченню опорою (опорними точками), замінивши їх на камеральні роботи. Фактично сутність фототриангуляції полягає в побудові моделі місцевості, в сучасному вигляді – цифрової моделі місцевості (ЦМР), і орієнтуванні її щодо геодезичної системи координат.

Фототриангуляція, як метод згущення опорної геодезичної мережі по аерознімків, виникла в 20-х роках ХХ століття. Перші способи фототриангуляцію були графічними, заснованими на чудову властивість планового знімку: центральні кути на знімку практично рівні в кутах на місцевості, якщо кут малий, а місцевість рівнинна або пагорб. При цьому в якості центральної точки можна вибрати будь-яку точку, розташовану в межах кола з центром в головній точці знімка і радіус, рівним 1:25 фокусної відстані знімальної камери. Графічні способи фототриангуляцію дозволяли будувати вільні фотограмметричні мережі, орієнтувати їх щодо геодезичної системи координат по опорних точках і визначати тільки планове положення нових опорних точок.

Залежно від технічних засобів, що використовуються для побудови радіальної фототриангуляцію, її поділяють на графічну, механічну і аналітичну. Інструментальною базою в графічній фототриангуляції були найпростіші восківки напрямків, виготовлені зі знімків одного або двох маршрутів, а в подальшому спеціальний пристрій – надир-триангулятор [14]. У механічної радіальної фототриангуляцію застосовують щілинні шаблони.

Фототриангуляція дозволяє визначати координати точок місцевості з більшою точністю, ніж графічна і механічна. Для вимірювання центральних кутів на знімках служить радіалтриангулятор. Теорія аналітичної

фототріангуляції із застосуванням радіалтріангулятор детально розроблена в працях проф. Н.А. Урмаєва.

Радіальну фототріангуляцію, засновану використанні властивостей центральних кутів на знімках, часто називають площинний фототріангуляцією або радіалтріангуляцією.

Залежно від застосовуваних технічних засобів розрізняють три вида просторової фототріангуляції:

- аналогова;
- аналогово-аналітичн;
- аналітична.

Аналогова фототріангуляція заснована на використанні універсальних стереопріборів, що дозволяють будувати модель місцевості в межах кожного маршруту. У аналогової фототріангуляції обмежені можливості обліку систематичних помилок.

Аналогово-аналітична фототріангуляція складається в створенні моделей місцевості на універсальних стереоприладах і орієнтуванні їх за допомогою електронно-обчислювальної машини.

Аналітична фототріангуляція будується по вимірним координатам зображень точок знімків. Сучасна аналітична фототріангуляціх в умовах цифрової фотограмметрії найбільш повно реалізує свої можливості, дозволяючи враховувати всі систематичні помилки, вплив яких можна висловити в математичній формі: дисторсію об'єктиву знімальної камери, кривизну Землі, атмосферну рефракцію, рівномірну і нерівномірну деформацію знімків і т.п.

2.3 Неймережі для створення 3D моделей

Згорткові нейронні мережі призначені для обробки даних через кілька рівнів масивів. Цей тип нейронних мереж використовується в таких додатках, як розпізнавання зображень або розпізнавання осіб. Основна

відмінність між CNN і будь-який інший звичайної нейронною мережею полягає в тому, що CNN приймає вхідні дані у вигляді двовимірного масиву і працює безпосередньо з зображеннями, а не фокусується на добуванні ознак, на якому зосереджені інші нейронні мережі.



Рисунок 2.4 – Структура роботи нейронних мереж в 3D

Домінуючий підхід CNN включає в себе вирішення проблем розпізнавання. Провідні компанії, такі як Google і Facebook, вклали кошти в дослідження і розробки для реалізації проектів по розпізнаванню, щоб прискорити процес.

Стортова нейронна мережа використовує три основних ідеї: місцеві відповідні поля, згортка та об'єднання.

CNN використовує просторові кореляції, які існують у вхідних даних. Кожен паралельний шар нейронної мережі з'єднує кілька вхідних нейронів. Цей конкретний регіон називається локальним рецептивним полем. Місцеве рецептивне поле фокусується на прихованих нейронах. Приховані нейрони обробляють вхідні дані всередині згаданого поля, не усвідомлюючи змін за

межами певної межі.

На рисунку 2.4 наведено схематичне уявлення генерації відповідних полів.

Якщо ми спостерігаємо вищезазначене подання, кожне з'єднання дізнається вага прихованого нейрона з асоційованої зв'язком з переміщенням від одного шару до іншого. Тут окремі нейрони час від часу виконують зсув. Цей процес називається «згортка».

Відображення з'єднань від вхідного шару до карти прихованих об'єктів визначається як «загальні ваги», а включене зміщення називається «спільним зміщенням».

CNN або згорткові нейронні мережі використовують рівні об'єднання, які є рівнями, розташованими відразу після оголошення CNN. Він приймає вхідні дані користувача у вигляді карти об'єктів, яка виходить з згортальних мереж і готує стислу карту об'єктів. Об'єднання шарів допомагає в створенні шарів з нейронами попередніх шарів.

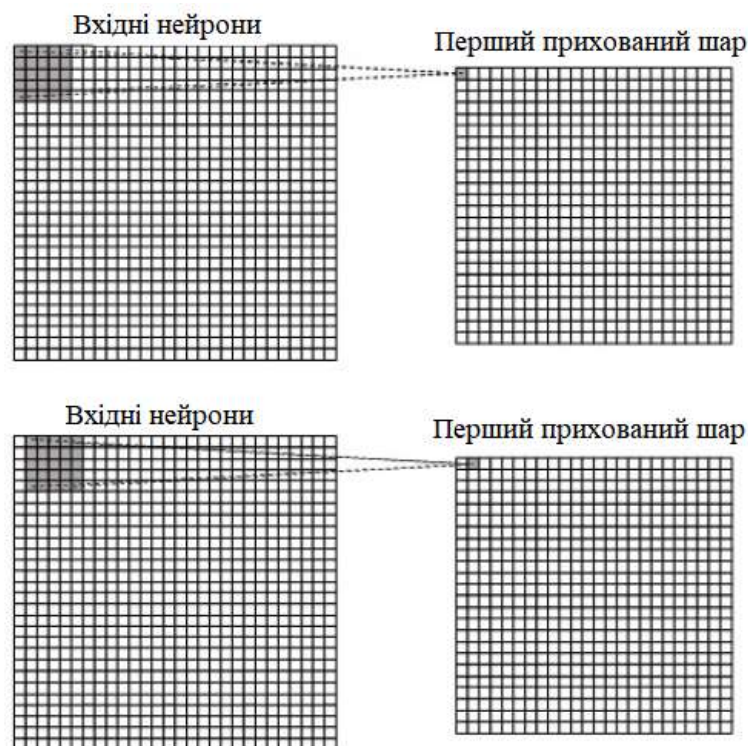


Рисунок 2.4 – Локальні відповідні поля з вхідними нейронами

опублікувала проект PIFu [15] (Pixel-Aligned Implicit Function), що дозволяє застосувати методи машинного навчання для побудови 3D-моделі людини по одному або декільком двовимірним зображенням (рис 2.5). Система дозволяє відтворювати складні варіанти одягу, такі як спідниці зі складками і туфлі на підборах, і різні зачіски, самостійно відновлюючи текстуру і форму в областях, невидимих в проекції, по якій проводиться побудова 3D-моделі. Для збільшення якості і деталізації підсумкової 3D-моделі може застосовуватися кілька зображень в різних ракурсах. Код проекту написаний на мові Python з використанням фреймворку PyTorch.

Як джерело для реконструкції об'ємного макета використовується нейронна мережа, що дозволяє вибирати найбільш ймовірну форму і додумувати приховані елементи, відштовхуючись від моделі, навченої на різних варіантах існуючих об'єктів.

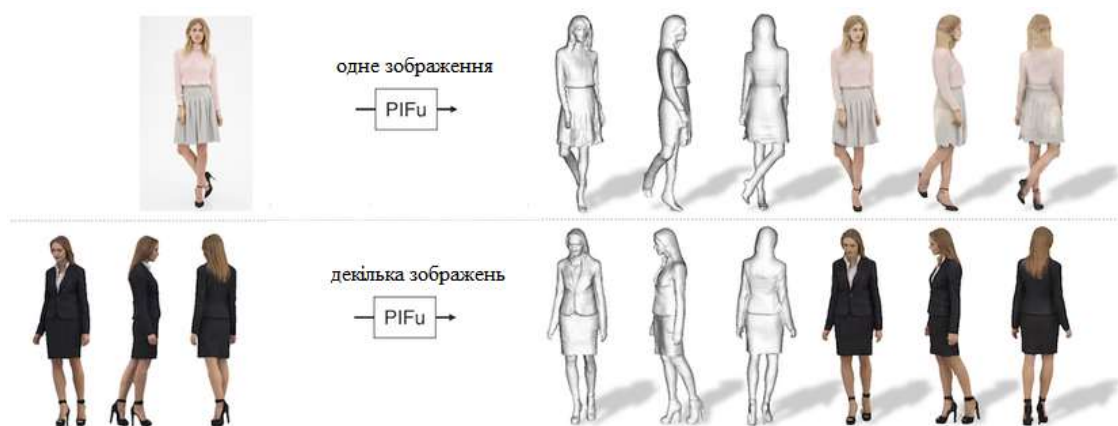


Рисунок 2.5 Моделювання людини за допомогою PIFu

Паралельно проект надає алгоритм для зіставлення отриманого об'ємного макета з текстурами на наданих двовимірних зображеннях, який вирівнює пікселі 2D-зображення відповідно до їх позицією на 3D-об'єкті і генерує найбільш ймовірні відсутні текстури.

Для кодування зображення може застосовуватися будь-яка згортова нейронна мережа, для реконструкції поверхні застосована архітектура "Stacked hourglass", а для зіставлення текстур задіяна нейронна мережа на базі архітектури CycleGAN.

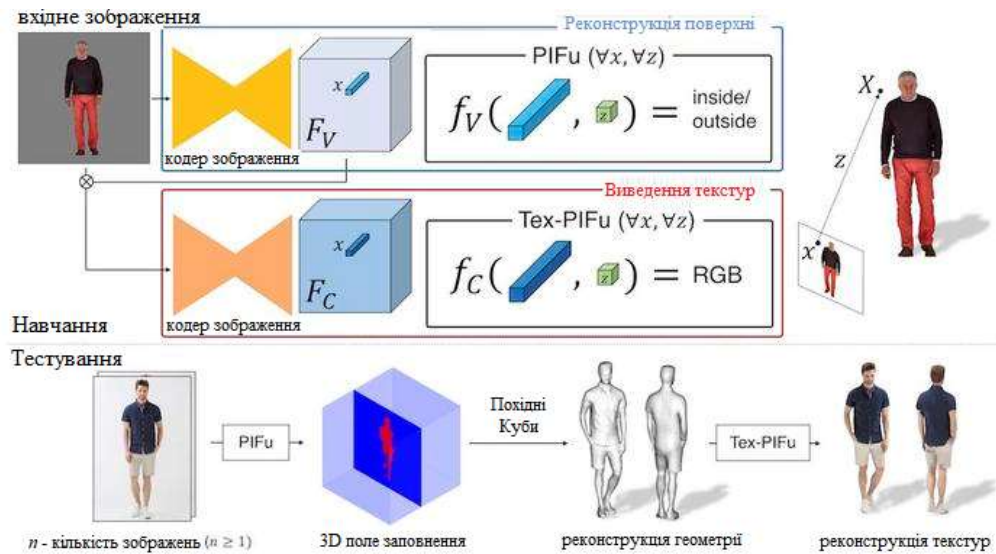


Рисунок 2.6 – Структура PIFu

Застосовувалася дослідниками готова навчена модель доступна для вільного завантаження, але вихідні дані, на яких було проведено навчання, залишаються закриті, так як вони засновані на результатах комерційного 3D-сканування. Як джерело для самостійного навчання моделі може використовуватися база 3D-моделей людей від проекту Renderpeople.

2.4 Система DIB-R (differentiable interpolation-based renderer)

Nvidia створила AI-систему DIB-R (differentiable interpolation-based renderer), яка побудована на основі ML-фреймворка PyTorch. Система здатна перетворювати двомірні зображення в тривимірні об'єкти. DIB-R [16] обробляє картинку, а потім перетворює її в високоточну 3D-модель. Враховуються форми, текстура, кольору і освітлення об'єкту. При цьому задіяна архітектура кодера-декодера, типу нейронної мережі, яка перетворює вхідні дані в вектор, який використовується для прогнозування інформації.

Вся робота займає менше ніж 100 мілісекунд. Однак на тренування самої системи йде дві доби на одному GPU Nvidia V100. На думку

розробників, при використанні GPU цей процес може розтягнутися на тижні.

AI-системі показали кілька датасета з зображеннями птахів. DIB-R змогла створити якісні моделі по одному 2D-зображенні (рис. 2.8).

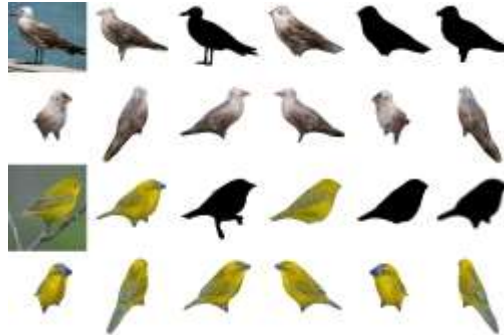


Рисунок 2.8 – Приклад роботи DIB-R

Система «бачить» двомірне зображення і робить висновки на основі тривимірного «розуміння» світу. Це схоже на те, як люди переводять двомірний видимий об'єкт в тривимірний уявний образ.

У Nvidia вважають, що система допоможе автономним роботам зі сприйняттям глибини і підвищить їх точність і безпеку. Також вона поліпшить орієнтацію на місцевості і вміння маніпулювати предметами. Фреймворк DIB-R інтегрований в розроблену Nvidia PyTorch – бібліотеку Kaolin. Тепер компанія веде дослідження в рамках розробки зрозумілого II. Воно стосується вивчення функцій, які дозволяють AI зробити той чи інший прогноз. Розробка бачить однією з проблем то, що в міру розростання системи стає все важче побачити точні причини конкретних прогнозів. Таким чином, одним із завдань розробки зрозумілого II Google вважається подання роботи цієї системи у формі, яка буде зрозуміла.

2.5 Нейронна мережа C3DPO

C3DPO – це нейронна мережа [17], яка відновлює 3D об'єкт по розмітці об'єкта на зображенні. Нейронна мережа тестувалася на завданнях

Human3.6M, PASCAL3D + i Synthetic Up3D проти підходів, які не вимагають реальних 3D моделей об'єктів при навчанні. C3DPO обійшла state-of-the-art методи для відновлення 3D моделі об'єкта.

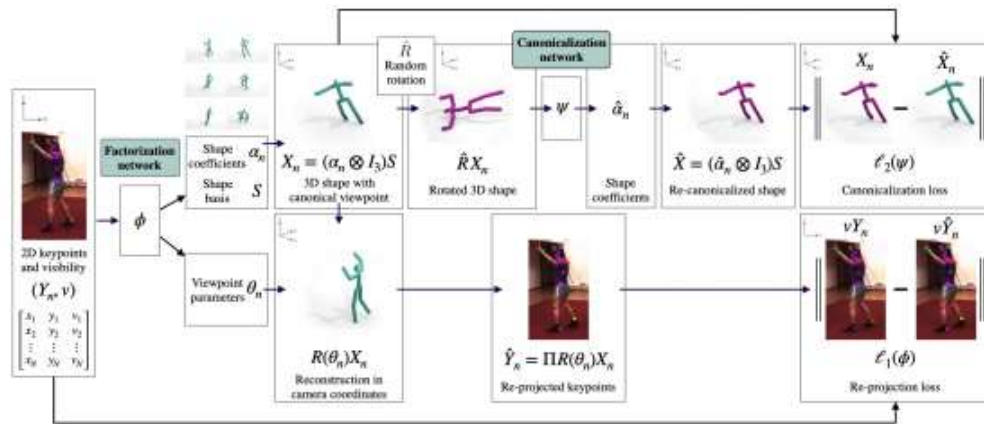


Рисунок 2.9 – Візуалізація структури

Нейронна мережа реконструює 3D об'єкт з зображення об'єкта в одному ракурсі. Метод стійкий до частково перекритим об'єктів на зображенні. При цьому модель враховує зміну форми об'єкта при зміні ракурсу і при деформації об'єкта. Щоб навчити модель відновлювати 3D модель на основі зображення об'єкта в одному ракурсі, дослідники вводять свій спосіб для регуляризації моделі.

Модель приймає на вхід зображення об'єкта з одного ракурсу і розмітку його ключових точок. Дизайн нейромережі натхненний попередніми моделями для генерації 3D моделі з 2D зображень. Основна відмінність C3DPO – відсутність необхідності в реальних 3D моделях об'єктів на етапі навчання моделі.

C3DPO ділиться на дві підмоделі: нейромережа для реконструкції 3D об'єкту та нейромережа для регуляризації згенерованого 3D об'єкта.

Було проведено порівняння роботи моделі з підходами, які також не потребують 3D моделей об'єктів для навчання. Метрикою обрана середня помилка реконструкції і Stress, які стійкі до неоднозначних проєкцій.

3 НЕЙРОМЕРЕЖА ДЛЯ СТВОРЕННЯ 3D МОДЕЛІ НА ОСНОВІ 2D ЗОБРАЖЕННЯ

За останні роки було запропоновано безліч методів 3D-реконструкції зображень, де методи, засновані на глибинному навчанні, досягли багатообіцяючих результатів. Для представлення тривимірних фігур багато з цих методів використовують або вокселі, або «хмари точок» завдяки простоті їх кодування в нейронній мережі. Однак таке уявлення часто обмежене з точки зору роздільної здатності. Останні методи досліджували використання явних поверхневих уявлень у нейронній мережі, але передбачають фіксовану топологію, що обмежує гнучкість підходів. Більше того, методи, засновані на використанні точок та сітки, використовують Chamfer Distance (CD) та Earth-mover Distance (EMD) як навчальні втрати.

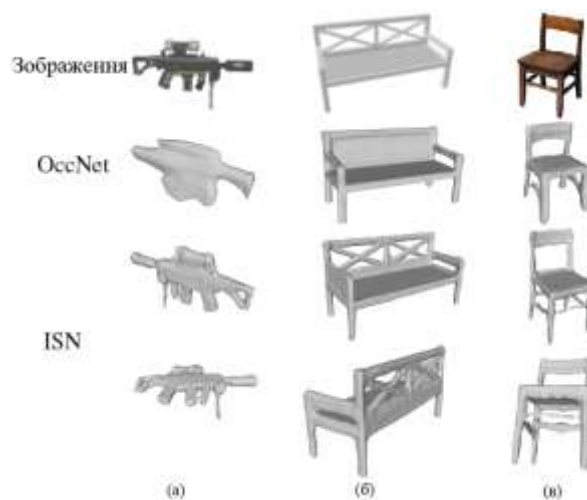


Рисунок 3.1 – Результати реконструкції зображень різними методами

Однак ці методи забезпечують лише наближені показники для вимірювання подібності фігури. Для вирішення вищезазначених обмежень вокселів, «хмар точок» та сітки у цій роботі вивчається альтернативне неявне тривимірне представлення поверхні, Signed Distance Functions (SDF). Як нова популярна область, також обрано реконструювання тривимірних фігур, створюючи неявне поле. Однак, на відміну від данного підходу, вони або

генерують бінарну заповнюваність, або дивляться лише на глобальну інформацію, тому вдається відновити загальну форму, але не мають можливості відновити дрібні деталі. Після вивчення різної форми неявного поля та інформації, яка зберігає локальні деталі, представлено ефективну, гнучку та ефективну неявну поверхневу мережу (ISN) для прогнозування SDF.

SDF просто щифрує відстань зі знаком кожної точкової вибірки в 3D від межі основної форми. Таким чином, враховуючи набір знакових значень відстані, фігуру можна витягнути, ідентифікуючи поверхню за допомогою таких методів, як «маршові куби». Як показано на рисунку 3.4, враховуючи згорткову нейронну мережу (CNN), яка кодує вхідне зображення у вектор функції, ISN передбачає значення SDF для даної 3D-точки за допомогою цього вектора функції. Здійснюючи вибірку різних розташувань 3D-точок, ISN може генерувати неявне поле підстилаючої поверхні з нескінченною роздільною здатністю. Більше того, без необхідності фіксованого припущення про топологію, регресуюча ціль для ISN – це точна основна відповідність замість наближеної метрики.

Хоча багато методів 3D-реконструкції зображення, які вивчають впровадження фігури з 2D-зображення, здатні фіксувати загальні властивості фігури, вони мають тенденцію ігнорувати такі деталі, такі як отвори або тонкі конструкції. Дрібні деталі займають лише невелику частину в тривимірному просторі, отже нехтування ними не несе великих втрат у порівнянні з вихідною формою. Такі результати можуть бути візуально незадовільними.

Для вирішення цієї проблеми було введено локальний модуль вилучення функцій. Зокрема, оцінюються параметри точки огляду вхідного зображення. Цю інформацію було використано для проектування кожної точки запиту на вхідне зображення, щоб ідентифікувати відповідний локальний патч. Вилучаються локальні властивості з таких патчів і використовуються разом із функціями глобального зображення, щоб

передбачити значення SDF для 3D точок. Цей модуль дозволяє мережі вивчати взаємозв'язок між прогнозованими пікселями та тривимірним простором та значно покращує якість реконструкції дрібнозернистих деталей в отриманій 3D-формі. Як показано на рисунку 3.1, мережа здатна генерувати деталі фігури, такі як візерунки на спинці лавки та отвори на рукоятці автомату, яких попередні найсучасніші методи не дають.

Оцінюється даний підхід до різних категорій фігур, використовуючи як синтетичні дані, що генеруються із наборів даних фігур 3D, так і зображення продуктів в Інтернеті. Якісні та кількісні порівняння демонструють, що мережа перевершує найсучасніші методи та створює правдоподібні форми з високоякісними деталями. Крім того, мережа розширюється для реконструкції декількох зображень та других додатків, наприклад інтерполяції форм.

3.1 Огляд методів обробки зображень

Більшість методів використовують явні 3D-зображення і часто страждають від таких проблем, як обмежена роздільна здатність та фіксованої топології сітки. Неявні подання забезпечують альтернативне представлення для подолання цих обмежень. У цій роботі було використано функції з відміткою відстані (Signed Distance Functions (SDF)), які є одними з найпопулярніших неявних зображень поверхні. Деякі підходи до глибокого навчання теж використовували як представлення SDF на основі вокселя для малювання фігури. Тим не менш, відомо, що 3D CNN страждають від високого використання пам'яті та витрат на обчислення. Тому було представлено DeepSDF для завершення фігури за допомогою структури автоматичного декодера. Однак їхня мережа не є зворотною і вимагає оптимізації вектора вбудовування під час тестування, що обмежує ефективність та можливості підходу. У одночасній роботі аналогічного методу [18] використовують SDF в глибоких мережах для завдання

формування фігури. Незважаючи на те, що їх метод досягає перспективних результатів для завдання генерації, він не може відновити дрібно деталізовані деталі тривимірних об'єктів для реконструкції одного зображення. Ітеративно розподіляючи кожну активну комірку (тобто комірки, оточені зайнятими та порожніми клітинами) на підкомірки та повторюючи передбачення для кожної підкомірки, вони полегшують проблему обмеженого дозволу об'ємних сіток. На відміну від цього, даний метод не тільки передбачає знак відібраних точок, але також і відстань, яка є безперервною. Тому процедура ітеративного прогнозування не є необхідною.

3.2 Метод моделювання тривимірної фігури за допомогою знакової функції відстані

Враховується зображення об'єкта, метою є реконструювання тривимірної форми, яка фіксує як загальну структуру, так і дрібні деталі об'єкта. Як показано на рисунку 3.2, SDF – це безперервна функція, яка відображає дану просторову точку $p = (x; y; z) \in \mathbb{R}^3$ в дійсне значення $s \in \mathbb{R}$: $s = \text{SDF}(p)$: Абсолютне значення s вказує на відстань від точки до поверхні, тоді як знак s означає, чи знаходиться точка всередині поверхні або поза нею. Ізоповверхня $S_0 = \{ p \mid \text{SDF}(p) = 0 \}$ неявно представляє основну тривимірну форму.

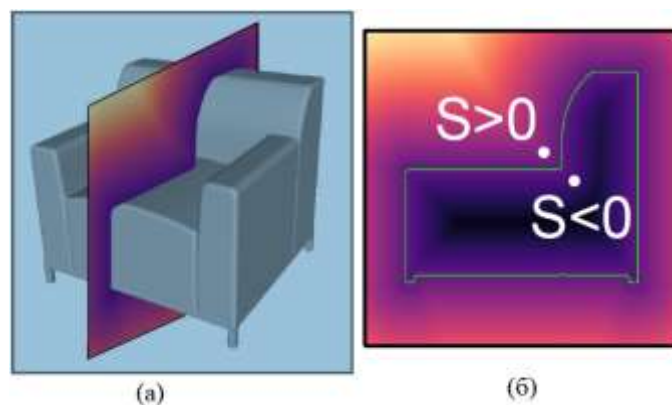


Рисунок 3.2 – Ілюстрація SDF

Розглядається згорткова нейронна мережа з неявною поверхнею (ISN) для прогнозування SDF із вхідного зображення.

ISN приймає одне зображення як вхідне та передбачає значення SDF для будь-якої заданої точки. На відміну від методів 3D CNN, які генерують об'ємну сітку з фіксованою роздільною здатністю, ISN створює безперервне поле з довільною роздільною здатністю. Більше того, було введено метод вилучення локальних властивостей, щоб поліпшити відновлення деталей фігури (рис. 3.3).

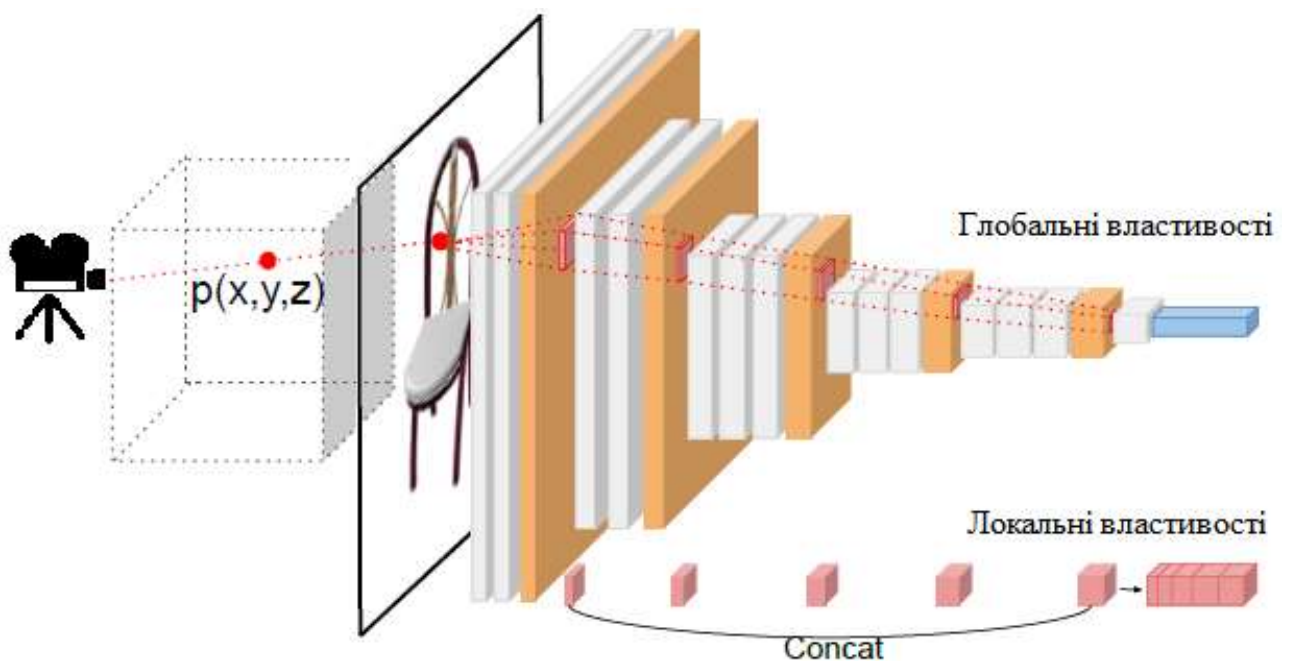


Рисунок 3.3 – Вилучення локальних властивостей зображення

Метод проілюстровано на рисунку 3.4. Отримавши зображення, ISN складається з двох частин: оцінки пози камери та прогнозування SDF.

ISN спочатку оцінює позу камери, які відображають об'єкт у світових координатах на площину зображення. Враховуючи передбачену позу камери, проектується кожна точка 3D-запиту на площину зображення та збираються багатомасштабні функції CNN для відповідного патча зображення. MLPs позначає багатосарові перцептрони, які надходять до точкових властивостей.

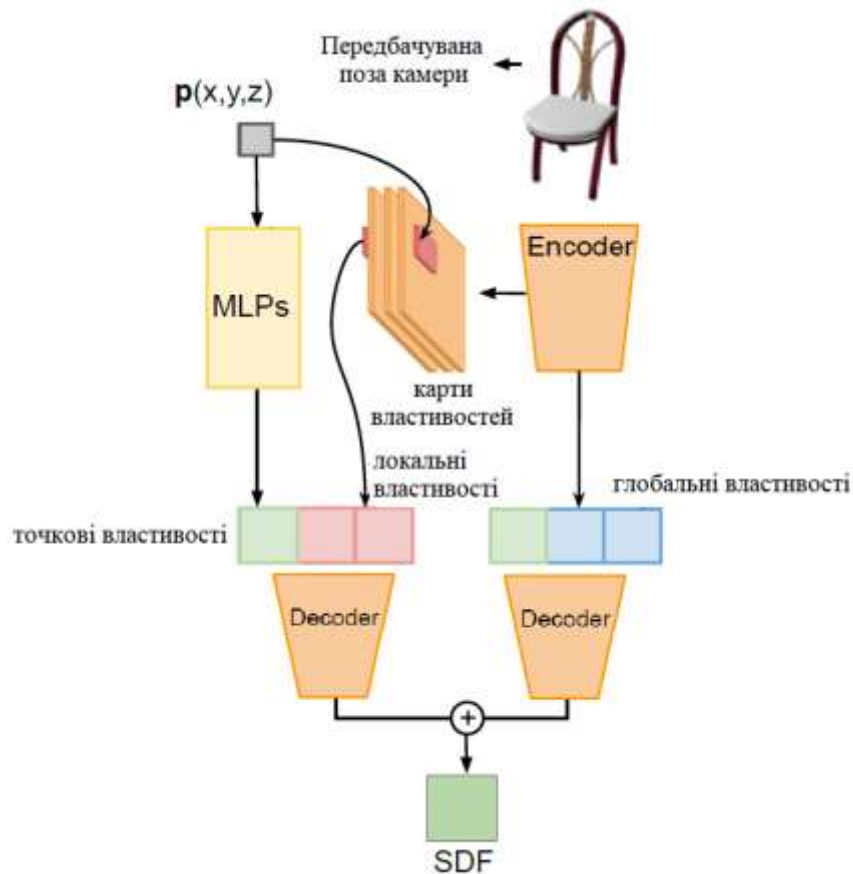


Рисунок 3.4 – Метод оцінювання пози камери та прогнозування SDF

Потім ISN декодує дану просторову точку до значення SDF, використовуючи як масштабні локальні властивості зображення, так і глобальні властивості зображення.

3.2.1 Оцінка пози камери

Отримавши вхідне зображення, перша мета – оцінити відповідну точку огляду. Навчається данна мережа на наборі даних ShapeNet Core [19], де всі моделі вирівняні. Тому використовується цей вирівняний простір моделі як світовий простір (World Space), де знаходяться поза камери і приймається фіксований набір внутрішніх параметрів. Регресія параметрів камери з вхідного зображення за допомогою CNN часто не дає змоги створити точні параметри. Тому, було представлено більш ефективну та дієву мережу, проілюстровану на рисунку 3.5.

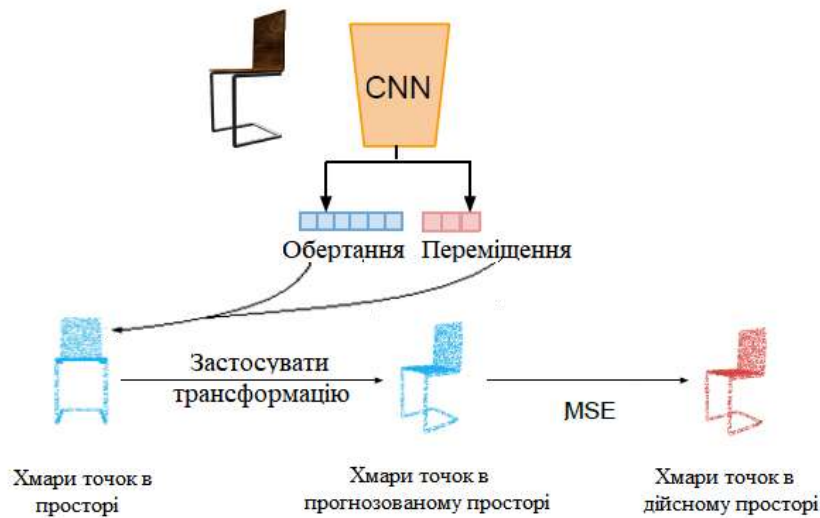


Рисунок 3.5 – Мережа оцінки пози камери

Глибокі мережі застосовуються для оцінки 6D позицій екземплярів об'єктів за зображеннями RGB, картами глибини або відсканованими хмарами точок. Представлення обертання 6D [20] є безперервним і легшим для регресії нейронної мережі порівняно з більш часто використовуваними поданнями, такими як кватерніони та кути Ейлера. Таким чином, використовується представлення обертання 6D $\mathbf{b} = (\mathbf{b}_x; \mathbf{b}_y)$, де $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^6$, $\mathbf{b}_x \in \mathbb{R}^3$, на $\mathbf{b}_y \in \mathbb{R}^3$. За умови \mathbf{b} , матриця обертання $\mathbf{R} = (\mathbf{R}_x; \mathbf{R}_y; \mathbf{R}_z)^T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ отримується за допомогою

$$\mathbf{R}_x = N(\mathbf{b}_x); \mathbf{R}_z = N(\mathbf{R}_x \times \mathbf{b}_y); \mathbf{R}_y = \mathbf{R}_z \times \mathbf{R}_x; \quad (3.1)$$

де $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y, \mathbf{R}_z \in \mathbb{R}^3$, N – функція нормалізації, а « \times » позначає декартовий добуток. Переміщення $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$ із світового простору в простір камери передбачається мережею.

Замість того, щоб обчислювати втрати на камери напряму, було використано передбачувану позу камери для перетворення заданої хмари точок із світового простору в простір координат камери. Обчислюючи втрати L_{cam} , обчислюється середня квадратична помилка між перетвореною хмарою точок (PC) та основною хмарою точок в просторі камери:

$$L_{cam} = \frac{\sum_{p_w \in PC_w} \|P_G - (Rp_w + t)\|_2^2}{\sum_{p_w \in PC_w} 1}, \quad (3.2)$$

де $PC_w \in \mathbb{R}^{N \times 3}$ – хмара точок у світовому просторі, N – кількість точок у PC_w . Для кожного $p_w \in PC_w$, P_G представляє відповідне розташування точки основної відповідності у просторі камери, а $\| \cdot \|_2^2$ – квадрат L_2 відстані.

3.2.2 Прогнозування SDF із згортковою нейронною мережею

Враховуючи зображення I , позначається основна відповідність SDF як SDF^I , а метою данної мережі f є оцінка SDF^I . На відміну від поширених втрат CD та EMD у попередніх методах реконструкції, данні вказівки є справжньою істинною відповідністю замість приблизних показників. Для прямого підходу до регресії SDF за допомогою нейронної мережі було використано DeerSDF. Він об'єднує місце розташування 3D-точки запиту та вбудовування фігури, витягнуту з зображення або хмари точок, і використовує автоматичний декодер для отримання відповідного значення SDF. Структура автодекодера вимагає оптимізації вбудовування фігури для кожного об'єкта. Якщо використовувати архітектуру прямого зв'язку, то з'явиться проблема конвергенції. Крім того було об'єднано загальні особливості вхідного зображення та розташування точки запиту на кожному шарі декодера. Хоча такий підхід працює краще на практиці, він також призводить до значного збільшення кількості мережевих параметрів. Данне рішення полягає у використанні багат шарового перцептрона для відображення заданого розташування точки до багатовимірного простору ознак. Потім ця багатовимірна функція поєднується з глобальними та локальними властивостями зображення відповідно і використовується для регресії значення SDF.

Як показано на рисунку 3.6(a), початкові експерименти показали, що

важко захопити деталі фігури, такі як отвори та тонкі структури, коли використовуються глобальні властивості зображення. Таким чином було введено метод вилучення локальних властивостей, щоб зосередитись на реконструкції дрібних деталей, таких як задні стовпи стільця (рис. 3.6).

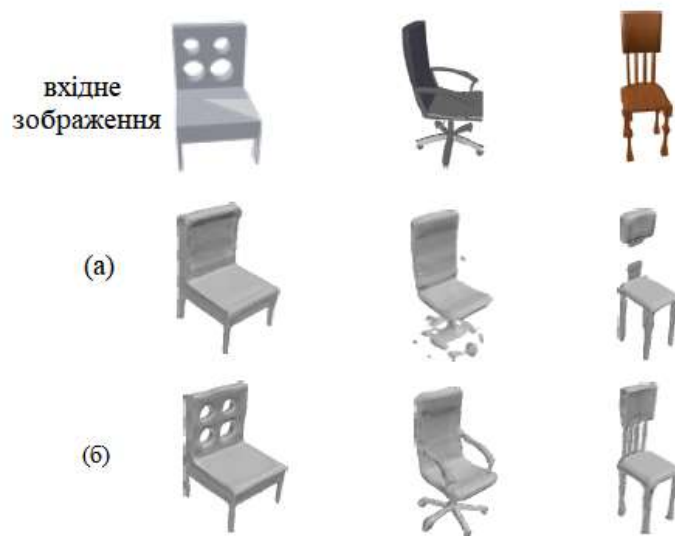


Рисунок 3.6 – Результати реконструкції фігури (а) без та (б) з вилученням локальних властивостей

Як проілюстровано на рисунку 3.3, тривимірна точка $p \in \mathbb{R}^3$ проектується на двовимірному розташуванні $q \in \mathbb{R}^2$ на площині зображення із розрахунковими параметрами камери. Отримавши характеристики об'єктів на кожній карті властивостей, що відповідають розташуванню q , вони об'єднуються, щоб отримати локальні властивості зображення. Оскільки карти властивостей у пізніших шарах мають менші розміри, ніж вихідне зображення, змінюється їх розмір до вихідного розміру за допомогою білінійної інтерполяції та витягуємо розміри об'єктів у місці q . Потім два декодери беруть глобальну та локальну властивості зображення відповідно як вхідні дані з точковими елементами та роблять прогноз SDF. Остаточний SDF – це сума цих двох прогнозів. Рисунок 3.6 порівнює результати даного підходу як з вилученням локальних властивостей, так і без нього. Маючи лише глобальні властивості, мережа здатна передбачити загальну форму, але не дає деталей. Вилучення локальних властивостей допомагає відновити ці

відсутні деталі, передбачаючи залишковий SDF.

Регресуються безперервні значення SDF замість того, щоб формулювати проблему бінарної класифікації (наприклад, всередині або зовні фігури). Ця стратегія дозволяє витягувати поверхні, які відповідають різним значенням iso. Щоб гарантувати, що мережа концентрується на відновленні деталей поблизу та всередині ізоповерхні S_0 , використовується зважена функція втрат. Втрата даного методу визначається

$$L_{SDF} = \sum_P m |f(I, p) - SDF^1(p)|, \quad (3.3)$$

$$m = \begin{cases} m_1, & \text{якщо } SDF^1(P) < \delta, \\ m_2, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (3.4)$$

де $| \cdot |$ це L_1 -нормаль. m_1, m_2 – це різні ваги, і для точок, позначена відстань яких нижче певного порогу, використовується більша вага m_1 .

3.3 Реконструкція ізоповерхні

Щоб сформувати поверхню сітки, спочатку визначається щільна тривимірна сітка та прогнозується значення SDF для кожної точки сітки. Після того, як буде обчислено значення SDF для кожної точки в щільній сітці, використовуються маршові кубики, щоб отримати тривимірну сітку, яка відповідає ізоповерхні S_0 .

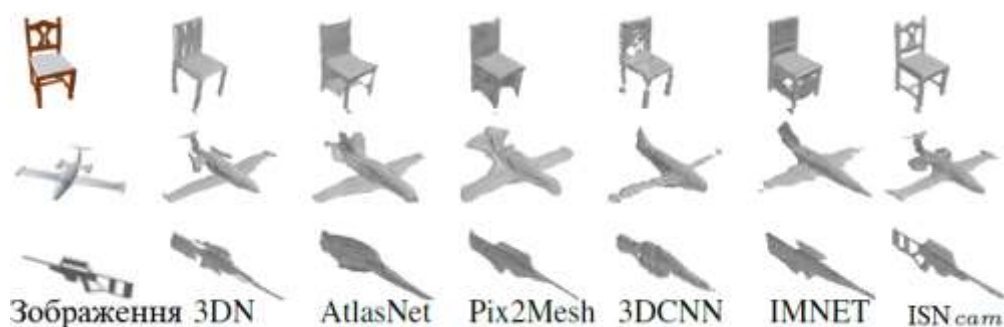


Рисунок 3.7 – Результати реконструкції зображення різними методами

4 МОДЕЛЮВАННЯ ЗГОРТКОВОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ 3D-МОДЕЛІ ТА ПОРІВНЯННЯ З СУЧАСНИМИ МЕТОДАМИ

Нейронна мережа створена за допомогою інструментів CUDA, Python та TensorFlow.

4.1 CUDA

CUDA – це програмно-апаратна архітектура паралельних обчислень, що дозволяє істотно збільшити обчислювальну продуктивність завдяки використанню графічних процесорів NVIDIA [21].

При використанні даної технології необхідно знати такі поняття:

- пристрій (device) – сама відеокарта, графічний процесор (GPU) виконує команди центрального процесора;
- хост (host) – центральний процесор (CPU) який запускає різні завдання, виділяє пам'ять, etc .;
- ядро (kernel) – функція (завдання), яка буде виконуватися на GPU.

CUDA дозволяє програмістам реалізовувати на спеціальному спрощеному діалекті мови C алгоритми, які використовуються в графічних процесорах NVIDIA, і включати спеціальні функції в текст програми на C. Архітектура CUDA дозволяє розробнику на свій розсуд організувати доступ до набору інструкцій GPU і керувати його пам'яттю. Ця технологія підтримує кілька мов програмування. Серед них Java, Python і деякі інші.

Розглянемо, як відбувається запуск програми на графічному процесорі:

- хост виділяє необхідну кількість пам'яті на пристрої.
- хост копіює дані зі своєї пам'яті в пам'ять пристрою.
- хост запускає ядро на пристрої.
- пристрій виконує це ядро.

– хост копіює результати з пам'яті пристрою в свою пам'ять.

Центральний процесор взаємодіє з графічним через CUDA Runtime API, CUDA Driver API і CUDA Libraries. Runtime і Driver API відрізняються рівнем абстракції. Грубо кажучи, перший варіант більш високого рівня в плані програмування, більш абстрактний, а другий – навпаки, більш низького (рівень драйвера). Runtime API є абстрактною обгорткою Driver API.

Архітектура GPU побудована дещо інакше, ніж CPU. Оскільки графічні процесори спершу використовувалися тільки для графічних розрахунків, які допускають незалежну паралельну обробку даних, то GPU і призначені саме для паралельних обчислень. Він спроектований таким чином, щоб виконувати величезну кількість потоків.

Як видно з картинки – в GPU є багато простих арифметично-логічних пристроїв (АЛП), які об'єднані в кілька груп і мають спільною пам'яттю. Це допомагає підвищити продуктивність в обчислювальних завданнях, але трохи ускладнює програмування.

GPU орієнтований на виконання програм з великим об'ємом даних і розрахунків і являє собою масив потокових процесорів (Streaming Processor Array), що складається з кластерів текстурних процесорів (Texture Processor Clusters, TPC). TPC в свою чергу складається з набору мультипроцесорів (SM – Streaming Multi-processor), в кожному з яких кілька потокових процесорів (SP – Streaming Processors) або ядер (в сучасних процесорах кількість ядер перевищує 1024).

Набір ядер кожного мультипроцесора працює за принципом SIMD (але з деяким відзнакою) – реалізація, яка дозволяє групі процесорів, що працюють паралельно, працювати з різними даними, але при цьому всі вони в будь-який момент часу повинні виконувати однакову команду.

В результаті GPU фактично став пристроєм, який реалізує потокову обчислювальну модель (stream computing model): є потоки вхідних і вихідних даних, що складаються з однакових елементів, які можуть бути оброблені незалежно один від одного.

4.2 TensorFlow

TensorFlow – це нейронна мережа, яка вчиться вирішувати завдання шляхом позитивного посилення і обробляє дані на різних рівнях (вузлах), що допомагає знаходити вірний результат [22].

Відкривши вихідний код бібліотеки машинного навчання TensorFlow, в Google спростили процес побудови і розгортання складних нейронних мереж. TensorFlow не надає кожному розробнику можливість скористатися плодами машинного навчання, але пропонує інтерфейси API для мов Python і C / C ++, що дозволяють підключатися до програми розробника.

Машинне навчання такого роду призначено винятково для дослідницьких цілей, але завдяки програмному забезпеченню з відкритим кодом на зразок TensorFlow підприємство отримує потужні засоби для використання своїх власних даних і їх обробки в дешевій хмарній середовищі.

Бібліотеки TensorFlow помітно спрощують вбудовування в додатки самонавчального елементів і функцій штучного інтелекту, призначених для розпізнавання мови, організації комп'ютерного зору або обробки природної мови. Звичайно, TensorFlow не єдина бібліотека глибинного навчання, але, як і пошуковий механізм Google, вона вважається кращою в своєму класі. Альтернативами є програмне забезпечення Torch, створене швейцарськими дослідниками, і розробка Каліфорнійського університету в Берклі Caffe, остання версія якої, Caffe2, була спроектована за участю Facebook.

Google дозволяє використовувати TensorFlow тільки на одній машині з декількома графічними процесорами, що стримує масштаби застосування цього інструменту на підприємствах. Звичайно, існують шляхи обходу зазначеного обмеження, але на створення таких рішень будуть потрібні певні знання, час і гроші.

Згідно з інформацією, опублікованою на сайті TensorFlow, програмну бібліотеку використовує цілий ряд великих компаній, в тому числі Airbnb,

Airbus, Dropbox, Snapchat і Uber (правда, можливо, і не найкращим для себе способом). Тим часом тривають пошуки нових сценаріїв. Однією з компаній, які не побоялися звернутися до TensorFlow, є британський електронний супермаркет Ocado. Його команда дослідників даних застосовує бібліотеку для самих різних цілей, починаючи від алгоритмів маршрутизації роботів, що переміщуються по складах, і закінчуючи поліпшенням прогнозування попиту (яке поки базується на алгоритмах лінійної регресії десятирічної давності) і пропозицією покупцям товарів відповідно до їх недавніми уподобаннями.

Спочатку TensorFlow в Ocado використовували для керування електронною поштою, що надходить в контактний центр. Спочатку всі листи оброблялися послідовно, незалежно від їх пріоритету. Ускладнення виникали в погану погоду, коли кількість листів збільшувалася в три-чотири рази, а їх доставка перетворювалася на серйозну проблему. Компанія Ocado все ж стала клієнтом Google і використовує сервіс BigQuery в Google Cloud для обробки своїх запитів і організації зберігання. Говорячи про запропонований інструмент, TensorFlow дозволяє через бібліотеки отримувати доступ до різних моделей навчання. Їх доведеться освоювати і адаптувати, проте це прискорить ваш процес навчання. TensorFlow не вирішує проблем, але надає набір інструментів, що дозволяє абстрагуватися від складності нейронної мережі і використовувати її для вирішення поставлених перед вами завдань

4.3 Порівняльний аналіз 3D-реконструкції

Як для прогнозування камери, так і для прогнозування SDF, використано набір даних ShapeNet Core, який включає 3 категорії об'єктів, та офіційний спліт-тренінг / тестування для навчання та тестування даного методу. Для 2D-зображень використовуються візуалізовані види, надані 3D-R2N2 [23]. Навчено єдину мережу для всіх категорій та повідомляються результати тестування, створені цією мережею.

Новий набір 2D-даних, наданий оригінальним набором даних 3D-

R2N2, кожна модель має 24 види з обмеженими варіаціями кутів камери. Камера завжди вказує на початок координат, а об'єкт завжди знаходиться на початку координат. Отже, набір даних має лише 3 ступені свободи. Для кожної моделі сітки новий набір даних надає 36 переглядів із меншими варіаціями та 36 переглядів із більшими варіаціями. Тут також дозволяється об'єкту зміщуватися від початку в просторі, тому набір даних містить 5 ступенів свободи (ігнорується кут нахилу камери, оскільки це дуже рідко в реальному світі). Роздільна здатність нещодавно відтвореного зображення дорівнює 224 на 224 замість оригінального 137 на 137. Крім того, для полегшення майбутніх досліджень також поєднується кожне 2D-зображення RGBA із глибиною зображення, картою нормалі та зображенням альbedo, що надаються каналами зображення (рисунок 4.1).

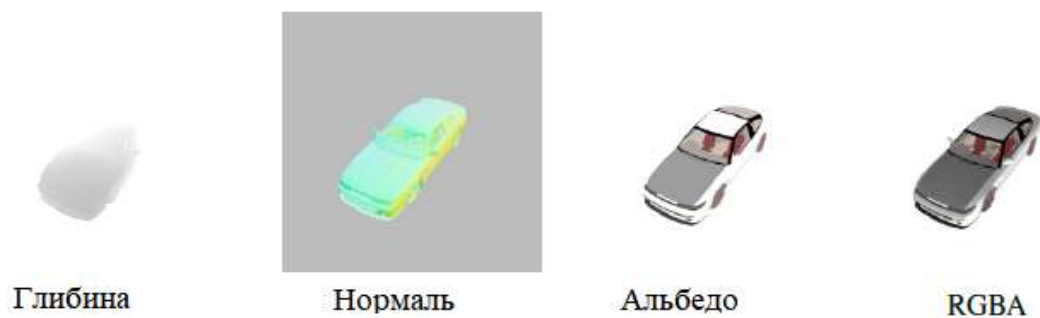


Рисунок 4.1 – Кожне зображення об'єкта має чотири зображення відповідно

Для кожної 3D-сітки в ShapeNet Core спочатку створюється сітка SDF з роздільною здатністю 256^3 . Моделі в ShapeNet Core вирівнюються, і цей вирівняний простір моделей вибирається як простір, де кожен вигляд рендерингу в 3D-R2N2 являє собою перетворення в інший простір камери.

Окремо мережа навчається оцінювати пози камери та мережу прогнозування SDF. Для обох мереж було використано VGG-16 як кодер зображення. Навчаючи мережу прогнозування SDF, вилучено локальні властивості, використовуючи параметри основної відповідності камер. Як було сказано раніше, ISN може генерувати підписане поле відстані з

довільною роздільною здатністю шляхом безперервної вибірки точок та регресії їх значень SDF. Однак на практиці основний інтерес викликають точки поблизу ізоповерхні S_0 . Тому використовується вибірка Монте-Карло для вибору 2048 точок сітки за гауссовим розподілом $N(0; 0.1)$ під час тренування. Вибрано $m_1 = 4$, $m_2 = 1$ і $\delta = 0.01$ як параметри формули 4.3. Данна мережа реалізована за допомогою TensorFlow. Використовується оптимізатор Адама із швидкістю навчання 1×10^{-4} та розміром пакету 16. Для тестування спочатку використовується мережа передбачення положення камери, щоб оцінити позу камери для вхідного зображення та подати оцінені параметри як вхідні дані для передбачення SDF.

Для кількісних оцінок застосовуються три часто використовувані метрики для обчислення різниці між реконструйованим об'єктом сітки та його сіткою відповідного мешу: Chamfer Distance (CD), Earth Mover's Distance (EMD) між рівномірно вибраними хмарами точок та Intersection over Union (IoU) на вокселізованих сітках.

4.4 Порівняльний аналіз створенної реконструкції

Було проведено аналіз реконструкції з найсучаснішими методами: AtlasNet, Pixel2Mesh, 3DN, OccNet та IMNET. AtlasNet та Pixel2Mesh генерують сітку з фіксованою топологією з 2D-зображення. 3DN деформує задану вихідну сітку для реконструкції цільової моделі. Порівнюючи з цим методом, було обрано вихідну сітку із заданого набору шаблонів, роблячи запит на вбудовування шаблону. IMNET та OccNet передбачають знак SDF для реконструкції тривимірних фігур. Оскільки IMNET навчає окрему модель для кожної категорії, впроваджено їх модель і навчено одну модель для всіх трьох категорій. Через невідповідність масштабів фігур, реконструйованих даним методом та OccNet, повідомляється лише про їх IoU, який є інваріантним щодо масштабу. Крім того, навчено 3D-модель CNN, позначену як «3DCNN», де кодер такий самий, як у ISN, а декодер – це

об'ємна 3D-структура CNN із вихідним розміром 64^3 . Основною істиною для 3DCNN є значення SDF на всі 64^3 місця розташування сітки. І для IMNET, і для 3DCNN використовується той же метод реконструкції поверхні для виведення відновлених сіток. Також повідомляються результати ISN, використовуючи оцінену позу камер та основні параметри відповідності, позначені як «ISN». AtlasNet, Pixel2Mesh та 3DN використовують явне формування поверхні, тоді як 3DCNN, IMNET, OccNet та даний метод відновлюють неявні поверхні.

Таблиця 4.1 – Кількісні результати на ShapeNet Core для різних методів

		Стілець	Гвинтівка	Літак
EMD	AtlasNet	5.82	5.35	5.67
	Pxl2mesh	5.52	5.04	5.44
	3DN	6.45	4.78	5.13
	IMNET	5.01	4.65	4.53
	3D CNN	5.01	4.71	4.32
	ISN	4.67	4.30	4.47
CD	AtlasNet	16.21	7.59	19.04
	Pxl2mesh	14.18	7.51	16.45
	3DN	20.23	6.26	9.09
	IMNET	14.27	10.73	10.86
	3D CNN	14.35	9.80	8.36
	ISN	10.53	8.48	8.59
IoU	AtlasNet	29.7	48.3	27.0
	Pxl2mesh	45.2	54.7	54.1
	3DN	39.4	59.6	64.2
	IMNET	57.2	55.4	77.5
	3D CNN	57.6	53.7	79.9
	ISN	54.3	62.3	77.1

Як показано в таблиці 4.1, ISN перевершує всі інші моделі в EMD та IoU. Тільки 3DN працює ефективніше, ніж данна модель на CD, однак 3DN вимагає більше інформації у вигляді вихідної сітки як вхідних даних. На рисунку 3.7 показані якісні результати. Як проілюстровано в кількісних, так і в якісних результатах, неявне представлення поверхні забезпечує гнучкий метод генерації 3D-сіток із варіантом топології. Порівняння з 3D CNN показують, що прогнозування значень SDF для заданих точок дає більш гладкі поверхні, ніж генерування фіксованого обсягу 3D за допомогою вбудовування зображення. Припускається, що це пов'язано з тим, що SDF є безперервною функцією щодо точок розташування. Глибинній мережі важче наблизити загальний обсяг SDF лише за допомогою глобальних функцій зображення. Більше того, цей метод перевершує IMNET та OccNet з точки зору відновлення деталей фігури. Наприклад, на рисунку 3.7, локальне вилучення особливостей дозволяє данному методу генерувати різні візерунки спинок стільців у перших трьох рядах, тоді як інші методи не в змозі захопити такі деталі. Додатково перевірено ефективність локального модуля вилучення функцій. Незважаючи на те, що використання параметрів камери для перевірки достовірності даних перевершує використання передбачуваних параметрів камери за кількісними результатами, відповідні якісні результати не демонструють суттєвої різниці.

Таблиця 4.2 – Показник для різних порогів (% довжини сторони обсягу реконструкції) для всіх категорій

Поріг(%)	0.5%	1%	2%	5%	10%	20%
3DCNN	0.114	0.385	0.753	0.954	0.982	0.997
IMNet	0.113	0.376	0.724	0.943	0.978	0.995
ISN	0.129	0.417	0.718	0.962	0.983	0.996

Обчислимо показник (Таблицю 4.2), який вимірює відсоток площі

поверхні, яка реконструюється достовірно, і таким чином забезпечує надійну метричність. В оцінках використовуємо

$$F_1 = 2 * (\text{Точність} * \text{Відкликання}) / (\text{Точність} + \text{Відкликання}).$$

Рівномірно відбираються точки як з достовірних даних, так і з генерованих сіток. Визначається точність як відсоток сформованих точок, відстань яких до найближчої точки відповідності даних менше порогу. Подібним чином, визначається відкликання як відсоток точок достовірних даних, відстань яких до найближчої генерованої точки менше порогового значення.

4.5 Оцінка параметрів камери

Враховуючи PC_w хмари точок у світових координатах для вхідного зображення, ми перетворюємо PC_w , використовуючи передбачувану позу камери, і обчислюємо середню відстань d_{3D} між трансформованою хмарою точок та достовірною хмарою точок в просторі камери. Також обчислюється 2D-помилка репроекції d_{2D} трансформованої хмари точок після того, як було зпроектовано її на вхідне зображення.

У таблиці 4.3 представлені d_{3D} та d_{2D} данного методу. За допомогою подання обертання 6D цей метод перевершує аналоги на 2 пікселі з точки зору помилки 2D перепроекції.

Таблиця 4.3 – Порівняння оцінки пози камери.

	ISN	ISN _{cam}
d_{3D}	0.157	0.189
d_{2D}	3.85	5.38

Також тренується і тестується оцінка пози на новому наборі даних 2D.

Навіть ці зображення мають більшу варіацію ракурсів, оскільки завдяки кращій якості рендерингу можна досягти середньої 2D-відстані 6,38 пікселя на 224 на 224 зображення (3,67 пікселя, якщо нормалізувати до вихідної роздільної здатності 137 на 137).

4.6 Дослідження абляції та інтерполяції

Щоб продемонструвати вплив оцінки пози камери, вилучення локальних особливостей та різних архітектур мережі, було проведено дослідження абляції для категорії «стілець» ShapeNet, оскільки вона має найбільшу різноманітність. У таблиці 4.4 представлені кількісні результати, а на рисунку 4.2 – якісні результати.

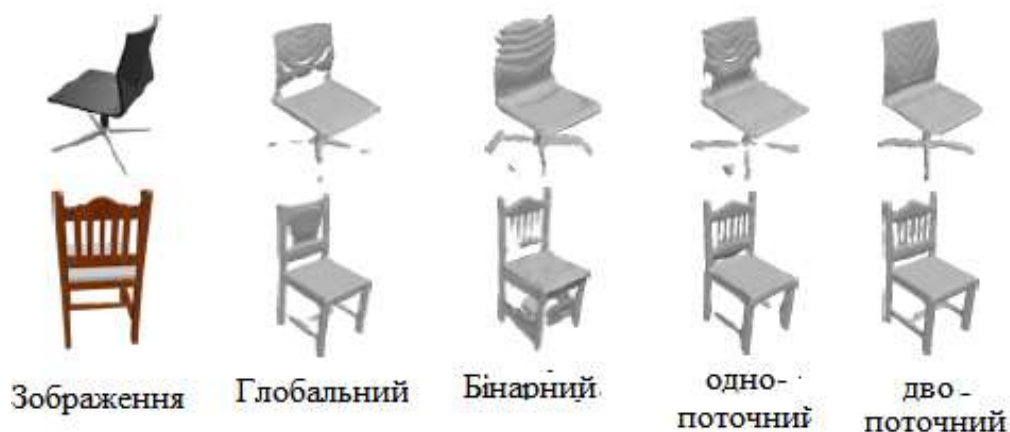


Рисунок 4.2 – Результати даного методу з використанням різних параметрів

Як було показано вище, оцінка положення камери потенційно може внести невизначеність у процес вилучення локальних особливостей із середньою помилкою повторного проектування 3.85 пікселів. Незважаючи на те, що кількісні результати реконструкції з параметрами достовірних даних постійно перевершують результати з розрахунковими параметрами, наведеними в таблиці 4.4, рисунок 4.2 демонструє, що невелика різниця в проекції зображення суттєво не впливає на

якість реконструкції. Бінарна класифікація формулює прогнозування SDF як двійкову проблему класифікації, передбачаючи ймовірність перебування точки всередині або поза поверхнею S_0 .

Незважаючи на те, що було проілюстровано вищі показники, додатково перевіряється ефективність регресійного нагляду використовуючи власну структуру мережі. Замість того, щоб створювати значення SDF, мережа тренується під наглядом класифікації та виводиться ймовірність того, що точка знаходиться всередині поверхні сітки. Для оптимізації цієї мережі було використано перехресну ентропію втрат softmax. Результати цієї класифікаційної мережі повідомляється як «бінарний».

Локальні властивості зображення кожної точки забезпечують доступ до відповідної локальної інформації, яка фіксує деталі фігури. Щоб перевірити ефективність цієї інформації, вилучається модуль «вилучення локальних властивостей» з ISN і позначається цей параметр як «Глобальний». Ця модель передбачає значення SDF виключно на основі глобальних властивостей зображення. Порівнюючи «Глобальний» з іншими методами в таблиці 4.4 та рисунку 4.2, робиться висновок, що вилучення локальних особливостей допомагає моделі фіксувати деталі форми та значно покращувати якість реконструкції.

Таблиця 4.4 – Результати обробки стільця

Поза камери	Бінарне поле	Глобальний	Однопоточне поле	Двопоточне поле
EMD	4.88	4.57	4.87	4.42
CD	10.57	9.44	10.43	9.35
IoU, %	68.9	67.8	68.45	69.3

Для подальшої оцінки впливу різних мережевих архітектур, на додаток до данної оригінальної архітектури з двома декодерами (яка називається «двопоточною»), також було представлено архітектуру «одного потоку», де

глобальні особливості, локальні особливості , а також точкові об'єкти об'єднуються і подаються в єдиний декодер, який передбачає значення SDF. Як проілюстровано в таблиці 4.4 та на рисунку 4.2, оригінальний параметр «Двопоточний» дещо перевершує «Однопоточний», що показує, що ISN надійний для різних архітектур мережі.



Рисунок 4.3 – Результат інтерполяції фігури

На рисунку 4.3 показано результати інтерполяції фігури, де інтерполюється як глобальні, так і локальні властивості зображення, переходячи від крайньої лівої вибірки до крайньої правої. Можна помітити, що породжена форма поступово трансформується.

Тест із онлайн-зображеннями товарів на рисунку 4.4 ілюструє результати 3D-реконструкції ISN на онлайн-зображеннях продуктів.



Рисунок 4.4 – Перевірка моделі навчання на зображеннях

Данна модель також може приймати декілька 2D-зображень одного і того ж об'єкта. Після вилучення глобальних та локальних властивостей зображення для кожного подання застосовуємо максимальний пул та використовуємо отримані властивості як вхідні дані для кожного декодера.

Перенавчено мережу для 3 вхідних зображень. Поєднання функцій мульти-перегляду допомагає ISN надалі звертатись до деталей форми.

Отримавши 3D-точку та вхідне зображення, ISN передбачає значення SDF для точки. Виводячи локальний модуль вилучення особливостей, проектуючи 3D-точку на площину зображення із передбачуваним положенням камери. За допомогою таких локальних властивостей ISN здатний фіксувати дрібно деталізовані деталі та створювати високоякісні 3D-моделі.

Експерименти підтверджують вищу ефективність ISN порівняно з найсучаснішими методами та гнучкість данної моделі. Хоча і було досягнуто впроваджену продуктивність в реконструкції одного зображення, цей метод взможі обробляти об'єкти тільки з чітким фоном, так як він тренувався з візуалізованими зображеннями.

4.7 Вимоги до апаратного та програмного забезпечення

Головною проблемою, що обмежує використання методів глибокого навчання, є недостатня продуктивність персональних комп'ютерів для навчання. Данну роботу було проведено на звичайному комп'ютері з підтримкою ядер CUDA. Навчання згорткової мережі з початку до кінця на такому обладнанні буде надзвичайно тривалим. Таким чином, віддавалась перевага методам, які були встановлені для доступу до заздалегідь підготовлених мереж.

Головним обладнанням для реалізації нейронної мережі був персональний комп'ютер з наступними характеристиками:

- процесор: Intel Core i7-9750H

- кількість ядер: 6
- кількість потоків: 12
- базова частота: 2.6 - 4.5 ГГц
- оперативна пам'ять: 16 ГБ DDR4, 2666MHz, 2 * 8
- жорсткий диск: SSD M.2 512 ГБ
- відеокарта: nVidia GeForce RTX 2060, 6 ГБ
- операційна система: Windows 10

Виходячи із специфіки роботи додатку для коректної роботи клієнтської частини необхідні такі мінімальні характеристики:

- встановлений браузер Internet Explorer версії 10 або вище;
- встановлений браузер Google Chrome, Opera, Mozilla Firefox, і т.д.

Для роботи мережі потрібні наступні характеристики:

- графічний процесор: nVidia GeForce 1070 (або аналогічні йому з підтримкою CUDA);
- операційна система: Ubuntu, Linux або Windows 10;
- tenorflow 1.10 (також працює з версіями 1.11, 1.12, 1.13).

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було розроблено згорткову нейронної мережі для візуалізації 3D-моделей з 2D зображень, було розглянуто і реалізовано підхід для створення 3D моделей використовуючи як одне зображення, так і декілька.

Розглянуто актуальність розробки нейронних мереж. Досліджені моделі та методи побудови згорткової нейронної мережі. Розглянуті існуючі методи навчання нейронних мереж. Розглянуті різновиди згорткових мереж.

Розроблено та програмно реалізовано згорткову нейронної мережі для візуалізації 3D-моделей з 2D зображень.

Було здійснено огляд і аналіз існуючих методів розв'язання вхідної задачі. Були розглянуті різні моделі для створення візуалізуючих мереж.

В рамках дослідження було проведено аналіз роботи існуючих мереж для візуалізації 3D-моделей з 2D зображень та була створена таблиця порівняння отриманих результатів.

Експериментально доведено, що похибка в нейронній мережі тривимірних об'єктів з застосуванням лише одного зображення не є значною порівняно зі складними алгоритмами, які вимагають потужну систему для обробки великої кількості зображень для створення моделі, і результатом може бути не суцільна модель, а хмара точок, що вимагають додаткової обробки.

Результатом магістерської роботи стала згорткова нейронна мережа для візуалізації 3D-моделей з 2D зображень. Система оснащена зручним користувацьким інтерфейсом та задовольняє усім функціональним вимогам.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.1 Ващенко А.С. Огляд методів моделювання 3D об'єктів. Інформаційні технології та системи управління в економіці, техніці та екології *Інформаційні технології та системи управління в економіці, техніці та екології*: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 20-21 лют. 2020 р. Харків, 2020. С. 35.
2. The impact of machine learning on economics. URL: <https://www.nber.org/system/files/chapters/c14009/c14009.pdf>
3. Super Sketchpad Design and Improvement of Mathematics Teaching Based on 3D Virtual. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8047154/>
4. Z-buffer: Буфер глибини. URL: <https://gamedev.ru/code/terms/ZBuffer>
5. Чайник из Юты: история эталонной 3D-модели. URL: <https://tproger.ru/blogs/utah-teapot/>
6. Binary Space Partitioning (Бинарное разделение пространства). URL: <https://gamedev.ru/code/terms/BSP>
7. Virtual Evolution: An Alternate History of Cyberspace, 1988-1997. URL: <http://search.proquest.com/openview/551852c98713d7d104b584dcec403384/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>
8. Технології 3D друку. URL: <https://www.techpats.com/3d-printing-technologies-overview/>
9. VR-технології. What is Virtual Reality? URL: <http://web.tecnico.ulisboa.pt/ist188480/cmuf/introduction.html>
10. Roden, Judah A. Lamar University - Beaumont, ProQuest Dissertations Publishing: Video Game Industry Analysis: History, Growth, and Architecture. 2019. 27666251.
11. Katherine Celia Greder, Jie Pei, Jooyoung Shin: Design in 3D: a computational fashion design protocol. International Journal of Clothing Science and Technology, 2020

12. Petar Valchanov: 3D Modeling in Medicine - from Digital Tomography to a 3D Model. Scripta Scientifica Vox Studentium, 2017
13. Фотограмметрия. URL: <https://sapr.ru/article/25136>
14. Надир-триангулятор. URL: <http://bvkras.narod.ru/HistoryFGM/HistoryFGM14.htm>
15. PIFu: Pixel-Aligned Implicit Function for High-Resolution Clothed Human Digitization. URL: <https://shunsukesaito.github.io/PIFu/>
16. DIB-R. Learning to Predict 3D Objects with an Interpolation-based Differentiable Renderer. URL: <https://nv-tlabs.github.io/DIB-R/>
17. C3DPO: Canonical 3D Pose Networks for Non-Rigid Structure From Motion. URL: <https://research.fb.com/publications/c3dpo-canonical-3d-pose-networks-for-non-rigid-structure-from-motion/>
18. Zhiqin Chen and Hao Zhang. Learning implicit fields for generative shape modeling. arXiv preprint arXiv:1812.02822, 2018.
19. Angel X. Chang, Thomas Funkhouser, Leonidas Guibas, Pat Hanrahan, Qixing Huang, Zimo Li, Silvio Savarese, Manolis Savva, Shuran Song, Hao Su, Jianxiong Xiao, Li Yi, and Fisher Yu. Shapenet: An information-rich 3d model repository. arxiv, 2015.
20. Yi Zhou, Connelly Barnes, Jingwan Lu, Jimei Yang, and Hao Li. On the continuity of rotation representations in neural networks. arXiv preprint arXiv:1812.07035, 2018.
21. CUDA. URL: <https://de.geforce.com/hardware/technology/cuda>
22. TensorFlow. URL: <https://www.tensorflow.org/>
23. Christopher B Choy, Danfei Xu, JunYoung Gwak, Kevin Chen, and Silvio Savarese. 3d-r2n2: A unified approach for single and multi-view 3d object reconstruction. In ECCV, 2016.