

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів

(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «РОЗРОБКА МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У САПР  
ТА ОБРОБКИ ВІДЕО ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦІЇ НА СФЕРИЧНИХ  
ПОВЕРХНЯХ»

«DEVELOPMENT OF METHODS FOR MODELING OBJECTS IN CAD AND  
VIDEO PROCESSING FOR DEMONSTRATION ON SPHERICAL  
SURFACES»

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи РТ-512м  
Спеціальності 172 Радіотехніка та  
телекомунікації

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)  
Інтелектуальні технології мікросистемної  
радіоелектронної техніки

Ігор БУЧКО

(прізвище та ініціали)

Керівник Наталія ФУРМАНОВА

(прізвище та ініціали)

Рецензент Андрій КОРОТУН

(прізвище та ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. зав.кафедри ІТЕЗ Малий О.Ю.

канд. техн. наук, доцент

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА**

Бучка Ігоря Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка методики моделювання об'єктів у САПР та обробки відео для демонстрації на сферичних поверхнях

керівник проєкту (роботи) Фурманова Наталія Іванівна, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «21» листопада 2023 року №448

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 26 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) системи 3D-моделювання, 3D сцена

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Відеопроєкції та можливості їх застосування;

2 Огляд технології відеопроєкції Fulldome;

3 Аналіз існуючих 3d пакетів;

4 Методика обробки fulldome відео

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 53 рисунка; презентація роботи (15 слайди)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
Розділ 1	Фурманова Н.І., доц.	01.09	
Розділ 2	Фурманова Н.І., доц.	01.10	
Розділ 3	Фурманова Н.І., доц.	01.11	
Розділ 4	Фурманова Н.І., доц.	01.11	
Нормоконтроль	Поспеева І.Є., ст. викладач	16.12	

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2023 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Визначення тематики роботи	1 тиждень	Виконано
2	Аналіз можливостей застосування відеопроекцій	2 тиждень	Виконано
3	Аналіз принципів створення відеопроекцій	3 тиждень	Виконано
4	Постановка задачі дослідження	4 тиждень	Виконано
5	Проведення літературного огляду технології відеопроекцій	5-7 тиждень	Виконано
6	Аналіз існуючих 3D пакетів	8 тижні	Виконано
7	Розробка рекомендацій до обробки відео для відеопроекції	9-10 тиждень	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	13 тиждень	Виконано
9	Оформлення супровідної документації	14 тиждень	Виконано
10	Нормоконтроль та рецензування	15 тиждень	Виконано
11	Захист роботи	16 тиждень	Виконано

Студент

Керівник проєкту (роботи)

\_\_\_\_\_

( підпис )

Бучко І.В.

(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

( підпис )

Фурманова Н.І.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра: 82 с., 54 рис., 33 джерело.

ПРОЄКЦІЯ, ВІДЕО, ОБ'ЄКТИВ, КАМЕРА, BLENDER, ПЛАНЕТАРІЙ, РЕНДЕР, ДИСПЛЕЙ.

Об'єктом дослідження в даному дипломному проєкті є методика обробки відео для відображення на сферичних поверхнях.

Мета роботи – пришвидшення створення обробки відео для відображення на сферичних поверхнях.

Основними задачами дипломного проєкту є аналіз існуючих методів обробки відео, розробка методики швидкої обробки відео, створення спеціальних камер із нестандартними параметрами.

Актуальність проведення дослідження полягає у тому, що з розвитком технологій відеопроєкцій та впровадженням їх у найрізноманітніші галузі сучасного життя виникає необхідність швидкої обробки відео через великий попит на виготовлення контенту.

Запропонована методика дозволяє пришвидшити обробку відео для виготовлення вмісту для проєкційного відображення на складних поверхнях.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ.....	7
ВСТУП.....	8
<b>1 ВІДЕОПРОЄКЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Принципи створення відеопроєкцій.....	11
1.1.1 Проєкція на плоску поверхню .....	11
1.1.2 Проєктування на довільну поверхню.....	12
1.1.3 Віртуальна копія реальної сцени .....	13
1.1.4 Плоскі текстури, вирівняні до поверхні .....	14
1.1.4 Перспектива віртуальної камери відрізняється від реального положення проєктора.....	15
1.2 Застосування відеопроєкцій у виробництві, рекламі та мистецтві.....	17
1.3 Застосування відеопроєкцій в освіті .....	19
1.4 Застосування планетаріїв освіті та розвагах .....	20
1.5 Постановка задачі дослідження.....	23
<b>2 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ ВІДЕОПРОЄКЦІЇ FULLDOME .....</b>	<b>24</b>
2.1 Історія розвитку технології Fulldome.....	24
2.2 Визначення Fulldome технології.....	36
2.3 Технічні основи технології Fulldome .....	39
2.3.1 Об'єктив "Fisheye", один проєктор .....	40
2.3.2 Сферичне дзеркало, один проєктор.....	42
2.3.3 Мультипроєктори.....	45
2.4 Особливості лінзи Fisheye .....	46
<b>3 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ 3D ПАКЕТІВ.....</b>	<b>51</b>
3.1 Autodesk Maya .....	51

3.1.1 Переваги і недоліки Autodesk Maya .....	51
3.2 Сінема 4D.....	53
3.2.1 Переваги і недоліки Сінема 4D .....	54
3.3 Autodesk 3ds Max.....	56
3.3.1 Переваги і недоліки Autodesk Maya .....	57
3.4 Blender .....	59
3.4.1 Переваги і недоліки Blender .....	59
4 МЕТОДИКА ОБРОБКИ ВІДЕО FULLDOME ВІДЕО .....	63
ВИСНОВКИ.....	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	81

## **СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ**

2D – 2-dimensional

3D – 3-dimensional

CGI – computer-generated imagery

CPU – central processing unit,

EDM – electronic dance music

GPU – graphics processing unit

SFX – special effect

ОМ – оптико-механічний

## ВСТУП

Технологія проєкційного відображення, дуже актуальна в різних галузях завдяки своїй здатності перетворювати звичайні поверхні на динамічні інтерактивні дисплеї.

Проєкційне відображення широко застосовується в наступних галузях:

- реклама та маркетинг;
- індустрія святкових заходів і розваг;
- архітектурне проєктування;
- мистецтво та інсталяції;
- віртуальні конференції та віддалена співпраця;
- симуляції;
- освіта та навчання.

У сфері реклами проєкційне відображення використовується для створення кампаній, що привертають увагу. Це дозволяє маркетологам демонструвати продукти в інноваційний спосіб, проєктуючи візуальні ефекти на об'єкти або структури неправильної форми, тим самим покращуючи пізнаваність бренду та залишаючи незабутнє враження.

Проєкційне відображення стало основним елементом індустрії подій, від концертів і живих виступів до корпоративних заходів і виставок. Це додає динамічний візуальний елемент до навколишнього середовища, покращуючи загальну атмосферу та створюючи більш привабливий і незабутній досвід для відвідувачів.

Архітектори та дизайнери використовують проєкційне відображення для зміни зовнішнього вигляду будівель і споруд. Цю технологію можна застосувати, щоб підкреслити архітектурні особливості, розповісти історії за допомогою світла та руху або навіть імітувати різні проєкти перед впровадженням.

Проєкційне відображення служить засобом для самовираження митців і творців. Це дозволяє створювати динамічні та постійно мінливі арт-інсталяції, поєднуючи цифрові та фізичні елементи, щоб розширити межі традиційних форм мистецтва.

Із зростанням віддаленої роботи та віртуальної співпраці можна застосувати проєкційне відображення для покращення віртуальних конференцій. Це забезпечить більш привабливу та захоплюючу платформу для презентацій, тренінгів і спільної роботи, роблячи онлайн-взаємодію більш динамічною.

Проєкційне відображення використовується в симуляціях, таких як польоти та військові тренування, де реалістичні сценарії можна проєктувати на різних поверхнях для створення реалістичних тренувань.

У сфері освіти використовується для створення інтерактивного навчального середовища. Воно полегшує візуалізацію складних концепцій, що робить його ефективним інструментом для тренінгів, моделювання та навчальних презентацій.

Таким чином, технологія проєкційного відображення актуальна в різних секторах завдяки своїй здатності створювати захоплюючі, інтерактивні та візуально переконливі враження, що робить її цінним інструментом для покращення спілкування, розваг, освіти та творчого самовираження.

## 1 ВІДЕОПРОЄКЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Проекційне відображення, подібне до відображення відео та просторової доповненої реальності, це техніка проєкції, яка використовується для перетворення об'єктів і елементів на поверхню відображення для відеопроєкції. Об'єктами можуть бути складні промислові ландшафти, такі як будівлі, невеликі закриті об'єкти або театральні сцени (рис. 1.1). За допомогою спеціального програмного забезпечення 2D чи 3D об'єкт просторово наноситься на віртуальну програму, яка імітує реальне середовище, на яке він проєктується. Потім програмне забезпечення може взаємодіяти з проєктором, щоб розмістити будь-яке бажане зображення на поверхні цього об'єкта. Ця техніка використовується художниками та рекламистами, які можуть додавати додаткові виміри, оптичні ілюзії та поняття руху до раніше статичних об'єктів. Відео зазвичай поєднується зі звуком або запускається ним для створення аудіовізуальної розповіді. В останні роки ця методика також широко використовується в контексті культурної спадщини, оскільки вона виявилася чудовим розважальним інструментом.

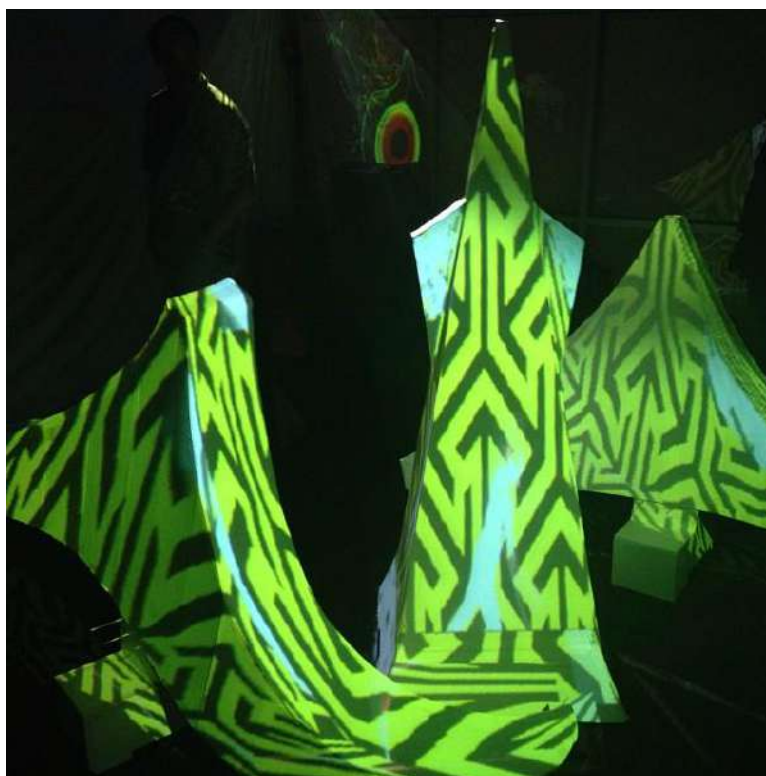


Рисунок 1.1 – Проекційне відображення візерунка на криволінійні поверхні

## **1.1 Принципи створення відеопроєкцій**

Після вибору або створення об'єкта, на який проєктуватиметься відео, використовується програмне забезпечення для відображення кутів відео на поверхні. По-перше, потрібно вибрати зображення або відео для проєктування. Потім кожне відео розміщується на призначеній для нього поверхні. Крім того, можна відобразити всю сцену в 3D і спробувати спроєктувати та замаскувати зображення назад на його каркас. Наступним кроком є маскуванню за допомогою шаблонів непрозорості, щоб фактично «замаскувати» точні форми та положення різних елементів будівлі або простору проєкції.

На 3D-карті визначаються координати розташування об'єкта відносно проєктора. Орієнтація проєктора XYZ, положення та специфікація об'єктива створюють певну віртуальну сцену(рис. 1.2) [1].

Для отримання найкращих результатів коригування зазвичай здійснюються шляхом ручного налаштування фізичної або віртуальної сцени. Великі проєктори з потужністю 20 000 люмен або більше використовуються для масштабних проєкцій, наприклад, на міські хмарочоси. Через масштаб і яскравість, які вимагають деякі проєкти, часто великі масиви потужних проєкторів об'єднують в одне зображення за допомогою методу, відомого як «змішування країв» або «стекування». Результатом є набагато яскравіша проєкція, яка зберігає бездоганний вигляд. Ця техніка використовується для більшості великих проєкційних шоу та вимагає навичок і терпіння для налаштування за допомогою спеціального програмного забезпечення. Для невеликих виробництв достатньо менших проєкторів із меншою потужністю. У більшості випадків проєктор з яскравістю 2200 люменів є достатнім для проєктування в умовах внутрішнього освітлення або театрального освітлення.

### **1.1.1 Проєкція на плоску поверхню**

Якщо об'єктом проєкції є плоска поверхня, як-от стіна, а проєктор знаходиться в довільному положенні, не звернений точно до тієї частини стіни, на

яку потрібно проєктувати, проєктоване зображення виглядає спотвореним. За допомогою гомографії ви можете легко попередньо спотворити проєктоване зображення, щоб воно виглядало неспотвореним на поверхні.

Таким чином завжди можна отримати правильно спроектоване зображення на плоскій поверхні незалежно від положення проєкторів, орієнтації на поверхню та характеристик його об'єктива.

### 1.1.2 Проєктування на довільну поверхню

Ручне зіставлення статичного віртуального проєктора з реальним проєктором.

Під час проєктування на довільну тривимірну поверхню, незалежно від того, як проєктор розташований і орієнтований на поверхню, отримане зображення здебільшого виглядатиме спотвореним. Однак потрібно зауважити, що є одна точка, з якої проєктоване зображення виглядає ідеально вирівняним, а саме: положення проєктора.

На фотографіях нижче зображено просту скульптуру з 2 коробок із спроектованою на неї площиною віконного столу (рис. 1.2). У той час, як на лівій фотографії проєктоване зображення спотворене, на правій фотографії, зробленій з точки зору проєктора, проєктоване зображення виглядає правильно.

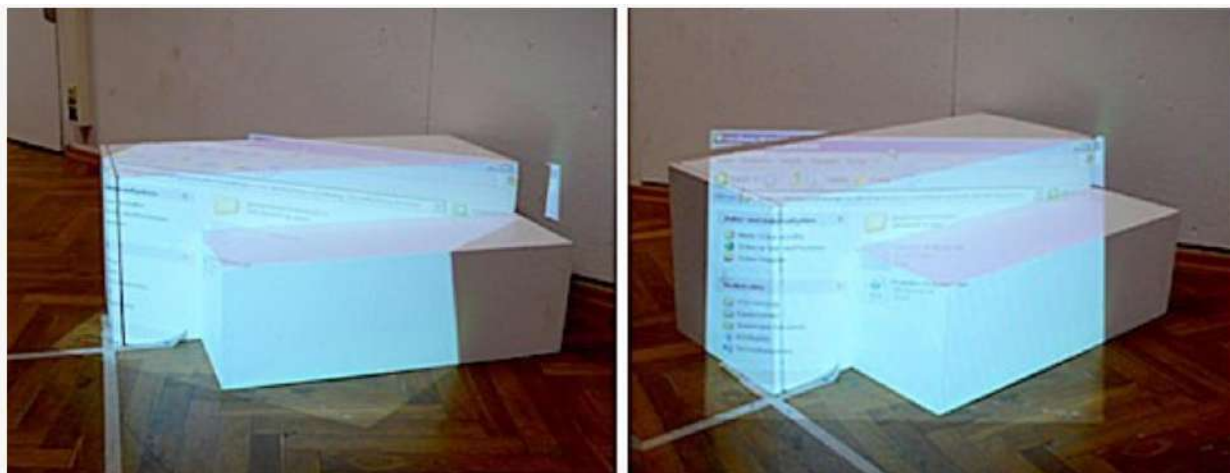


Рисунок 1.2 – Просторова скульптура з проєкцією

Ключ до правильної неспотвореної проєкції полягає в наступному: проєкція на довільну поверхню виглядає неспотвореною (тобто точно такою, як проєктується), якщо дивитися з точки зору проєктора.

Отже, щоб отримати неспотворений вигляд на довільній поверхні, просто потрібно надати проєктору зображення, яке відображає вид на цю поверхню з його власного положення. Іншими словами, реальний проєктор є камерою у віртуальному просторі, яка переглядає віртуальну копію реальної проєкційної поверхні. Якщо проєктується зображення, яке бачить ця віртуальна камера, за допомогою реального проєктора, воно точно підійде та виглядатиме неспотвореним на реальній поверхні.

Це ідеально працює лише в теорії, оскільки існує ймовірність того, що параметри віртуальних сцен ніколи точно не збігатимуться з параметрами реального світу, оскільки деякі з них, наприклад, орієнтацію проєкторів, важко точно виміряти.

### **1.1.3 Віртуальна копія реальної сцени**

Створення віртуальної копії реальної установки складається з трьох кроків:

- визначити початок координат реальної системи координат, яку треба співставити з конкретними осями і сіткою (рис. 1.3);
- створити цільову проєкційну поверхню як 3D-модель і правильно розмістити її у віртуальній сцені щодо початку системи координат: можна зробити це за допомогою зовнішнього інструменту 3D-моделювання або за допомогою геометричних примітивів, найкраще мати сітку, яку можна налаштувати вручну під час процесу зіставлення;
- виміряти положення, орієнтацію та характеристики лінзи проєктора: треба вказати усі параметри, які пропонує цей вузол, у посібнику з експлуатації проєкторів вказані ескізи, які містять інформацію про зміщення об'єктива та поле зору об'єктива.

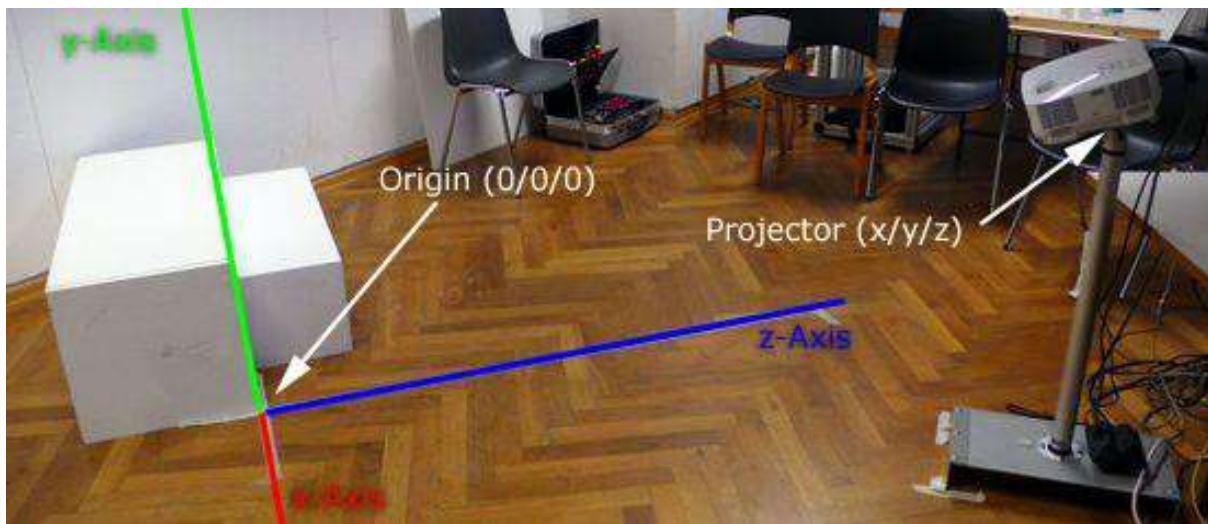


Рисунок 1.3 – Співставлення реальної та віртуальної системи координат

На цьому етапі є базові налаштування, де віртуальна сцена відповідає реальному світу.

#### 1.1.4 Плоскі текстури, вирівняні до поверхні

За допомогою цього базового налаштування тепер легко досягти ефекту, подібного до проєкту хмарочоса Valcucine від dotdotdot . Тут мета — проєктувати зображення таким чином, щоб вони відчувалися як властивість цільової поверхні, тобто. ніби вони де текстура об'єкта. Текстури мають виглядати точно так само, з якого б положення глядачі не дивилися на поверхню/скульптуру, і незалежно від положення проєкторів (рис. 1.4).

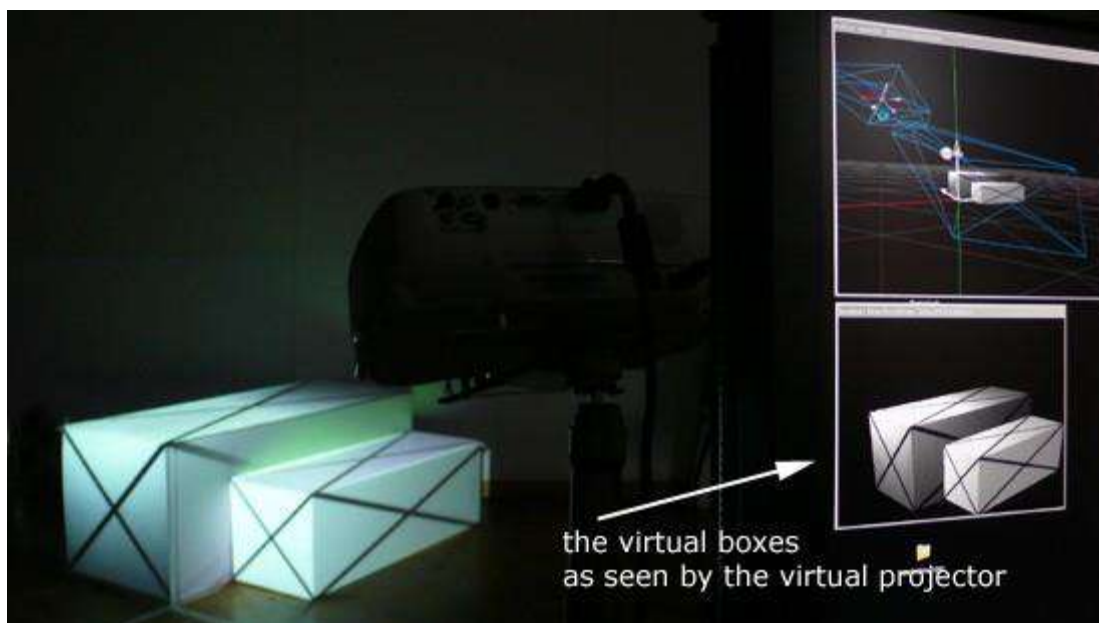


Рисунок 1.4 – Результат правильного налаштування віртуальної проєкції

Завдяки рендерингу 3D-моделі з тієї ж точки зору та використанням тих самих характеристик об'єктива, що й реальний проєктор для віртуальної камери, отримане зображення ідеально відповідатиме проєктованій поверхні. Будь-які плоскі текстури, які надаються 3D-моделі, виглядатимуть неспотвореними на реальній поверхні, а тому виглядатимуть і поводитимуться природно як плоскі текстури, які виглядатимуть однаково незалежно від точки зору глядача.

#### **1.1.4 Перспектива віртуальної камери, що відрізняється від реального положення проєктора**

З деякими налаштуваннями просто неможливо зробити так, щоб реальне положення проєктора збігалось з положенням віртуальної камери/проєктора. Можливо, є потреба, щоб віртуальну сцену переглядали з місця, де не можна розмістити проєктор у реальному світі. Тоді знадобитися кілька проєкторів реального світу, щоб спільно використовувати одну віртуальну перспективу.

У таких ситуаціях потрібні 2 проходи візуалізації:

- перший прохід рендерить сцену з потрібної перспективи;

– другий прохід візуалізує сцену з бажаної позиції проєкторів у реальному світі, тоді як результат першого проходу проєктується на поверхню 3D-моделі з точки зору віртуальної камери.

Ідея цієї установки полягає в тому, щоб спроектувати ефекти 3D-ілюзії на фасад коледжу Дизайну Schwäbisch Gmünd (рис. 1.5) [2].



Рисунок 1.5 – Налаштування віртуального проєктора

Відображення проєкцій можна розділити на чотири категорії:

–VJ'ing або VeeJay-ing (відео Jockeying), де живі події доповнюються (часто інтерактивними під музику) проєкціями, які є повністю динамічними, керованими в прямому ефірі та складаються із попередньо запрограмованих відео та комбінацій ефектів і ефектів, що накладаються;

–театральний, де проєкції попередньо встановлені, а сцени показуються на вимогу, зазвичай у встановленому порядку, у поєднанні з танцем або сценічним виступом, часто інтерактивним;

–статичний/інтерактивний, де дисплей налаштований і циклічно або взаємодіє з середовищем і глядачами за допомогою програмування;

–відео, де загалом довге, неінтерактивне, сегментоване шоу представлено як одне плавне відео, яке відтворюється від початку до кінця.

## 1.2 Застосування відеопроєкцій у виробництві, рекламі та мистецтві

Проекційне відображення вперше стало популярним завдяки рекламним кампаніям і відео-жокеям для електронних музикантів [3]. Такі великі компанії, як Nokia, Samsung, Unilever Pakistan, Pakistan Tobacco company, Bank Alfalah, Brighto Paints, Benson & Hedges, John Players Gold Leaf і BMW, відтоді використовували відеопроєкції в маркетингових кампаніях у містах по всьому світу, зазвичай використовуючи техніку проєкційного відображення сцен на стіни будівель. Проекційне відображення також може бути інтерактивним: Nokia Ovi Maps створила проєкт, у якому проєкції імітували рухи людей. Проекційне відображення використовувалося на конференціях як засіб декорації або для занурення аудиторії в досліджувану тему. Зображення можна проєктувати на плоску поверхню або на незвичайний об'єкт, наприклад автомобіль чи стілець. Фестиваль Fête des Lumières у Ліоні, фестиваль на честь Діви Марії, включав 3D-відображення у свої постановки, створюючи ілюзію гігантського пінболу на боці будівлі (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Проекційне відображення на Fête des Lumières П. Варренера в Ліоні (2008)

Загальні техніки для цих перформансів включають 3D-мапінг і 3D-проекцію для створення ілюзії глибини, а також руху, наприклад, будівель, що руйнуються.

Він також використовується в таких технологіях, як Domes, де він поєднується з віртуальною та доповненою реальністю для створення 360-градусних проєкцій для більш захоплюючого досвіду.

Використання проєкційного відображення на телебаченні та у фільмах стає все більш популярним. У науково-фантастичному фільмі *Oblivion* (2013) режисери використовували проєкційне відображення, щоб створити захоплююче середовище [4]. Для телевізійної реклами 2016 року компанія Audi використала проєкційне відображення, щоб продемонструвати технологію автомобіля Audi Q7. Рекламний ролик «Проекція величі» [5] був знятий без CGI і використовував лише контент, який був знятий наживо камерою [6].

У співтоваристві електронної танцювальної музики (EDM) ді-джеї все частіше супроводжують свою музику синхронізованим візуальним матеріалом, який можна записувати або відтворювати наживо за допомогою Video Jockey (VJ). Хоча зазвичай використовуються звичайні проєкційні екрани, деякі художники створюють спеціальні 3D-інсталяції для проєктування. Багато художників EDM використовують техніку проєкційного відображення. Візуальні художники також використовують проєкційне відображення для творчого вираження, іноді для покращення існуючих творчих засобів, таких як живопис і малюнок [7].

Художники можуть використовувати його як авангардну форму вираження, оскільки це нова технологія, яка може перетворити їхні творчі ідеї на 3D-проєкції, зв'язуючись із аудиторією по-новому [8]. Відеопроекції з'явилися в таких міських центрах, як Нью-Йорк і Лондон, де художники використовували партизанські проєкції публічно без будь-якого необхідного дозволу. Таким чином художники можуть демонструвати свої роботи в будь-якому місці, оскільки будь-що і будь-де може бути полотном. Часто люди також використовують його як засіб активізму; група Occupy Wall Street використала його для проєктування на будівлю Verizon Wireless у Нью-Йорку як засіб візуального поширення інформації

про те, що Осциру Wall Street все ще жива [9]. Японська театральна п'єса «Таємниці Йосіцуне I&II » (2012–2014) відома першим великим використанням проєкційного відображення в японських театральних виставах [10] .

Проєкційне відображення часто використовується Walt Disney Imagineering і Walt Disney Creative Entertainment у Disney Parks. Приклади включають The Magic, the Memories and You, Disney Dreams!, Celebrate the Magic, Once Upon a Time, Disneyland Forever, Halloween Screams, Believe... In Holiday Magic, Remember... Dreams Come True, Happily Ever After [11] і нещодавно Sunset Seasons Greetings at Disney's Hollywood Studios.

Коли Пол Окенфолд став першим ді-джеєм, який виступив наживо в Стоунхенджі, було використано проєкційне відображення, щоб перетворити доісторичну пам'ятку на вражаюче світлове шоу [12].

### **1.3 Застосування відеопроєкцій в освіті**

У освітньому процесі доцільно використовувати світлотехнічні й звукотехнічні засоби. Світлотехнічні засоби, як-от: відеопроєкційні апарати, діапроєктори, кадропроєктори, кодоскопи, фільмоскопи.

Сучасні мультимедіатехнології дають змогу поєднувати різні види представлення інформації: текст, статичну й динамічну графіку, відео- та аудіозаписи в єдиний комплекс, що дає учням змогу активно брати участь у різних видах діяльності. Отже, викладач під час проведення заняття з навчання мови та розвитку мовлення має можливість:

–інтенсифікувати процес, поєднуючи форму, організацію, темп заняття і слухозоровий вплив на учнів з її реальними можливостями: щодо сприймання й перероблення інформації;

–ефективно реалізувати принципи навчання, що виховує, тому що телеекран дає змогу зробити процес засвоєння пропонованого матеріалу більш живим, цікавим, проблемним, переконливим і емоційним.

## 1.4 Застосування планетаріїв освіти та розвагах

Через деякі недоліки класичних планетаріїв видно, що портативні планетарії (рис. 1.7) стають перспективним інструментом для впровадження в галузі освіти.



Рисунок 1.7 – Портативний планетарій

Інтеграція технологій в освіту та розваги засвідчила значний прогрес, і однією з таких інновацій, яка виділяється, є портативний надувний купол планетарій. Ця надувна конструкція, що нагадує футуристичний купол, знайшла свою нішу в бездоганному поєднанні освіти та розваг. Створюючи захоплюючий і захоплюючий досвід, він довів, що є універсальним інструментом для вдосконалення навчання, зокрема в галузях астрономії та науки, а також пропонує унікальну форму розваги.

Портативний надувний планетарій є інноваційним рішенням для традиційного навчання в класі, особливо в галузі астрономічної освіти. Маючи можливість проєктувати реалістичне нічне небо на внутрішню частину купола, студенти потрапляють у простір, де вони можуть досліджувати сузір'я, планети та

космічні явища. Цей захоплюючий досвід сприяє глибшому розумінню концепцій астрономії, роблячи абстрактну небесну механіку відчутною та привабливою.

Окрім астрономії, купол виявляється корисним у ширшому спектрі природничо-географічної освіти. Він може імітувати подорожі людським тілом, геологічні ландшафти чи історичні події. Це динамічне навчальне середовище стимулює допитливість і сприяє інтерактивним дискусіям, перетворюючи пасивних учнів на активних учасників їхньої освітньої подорожі.

Викладачі можуть використовувати купол для спільних проєктів і презентацій. Студенти можуть працювати разом, щоб створювати та презентувати власний астрономічний або науковий контент, покращуючи командну роботу, комунікативні навички та творчі здібності. Цей аспект співпраці додає досвіду навчання соціальний вимір, роблячи його не лише освітнім, але й соціально збагачувальним.

Портативний надувний планетарій не обмежується формальними освітніми умовами, він став захоплюючим елементом публічних шоу та заходів. Наукові центри, музеї та розважальні заклади використовують його портативність, щоб донести астрономію та наукові концепції безпосередньо до громадськості. Від спостереження за зірками до мультимедійних презентацій, купол пропонує нову форму розваги, яка поєднує освіту з задоволенням.

Для розважальних цілей купол забезпечує полотно для захоплюючої розповіді історій і візуальних вражень. Завдяки проєкційним технологіям він може перенести глядачів у вигадані світи, історичні епохи чи фантастичні пейзажі. Це поєднання технологій і розваг захоплює аудиторію будь-якого віку, забезпечуючи унікальний і незабутній досвід.

Однією з ключових переваг портативного надувного планетарію є його мобільність. Він розроблений для легкого транспортування та налаштування, його можна збирати в різних місцях, розширюючи його охоплення для різноманітної аудиторії. Ця мобільність робить його ідеальним інструментом для освітніх програм і громадських заходів.

Універсальність купола додатково покращується завдяки його адаптації до різних аудиторій. Незалежно від того, чи використовується це для учнів початкової школи, курсів університетського рівня чи громадських розважальних заходів, зміст і презентацію можна налаштувати відповідно до рівня освіти та інтересів аудиторії. Ця адаптивність гарантує, що купол залишається актуальним і ефективним інструментом у різних контекстах.

Мобільність і доступність портативного надувного планетарію роблять його ефективним інструментом для програм охоплення, спрямованих на громади, які недостатньо забезпечені. Враховуючи його економічну ефективність, купол дозволяє навчальним закладам з обмеженим бюджетом впроваджувати захоплюючі астрономічні та наукові програми. Це особливо важливо для шкіл і організацій, які прагнуть забезпечити збагачення освітнього досвіду без фінансових обмежень, пов'язаних із традиційними планетаріями.

У міру розвитку технологій портативний надувний купол планетарію розвивається разом. Інтеграція з передовими технологіями, такими як доповнена реальність (AR) і віртуальна реальність (VR), розширює його можливості, відкриваючи нові можливості для інтерактивного та динамічного навчання. Ці технологічні досягнення гарантують, що купол залишається в авангарді інноваційних освітніх інструментів.

Підсумовуючи, портативний надувний планетарій Dome виходить за межі своєї фізичної структури, щоб стати каталізатором трансформаційних освітніх і розважальних вражень. Його адаптивність, економічна ефективність та інтеграція з новими технологіями позиціонують його як інновацію у сфері охоплення та інтерактивного навчання. Продовжуючи долати бар'єри та охоплювати різноманітну аудиторію, портативний надувний купол планетарію залишається символом потужного поєднання між технологіями, освітою та розвагами. Його вплив на сприяння допитливості, співпраці та доступності робить його дуже перспективним у формуванні майбутнього освітнього процесу.

Портативний надувний планетарій є свідченням трансформаційної сили технологій у сфері освіти та розваг. Його здатність створювати захоплюючі

освітні враження зробила його цінним надбанням у школах, наукових центрах і розважальних закладах по всьому світу. Поєднуючи освіту з розвагами, цей надувний купол не тільки викликає цікавість і навчання, але й відкриває нові виміри для дослідження та залучення до сфери науки та за її межами. Оскільки технології продовжують розвиватися, портативний надувний планетарій Dome залишається яскравим прикладом того, як інновації можуть збагатити як навчання, так і розваги.

### **1.5 Постановка задачі дослідження**

З розвитком інноваційних технологій відеопроєкції набули широкого розповсюдження в різних галузях нашого життя, від реклами та маркетингу до освіти та розваг. В поєднанні з мобільністю і доступністю портативного надувного планетарію виникає необхідність в пришвидшенні виготовлення відеоконтенту відеопроєкцій для задоволення великого попиту.

Основною метою даної дипломної роботи магістра створення методики, яка пришвидшить обробку відео для відображення на сферичних поверхнях.

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- здійснити аналіз принципів створення відеопроєкцій;
- провести порівняльний аналіз існуючих 3d пакетів;
- створити методику обробки відео для відео проєкцій.

## 2 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ ВІДЕОПРОЄКЦІЇ FULLDOME

Fulldome – це купольна відеопроєкція, де глядач оточений відеопроєкцією під напівсферичним кутом огляду.

Купол (горизонтальний або похилий), заповнюється комп'ютерною анімацією в реальному часі (інтерактивною) або попередньо обробленою (лінійною), зображеннями в реальному часі або композитним середовищем. Незважаючи на те, що астрономія є найпоширенішою темою, немає обмежень щодо вмісту, і тепер вона використовується також для розважальних шоу та інших гіперреалістичних презентацій.

### 2.1 Історія розвитку технології Fulldome

Планетарій – це, за визначенням, пристрій, який показує модель космосу. Ранні планетарії включали настільні механічні моделі Сонячної системи (як її називали в той час), відомі як Оррері, названі на честь її винахідника, ірландського графа Оррері, який створив її в 1712 році. Ці планетарії розширилися до більш складних фізичних моделей — деякі з них заповнювали кімнати. Деякі макети небес були намальовані всередині маленьких портативних куполів. Відвідувачі могли зайти всередину й побачити зображення небес угорі. Деякі механічні годинники містили складні моделі небес, як-от Празький астрономічний годинник (або Празький орлой), який працює й сьогодні (рис 2.1) [13].



## Рисунок 2.1 – Празький астрономічний годинник, або Prauge Orloj

Сьогодні найпоширенішим типом планетарію є великий (або малий) купольний театр із планетарною проєкційною системою всередині.

Після розробки першого планетарного оптико-механічного проєктора компанією Zeiss у 1923 році купольні планетарії почали з'являтися по всьому світу. У 1920-х і 1930-х роках, до початка Другої світової війни, існувало 25 планетаріїв із зоряними оптико-механічними (ОМ) проєкторами. Німеччина мала п'ять, десять інших були розпорочені по решті Європи. У Сполучених Штатах також було п'ять: планетарій Адлера в Чикаго (побудований у 1930 р. — перший планетарій в Америці); Планетарій Фелса в Інституті Франкліна у Філадельфії; планетарій обсерваторії Гріффіта в Лос-Анджелесі (зараз називається планетарієм Самуеля Ошіна); Планетарій Була в Науковому центрі Карнегі в Пітсбурзі; і Планетарій Хайдена Американського музею природної історії в Нью-Йорку.

Планетарії продовжували поширюватися, і в 1960-х роках новий інтерес до небес був викликаний початком «космічної гонки». Це стимулювало розвиток цифрових технологій, у тому числі цифрових спецефектів (SFX) для кіно та телебачення. Виробник оптичних ефектів і цифрових планетаріїв Sky-Skan розпочав розробку SFX-проєкторів у 1967 році, щоб доповнити ОМ-проєктори в планетаріях іншими небесними явищами.

Для перших «гібридних» планетарних програм разом із зірковим проєктором використовували допоміжні діапроєктори. У деяких планетаріях використовується понад 100 допоміжних проєкційних систем. Багато виробників проєкторів для планетаріїв, а також самі співробітники планетаріїв створили спеціалізовані SFX-проєктори для відображення різних візуальних зображень, таких як одна видима галактика — Андромеда — що знімає «зірки», комети та інші небесні явища. Розробка настільної комп'ютерної системи запропонувала прогрес у керуванні проєктором, дозволивши проєкторам зі спецефектами автоматично синхронізуватися з оптичними проєкційними шоу, щоб ще більше полегшити запрограмовані презентації.

У 1983 році Evans & Sutherland, «перша в світі компанія комп'ютерної графіки», створила Digistar — першу систему цифрового планетарію. Перший E&S Digistar використовував векторну графіку, яка відтворювала зірки як розмиті краплі з нечіткими краями, а не чіткі точки світла, які проєктори ОМ вдосконалювали протягом десятиліть. Незважаючи на рудиментарні візуальні ефекти, планетарії перейшли у світ комп'ютерно створених зображень (CGI) з можливістю «літати» крізь зірки в симульованому тривимірному космосі.

Поява широкоформатних кінотеатрів IMAX (як куполоподібних, так і плоских екранів) у 1970-х роках також послужила катализатором змін у світі програм і дизайну планетаріїв. Щоб конкурувати, планетарії почали включати відеопроєкцію на свої куполи. Тепер відвідувачі планетарію могли дивитися відео про виліт наднової зірки, спіраль галактики та інші зіркові події. Спочатку один відеопроєктор може показувати відео в певний момент програми. Невдовзі почали використовувати кілька проєкторів. І, зрештою, комп'ютерна технологія дозволила змішувати кілька проєкторів для створення єдиного великого зображення. У 1997 році цифрове змішування кількох проєкцій було об'єднано з оптичною технологією для створення SkyVision від Sky-Skan, повнокупольної цифрової проєкційної системи, яка була запущена в планетарії Бейкера в Х'юстоні в 1998 році.

До кінця 20-го століття світ планетарної проєкції розділився на три чіткі шляхи: традиційну оптико-механічну, цифрову повнокупольну проєкцію та гібридні комбінації цифрової та оптико-механічні.

Технологія Fulldome, революційний підхід до захоплюючого візуального досвіду, має багату еволюційну історію, яка охоплює від скромних початків планетаріїв до сучасних цифрових середовищ. У цьому есе досліджується еволюція та історичний фон Fulldome Technology, простежується її траєкторія від аналогових проєкцій до складних, створених комп'ютером ефектів занурення, які визначають сучасні програми.

Коріння технології Fulldome можна простежити на початку 20 століття з появою планетаріїв. Спочатку задумані як простори, призначені для проєктування

небесних об'єктів, планетарії використовували оптико-механічні проєктори. Важливою віхою в цю епоху стало впровадження зіркового проєктора компанією Carl Zeiss у 1920-х роках, що заклало основу для ранніх розробок у візуалізації небес.

У середині 20-го століття відбувся перехід від аналогових до цифрових технологій, що стало ключовим моментом у технології Fulldome. З'явилися аналогові повнокупольні системи, які використовують кінопроекцію для створення захоплюючого астрономічного досвіду. Серед цих технологій варто відзначити Spitz Space Transit Projector, який став основою планетаріїв. Однак аналогові системи були обмежені обмеженнями роздільної здатності, а створення контенту передбачало трудомісткі процеси, включаючи ручне створення зіркових полів на плівці.

Кінець 20-го століття відкрив нову еру з широким впровадженням цифрових технологій у планетаріях. Цифрові повнокупольні системи отримали популярність, пропонуючи вищу роздільну здатність і більшу гнучкість у створенні контенту. Цей зсув дозволив реалістичне моделювання астрономічних подій і небесних явищ, заклавши основу для захоплюючих вражень, які визначають сьогодні технологію Fulldome. Інтеграція цифрових проєкторів і прогрес у комп'ютерній графіці відіграли ключову роль у цей трансформаційний період.

21 століття ознаменувало зміну парадигми, оскільки технологія Fulldome охопила комп'ютерний контент. Цифрові проєктори високої роздільної здатності в поєднанні з потужними обчислювальними можливостями дозволили створити реалістичне та інтерактивне середовище. Виробництво повнокупольного вмісту еволюціонувало від статичних представлень до динамічних симуляцій, що дозволило створити більш захоплюючий і захоплюючий візуальний досвід. Двигуни візуалізації в реальному часі та передові графічні технології сприяли подальшому розвитку технології Fulldome.

Визнаючи важливість аудіо для створення дійсно захоплюючого досвіду, технологія Fulldome розвинулася, щоб інтегрувати об'ємний звук і просторове

аудіо. Синергія зображення та аудіо посилила відчуття присутності в повнокупольному середовищі. Просторові аудіотехнології забезпечили тривимірний слуховий досвід, сприяючи цілісному сенсорному зануренню, яке виходить за рамки візуальних стимулів.

У міру розвитку технології Fulldome її застосування вийшло за межі традиційних планетаріїв. Досвід Fulldome знайшов свій шлях до розваг, освіти та симуляції. Повнокупольні фільми, інтерактивний освітній контент і симуляції навчання стали поширеними в різних галузях. Музеї, наукові центри та тематичні розважальні заклади прийняли технологію Fulldome, перетворюючи статичні виставки на динамічні та інтерактивні навчальні середовища.

У наш час технологія Fulldome продовжує розвиватися, вирішуючи такі проблеми, як обмеження роздільної здатності та складності створення вмісту. Поточні дослідження та розробки зосереджені на інноваціях у проєкційних технологіях, зокрема на дослідженні лазерної проєкції. Крім того, інтеграція нових технологій, таких як віртуальна та доповнена реальність, обіцяє майбутнє, вказуючи на траєкторію постійного прогресу.

Джон Стоук, віце-президент із маркетингу та продажів компанії Sky-Skan, описав як «злиття двох ниток технології — астрономічного годинника та порожнистих глобусів», перший планетарний проєктор Zeiss OM, Model I, що був розроблений між 1919 та 1923 роками. Вальтер Бауерсфельд з Zeiss розробив концепцію, але знадобилося чотири роки, щоб переконати Zeiss, що його пристрій має майбутнє, і схвалити конструкцію. За словами Джона Елверта з ASH Enterprises, компанії, яка обслуговує проєктори для планетаріїв у всьому світі з 1971 року, проєктор Zeiss Model 1 (рис. 2.2) мав сферичну конструкцію з 32 зірковими конденсорними лінзами проєктора, «які збирали світло від однієї лампи, розміщеної в центрі проєктора. Ці ранні зіркові пластини були схожі на діапозитиви, репродукції зоряних полів, зроблені з фотографій реального неба!» Проєктор був представлений в Німецькому музеї в Мюнхені 21 жовтня 1923 року [14].



Рисунок 2.2 – Zeiss Model I

Традиційний оптико-механічний проєктор, який отримав прізвисько «Мураха» через зовнішню схожість з комахою, складається з двох великих куль із центральним джерелом світла в кожному куполі. Зовнішні по відношенню до основних сфер розташовані «клітки» сонця, місяця та планет, у яких розміщувалися незалежні проєктори для «мандрівників». Модель Zeiss Model II, представлена в 1926 році, є першим двосферним проєктором у стилі мурахи, який проєктує майже 9000 зірок. Для цієї моделі в сферах були просвердлені крихітні отвори в точному положенні зірок угорі. Більші зірки або групи зірок отримуватимуть проєкційні лінзи для збільшення їхньої яскравості. Односферні проєктори показували або Північну, або Південну півкулю, тоді як двосферні проєктори мурашиного типу могли показувати небо в обох півкулях. Щоб сфери не виступали в очі глядачам, віконниці маскують небо під «горизонтом» купола.

Вартість є важливим фактором у придбанні оптико-механічного проєктора. Модель Zeiss Model II коштувала 75 000 доларів США в 1926 році, тобто більше 1 мільйона доларів США в сьогоденних доларах. Сучасні ОП проєктори можуть коштувати значно більше 2 мільйонів доларів.

Арманд Шпітц, ведучий планетарію Фельса, проявив особливий інтерес до досвіду роботи з проектором ОМ. Він усвідомив, що через винятково високу вартість таких систем багато осіб не матимуть можливості на власному досвіді відчувати красу штучного нічного неба. З метою поширення цього досвіду він заснував компанію Spitz, Inc. та розробив проектор Spitz A-1 – додекаедрову систему з 12 гранями, доступну за лише 500 доларів США. Ця цінова політика дозволила вписатися в бюджет багатьох малих шкіл та навчальних закладів, сприяючи більш широкому поширенню педагогічного потенціалу штучно створеного нічного неба. (рис. 2.3) [15].



Рисунок 2.3 – Оригінальний 12-гранний Spitz A-1

Оптико-механічний проектор завжди був відомий своїм автентичним зображенням зоряного поля нічного неба. Крихітні яскраві точки позначають надточні положення наших зірок. Спроектований на плоску сіру поверхню купола в темній кімнаті, ОМ проектор забезпечує неперевершену симуляцію неба, проєктуючи тисячі, а в деяких випадках і мільйони окремих зірок на купол над головою. Симулюється відносна яскравість і розмір зірок, і, додаючи

реалістичності штучного нічного неба, кольорові фільтри точно відображають відтінки різних зірок, наприклад червоних і синіх гігантів. Для додаткової реалістичності деякі проєктори навіть показують штучне «мерехтіння» зірок.

Класичний проєктор Spitz A3P (рис 2.4) був розроблений для куполів діаметром 24-40 футів, протягом 1960-х і 1970-х років було продано понад 1000 одиниць. А3Р, який все ще широко використовується сьогодні такими установами, як Треворгі-планетарій Музею містичного морського порту в Коннектикуті, має 1354 отвори, просвердлені в його зоряній кулі, що представляє зірки від першої до п'ятої величини. Усі зірки першої та обраної другої та третьої величини проєктуються через лінзи, щоб забезпечити належну яскравість зірки. Чумацький Шлях моделюється за допомогою власної системи лінз. Міський коледж Нью-Йорка використовує трохи складнішу модель Spitz 512, яка схожа на дизайн А3Р.



Рисунок 2.4 – Spitz A3P

Якими б хорошими не були А3Р, новітні ОМ проєктори показують зірки в діапазоні 1-7 зоряної величини. Сучасна Zeiss Model IX проєктує понад 9000 зірок, а Zeiss StarMaster – 9100. Переходячи до сотень тисяч, останній проєктор Konica Minolta показує 16 000-27 000 зірок до 7,5 зоряної величини та 380 000 зірок у Чумацькому Шляху. Хоча людське око не може розрізнити далекі зірки в

ядрі галактики, візуальні моделі, розроблені японцем Такаюкі Охірою для проєкторів, таких як Ohira Tech Megastar-IIA (з використанням об'єктивів Canon EF 40mm f/2.8 STM), демонструють приголомшливе представлення нашої галактики з прогнозованими мільйонами зірок (рис. 2.5).

Марк Тейлор, керівник планетарію та наукових програм Музею річки Гудзон у Нью-Йорку, каже, що традиційні проєктори Zeiss зосереджуються на зорях, які земляни можуть бачити візуально, тоді як Megastar-IIA краще показує «найреалістичніші зірки» світу. Чумацький Шлях, замість «розмитих смуг» зірок, які відображалися проєкторами в минулому [16]. Новітні проєктори Megastar проєктують понад 22 мільйони зірок — рекорд Гіннеса. Цей візуал створений для того, щоб відвідувачі планетарію використовували біноклі для визначення деталей.



Рисунок 2.5 – Ohira Tech Megastar II-A

Сьогодні «Мураха» в основному замінив планетарний ОМ проєктор у формі зіркової кулі. Замість двох напівсферичних сфер на протилежних кінцях довгого, заповненого механізмом деревка, одна зоряна куля містить обидві півкулі зірок у формі кулі або яйця. Повертаючись до часів проєкторів геометричної форми, сьогоднішній зірковий м'яч Konica Minolta Infinium-L має 20

шестикутників і 12 п'ятикутників як частину відзначеного нагородами дизайну корпусу. Технологія проєкції еволюціонувала від просвічування світла через отвори та лінзи до використання волоконно-оптичних ліній для передачі імітованого світла зірок від лампи до поверхні зіркової кулі. Джерела світла також еволюціонували від дорогих дугових ламп Zenon з обмеженим терміном служби до сучасних світлодіодних ламп.

Проєктування планет, Сонця та Місяця зазвичай віднесено до окремих проєкційних систем, оскільки положення цих об'єктів змінюється на тлі зірок. Ці клітки містять допоміжні проєктори та складають основне тіло «Мурахи», або вони живуть під односферними проєкторами (рис. 2.6). На сучасних зоряних кулях клітки часто знаходяться за межами зіркової кулі в інноваційно розроблених установках. Виробники планетаріїв іноді мають можливість відмовитися від додаткових планетних проєкторів, щоб зменшити витрати на встановлення та обслуговування [17].



Рисунок 2.6 – Сучасна еволюція «Мурахи» Zeiss Starmaster ZKP

Іншим фактором у використанні ОМ і цифрових проєкторів є розмір купола. Більшість планетаріїв у США складаються з куполів малого та середнього

розміру, діаметр яких коливається від 18 футів до 50 футів. Більші куполи вимагають більших і яскравіших оптичних і цифрових проєкційних систем.

Як згадувалося вище, коли з'явилася технологія поєднання створеної комп'ютером відеопроєкції, повнокупольний цифровий планетарій став реальністю. Evans & Sutherland продемонстрували StarRider у 1996 році на конференції Асоціації науково-технологічних центрів, а в 1998 році Sky-Skan запустила систему SkyVision. Він складався з шести окремих проєкторів — п'яти горизонтальних, що оточували театр, і одного вертикального проєктора, спрямованого в zenit купола, кожен з яких був оснащений 35-мм об'єктивами.

Також зазначалося вище, що більший купол, то потужнішими мають бути проєктори. Наприклад, у планетарії Чалсті в Нью-Джерсі встановлено 10 проєкторів Christie Boxer і купольну систему освітлення, яка видає 281 трильйон кольорів. Кожен із цих проєкторів 4К після змішування проєкує 50 мільйонів пікселів для сумарних 88 мільйонів пікселів — справжньої роздільної здатності 8К (рис. 2.7). За словами Майка Шанахана, директора планетарію Дженніфер Чалсті Наукового центру Liberty, проєктори «об'єднано» через великий комп'ютерний банк, щоб забезпечити роздільну здатність, подібну до IMAX. Візуальний ефект доповнює звукова система потужністю 30 000 Вт із п'ятьма масивами динаміків і 16 сабвуферами.

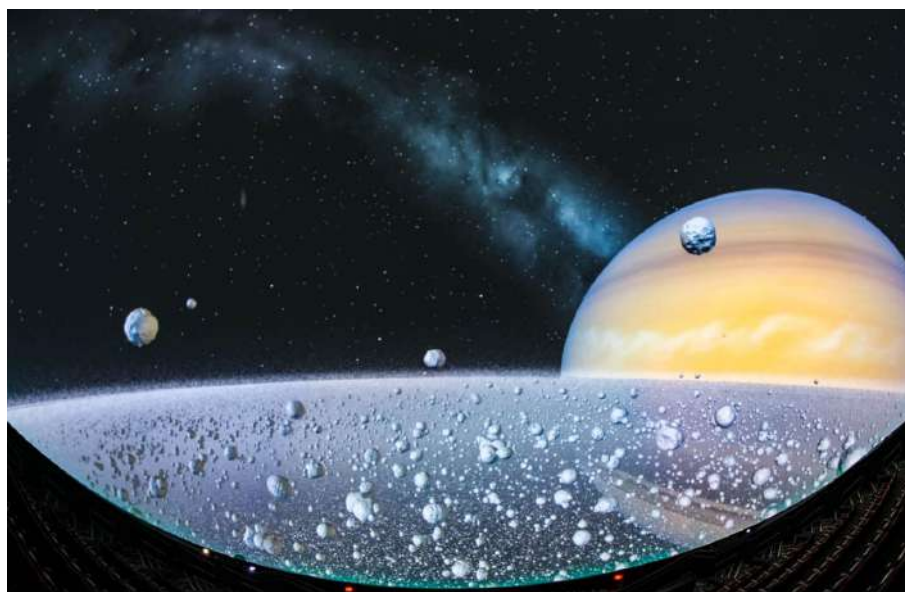


Рисунок 2.7 – Цифровий дисплей 8К планетарію Дженніфер Челсті  
Наукового центру Liberty

Музей річки Гудзон має гібридну систему, яка використовує цифрову систему Sky-Skan у поєднанні з Megastar. Пара проєкторів JVC D-ILA з галогенною лампою об'єднані чотирма чотирьохядерними комп'ютерами. Планетарій Кормака в Музеї природної історії в Провіденсі демонструє цифрові шоу Ash Warped Media у поєднанні з проєктором Zeiss ZKP 3 типу мурахи, який використовується для кожної програми (рис. 2.8). Багато гібридних планетаріїв відмовляються від ОМ проєктора або просто використовують його для певних програм. Проєктор Cormack OM має один із найстаріших проєкторів Zeiss, що працює в США.



Рисунок 2.8 – Гібридна система – проєктор Zeiss ZKP 3

У поєднанні з проєктором із зоряною кулькою Zeiss Starmaster Бостонський музей науки проєктує візуальні зображення Sky-Skan через два лазерні проєктори Sony VPL-GTZ280 4K.

У планетарії Чарльза й Хелен Райхерт Музею Вандербільта також працює гібридна система (рис. 2.9). У центрі кінотеатру розташована система Konica

Minolta Geministar III із проєктором Infinium-L із волоконною оптикою. 23 найяскравіші зірки неба проєктуються за допомогою 23 об'єтивів Konica Minolta. Що стосується цифрової сторони системи Geministar III, директор планетарію Reichert Дейв Буш використовує пару проєкторів JVC DLASH7NLG, кожен з яких керується чотирма окремими комп'ютерами, які потім під'єднуються для поєднання візуальних зображень Sky-Skan Digital Sky II, створених, частково, Європейська південна обсерваторія.

Компанія Evans & Sutherland встановила понад 35 гібридних систем по всьому світу [18].



Рисунок 2.9 – Блок управління в планетарії Райхерта музею Вандербільта.

## 2.2 Визначення Fulldome технології

Загальним елементом майже всіх планетаріїв світу є напівсферичний екран, що оточує глядачів. З часів появи перших планетаріїв такі екрани використовувалися для проєктування зображення нічного неба за допомогою спеціально створених для цього зіркових проєкторів. Хоча сьогодні вони набагато досконаліші, ніж ті, що були майже століття тому, зіркові проєктори все ще

використовуються в планетаріях. Вважається, що вони дозволяють найбільш точно відобразити зображення та відчуття нічного неба. Крім того, за останні кілька десятиліть були розроблені інші технології, які розширили можливості планетаріїв. Одним із напрямків цього вищезгаданого розвитку є технологія, яка дозволяє охоплювати цифровим зображенням весь напівсферичний екран. Це те, що відомо як технологія Fulldome.

Технічно кажучи, термін *fulldome* описує особливий спосіб передачі різноманітного оточення (наприклад, лісу чи космосу) на напівсферичні екрани, які використовуються в планетаріях. Репрезентація цього оточення має бути представлена таким чином, щоб глядач відчував себе зануреним у нього та мав враження перенесення в інше місце. Існує кілька термінів, пов'язаних із повнокупольною технологією, і кожен із них означає щось дещо інше. Якщо використовуються проєктори для відображення зображень, що покривають увесь купол, це називається повнокупольною проєкцією. Стандартний формат графічних файлів, який використовується для створення та зберігання зображень для таких проєкційних систем, називається повнокупольним форматом. Графічні матеріали, що використовують цей формат, є повнокупольними матеріалами.

Формат *Fulldome* — це квадратна рамка з вписаним у неї колом (рис. 2.10). Усе, що знаходиться за межами цього кола, не відображається, тоді як вміст усередині нього, у свою чергу, з'явиться на екрані (рис. 2.11).



Рисунок 2.10 – Приклад зображення формату Fulldome

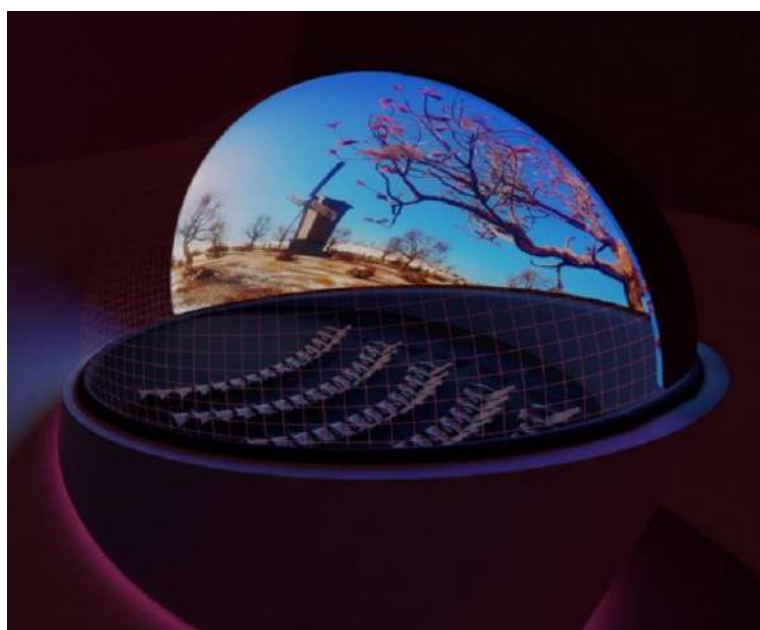


Рисунок 2.11 – Купольний екран на якому проєктується зображення формату Fulldome

Різниця між повнокупольним форматом планетарію та стандартним форматом фільму полягає у формі. Формат Full HD — це горизонтальний прямокутник, на відміну від формату fulldome, який має форму кола. Якщо бути

точним, це має бути коло, але це не зовсім можливо, тому що популярні графічні формати не підтримують такі круглі файли. Периметр кола окреслює край екрана – нижня частина кола є передньою частиною екрана, а верхня частина – ззаду. Внутрішня частина цього уявного капелюха відображає спосіб, у який повнокупольне зображення передається на екран планетарію. Це підводить до більш істотної різниці, якою є різниця у змісті цих двох форматів. І ця різниця величезна.

Якщо ми показуємо звичайний фільм у планетарії, звичайно, значна частина екрану планетарію залишиться неосвітленою. Плівку буде видно лише спереду. Частина екрана, яка залишається темною, позначає різницю між вмістом повнокупольного матеріалу та звичайним кінематографічним матеріалом. Кінорежисер, створюючи окремі прямокутні кадри, свідомо коригує кадр – межу між тим, що хоче бачити глядач, і тим, що не видно на кадрі. У випадку, якщо той самий фільм демонструватиметься на куполі планетарію як повнокупольний, необхідно буде відмовитися від концепції кадру та розширити огляд камери, щоб показати все, що в класичному фільмі залишається за межами кадру, а таким розтягнутим, але не розтягнутим зображенням покривати весь купол. Тому неможливо перетворити звичайну плівку на повнокупольну. Під час кожного виробництва для планетарію кожне зображення, анімація чи фільм має бути розроблено як повнокупольний фільм із самого початку [19].

### **2.3 Технічні основи технології Fulldome**

Є кілька способів, як можна досягти цифрової повнокупольної проєкції: одинарні проєктори з лінзами типу «риб'яче око» або сферичним дзеркалом, проєктори з двома лінзами «риб'яче око» та проєктори з кількома короткофокусними об'єктивами. У цьому контексті «Fulldome» стосується внутрішньої частини півсфери (напівсфери), всередині якої також знаходиться глядач. Ці методи зазвичай стосуються куполів діаметром від кількох метрів до великих планетаріїв діаметром 30 м, хоча в деяких випадках фізичні розміри проєкторів можуть перешкоджати їх використанню в малих куполах.

Незважаючи на те, що з проєкцією відео в напівсферичних середовищах експериментували протягом деякого часу, ключовим фактором комерційного поширення став асортимент продуктів Visionstation, випущених компанією Elumens приблизно в 2000 році. Проєкцією відео керував єдиний цифровий проєктор із новим «tru-theta» об'єктивом «риб'яче око», встановленим під консольним столиком, саме цей об'єктив був ключовим ІР продукту.

### 2.3.1 Об'єктив "Fisheye", один проєктор

Найбільш природним (і найпростішим) форматом зображення для представлення зображень, призначених для напівсферичної поверхні, є «риб'яче око». Таким чином, очевидним засобом цифрової проєкції є проєктор даних з об'єктивом «риб'яче око» (рис. 2.12). Першим постачальником і нинішнім лідером у цій галузі є The Elumenati у них є цілий ряд рішень для об'єктивів «риб'яче око», які зазвичай інтегровані в проєктор (уся оптика проєктора замінена), але іноді це зовнішні пристрої.



Рисунок 2.12 – Проєктор з об'єктивом «риб'яче око»

Головним стримуючим фактором комерційних пропозицій типу «риб'яче око» є ціна, хороші оптичні рішення починаються від 20 тисяч доларів США. Існують недорогі рішення типу «риб'яче око», засновані на лінзах типу «риб'яче

око» від камерної промисловості та проміжних лінзах. Це описано як небесна система Лумо.

Термін «tru-theta» стосується радіуса на площині зображення «риб'яче око», прямо пропорційного куту широти на спроектованому куполі. Можливі й інші зв'язки, і вони справді використовувалися для обходу патенту на tru-theta лінзи, при цьому нелінійні варіації ігнорувалися або компенсувалися програмним забезпеченням.

Важливо пам'ятати, що для систем «риб'яче око» для справжнього напівсферичного покриття ефективність пікселів дуже низька, тобто кругле зображення «риб'яче око» вписано в прямокутну рамку проєктора, і тому є багато невикористаних пікселів. Це проблема з проєкторами з форматом 4/3 (найбільш близьке до квадрату співвідношення) і гірша з поточними проєкторами 16/9 або 16/10. Звичайним рішенням цього є обмеження поверхні купола, що використовується, скорочення «риб'ячого ока». Більшість скорочених продуктів базуються на проєкторах даних із вертикальним зсувом об'єктива (рис. 2.13). Це означає, що якщо усічене «риб'яче око» має розмір  $180 \times 155^\circ$ , тоді його можна використовувати в усіченому куполі, який може бути фізично усіченим зверху чи знизу, або обома, якщо загальне вертикальне поле зору становить щонайбільше  $155^\circ$ .

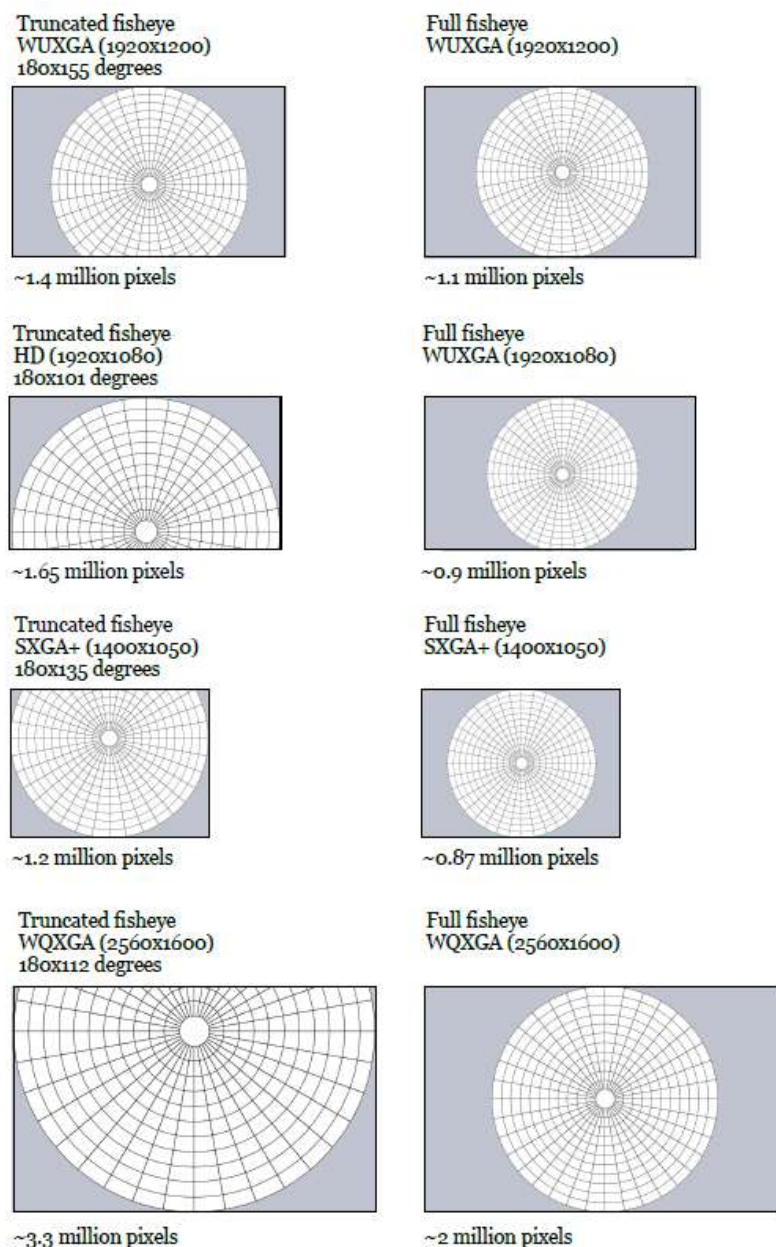


Рисунок 2.13 – Основні варіанти об'єктивів «риб'яче око» від комерційних постачальників

### 2.3.2 Сферичне дзеркало, один проєктор

Підхід сферичного дзеркала був розроблений автором у спробі створити менш вартісну альтернативу лінзам «риб'яче око». Це сталося через усвідомлення того, що існують інші способи поширення світла від проєктора даних під великим кутом. Додаткова робота, яка виконується в програмному забезпеченні, полягає в попередньому спотворенні зображення типу «риб'яче око» таким чином, що коли

зображення відбивається від дзеркала й потрапляє на купол, воно виглядає правильним і неспотвореним, як якщо б із тим самим зображенням типу «риб'яче око» використовувався об'єктив типу «риб'яче око» (рис. 2.14). Завдяки поточним графічним картам і методу викривлення зображень це майже нульовий удар продуктивності на сучасних машинах.

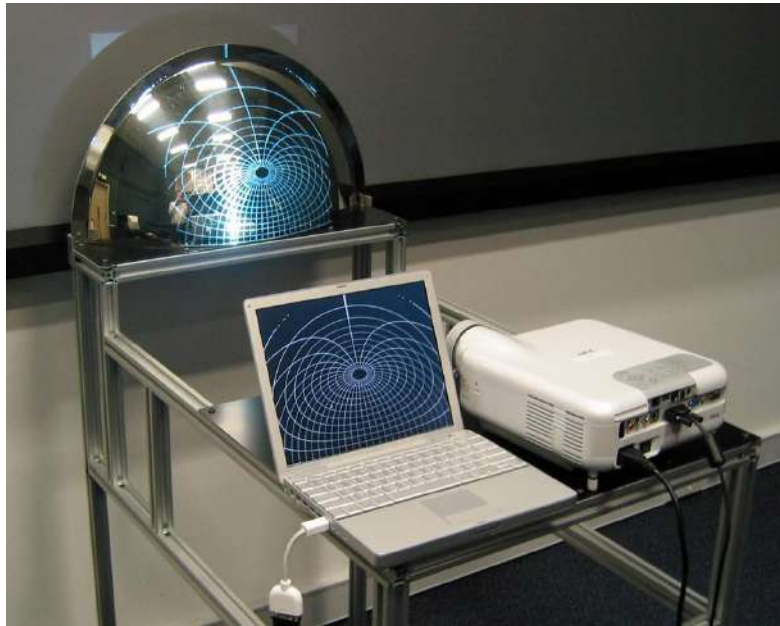


Рисунок 2.14 – Сферичне дзеркало, один проєктор

На відміну від систем «риб'яче око», широкий аспект 16/9 поточних проєкторів покращує піксельну ефективність сферичного дзеркала. Однак пікселі вже не мають однакового розміру, тому пряме порівняння є складним. На практиці та за умови ретельного проєктування система сферичної дзеркальної проєкції може гідно конкурувати з усіма рішеннями типу «риб'яче око» для одного проєктора, крім останнього WQXGA базується на системі, в основному з використанням відносно нового Projection Design F35. Сферичне дзеркало на відміну від об'єктива «риб'яче око» коштує близько 1000 доларів США.

Неоднаковий розмір пікселів на куполі важливий при проєктуванні місця розміщення проєктора та дзеркала для будь-якого конкретного застосування та орієнтації купола. Для традиційного iDome пікселі з найвищою роздільною здатністю розташовані в нижній і центральній частині iDome, а найбільші пікселі

у верхній частині iDome. Це підходить для більшості вмісту, тобто потрібна висока роздільна здатність, щоб представити небо (рис. 2.15).



Рисунок 2.15 – iDome напівсферичним купол

Для невеликих куполів основною перевагою сферичного дзеркала є те, що проєкційне обладнання розташоване далеко від центру купола.

Перевага сферичного дзеркала полягає в тому, що оптика відокремлена від проєктора, загалом система лінз «риб'яче око» розроблена для конкретного виробника проєктора та, можливо, навіть моделі. Однак підхід до сферичного дзеркала має обмеження, тому не всі проєктори підходять. Проєктор, який використовується, повинен мати можливість фокусуватися на відносно невеликому зображенні, як правило, для сферичного дзеркала діаметром 60 см проєктор повинен мати можливість фокусуватися на зображенні шириною близько 50 см на плоскій стіні. Для кожної конкретної задачі потрібно перевірити відповідність проєктора необхідним характеристикам. Окрім можливості фокусування, проєктори з більшою глибиною фокусування дають більш чіткі результати з покращеним фокусуванням на периферії купола.

Саме це обмеження того, наскільки мале зображення можуть створити проєктори, визначило розмір сферичного дзеркала. Оскільки намагаються використовувати все менші дзеркала (для компактності), тим важче буде знайти

відповідні проєктори. Зауважте також, що розмір дзеркала не пов'язаний з розміром купола, автор використовував стандартне сферичне дзеркало 60 см у куполах діаметром від 1,5 до 30 м.

Для отримання найкращих результатів важливо використовувати дзеркала з першою поверхнею, дзеркала з не першою поверхнею дають менший результат через заломлення в передніх шарах перед дзеркальною поверхнею. Дзеркала першої поверхні дуже делікатні.

Деякі інсталюатори використовують вторинне планарне дзеркало, щоб створити більш компактну комбінацію проєктора/дзеркала. Зазвичай відстань між проєктором і дзеркалом становить приблизно 1 м, додаткове дзеркало принаймні вдвічі менше.

### **2.3.3 Мультипроєктори**

Основним обмеженням рішень з одним проєктором є роздільна здатність зображення, доступні пікселі з одного проєктора розподіляються по широкій площі поверхні. Є лише два рішення: вибрати проєктори з вищою роздільною здатністю або використовувати більше одного проєктора. Вибір проєктора з вищою роздільною здатністю неможливий (є лише обмежена кількість варіантів), і ціна на проєктори вище HD швидко зростає.

Для планетаріїв одним із підходів є використання двох проєкторів 16/9 із усіченим розташуванням лінз типу «риб'яче око». Це забезпечує повне напівсферичне покриття та щедre перекриття для змішування країв.

Наступним варіантом є використання проєкторів із досить стандартними короткофокусними лінзами (наприклад, 1:1). Це означає від 5 до 7 проєкторів. Для симуляторів та ігор у невеликих куполах це відносно рідко і, як правило, лише для областей застосування, які можуть дозволити собі витрати та складність системи (рис. 2.16). Такі системи значно ускладнюють модель програмного забезпечення (корекція геометрії та змішування країв) і, крім того, часто потребують кластеру комп'ютерів з міркувань продуктивності [20].



Рисунок 2.16 – Зображення з мультипроектора

## 2.4 Особливості лінзи Fisheye

Сучасні планетарії використовують об'єктиви «Риб'яче око» для проєкції зображення небесної сфери на купол.

Риб'яче око (від англ. fish-eye) – різновид надширококутних об'єктивів з навмисно збільшеною дисторсією, інша назва дисторсуючий об'єктив [21]. Від звичайних (ортоскопічних) короткофокусних об'єктивів відрізняється яскраво вираженою діжкоподібною дисторсією [22], що дозволяє відобразити простір і предмети за допомогою азимутальної, ортографічної або стереографічної проєкцій, залежно від конкретної оптичної конструкції. За рахунок сильних спотворень кутове поле «риб'ячого ока» може досягати  $180^\circ$  або навіть перевищувати цю величину, що недоступно для ортоскопічної оптики, що реалізує гномонічну проєкцію навколишнього простору [23].

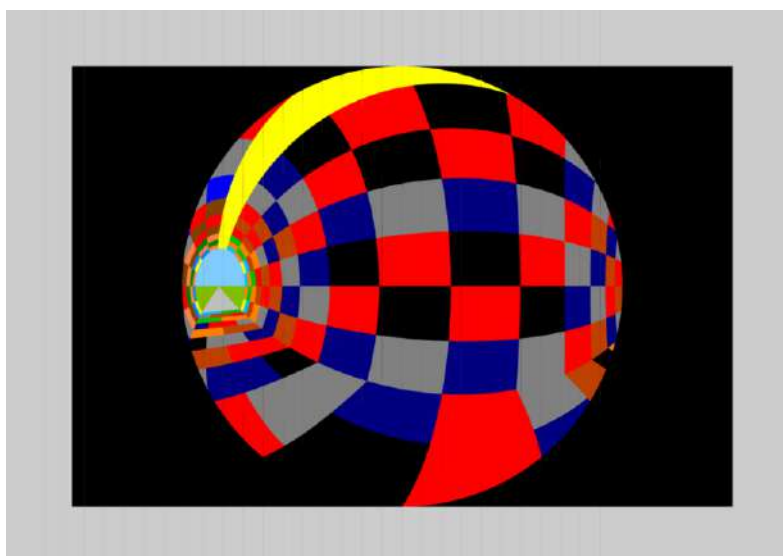
Головною особливістю об'єктивів типу «риб'яче око» є характерні спотворення, подібні до виду відображення в дзеркальній сфері. Прямі лінії, що не перетинають оптичну вісь, відображаються у вигляді дугоподібних кривих, а предмети в міру віддалення від центру до країв кадру сильно стискаються в

радіальному напрямку [24]. При цьому рекордний напівсферичний огляд не є обов'язковою властивістю «риб'ячого ока», і в деяких об'єктивів цього типу поле зору не перевищує  $120\text{-}160^\circ$  при таких же спотвореннях. У дисторсуючих зум-об'єктивів огляд може звужуватися ще більше [25].

Основні різновиди наступні.

Усі об'єктиви типу «риб'яче око» прийнято розділяти на два основні різновиди за ступенем заповнення кадрового вікна камери: «циркулярні» і «діагональні». Обидва типи зображення можуть бути одночасно реалізовані в одному зум-об'єктиві, який при мінімальній фокусній відстані працює як циркулярне «риб'яче око», а при максимальній - як діагональне.

Циркулярне (або «кругове») «риб'яче око» — у даному випадку коло поля зображення, що дається об'єктивом, не заповнює кадрове вікно повністю, а його діаметр близький до розміру короткої сторони кадру. Такий об'єктив має кут поля зору  $180^\circ$  і більше у всіх напрямках. Найчастіше габарити циркулярних об'єктивів через великий діаметр передніх лінз перевищують розміри камери в кілька разів (рис. 2.17). Найбільш широке застосування вони знайшли у спеціальних областях прикладної фотографії, наприклад, у метеорології та астрономії для зйомки небосхилу.



а



б

Рисунок 2.17 – Приклад зображення циркулярного об'єктиву:

а – графічне, б – реальне

Діагональне (або «повнокадрове») «риб'яче око» - отриманий кадр цілком зайнятий зображенням, що вирізується з круглої плями, що дається об'єктивом (рис. 2.18). У цьому кут поля зору  $180^\circ$  відповідає діагоналі кадру. Не завжди поле зору «риб'ячого ока» досягає  $180^\circ$ : у деяких об'єктивів воно менше, і часто відповідає ортоскопічним надширококутникам, зберігаючи при цьому дисторсію.

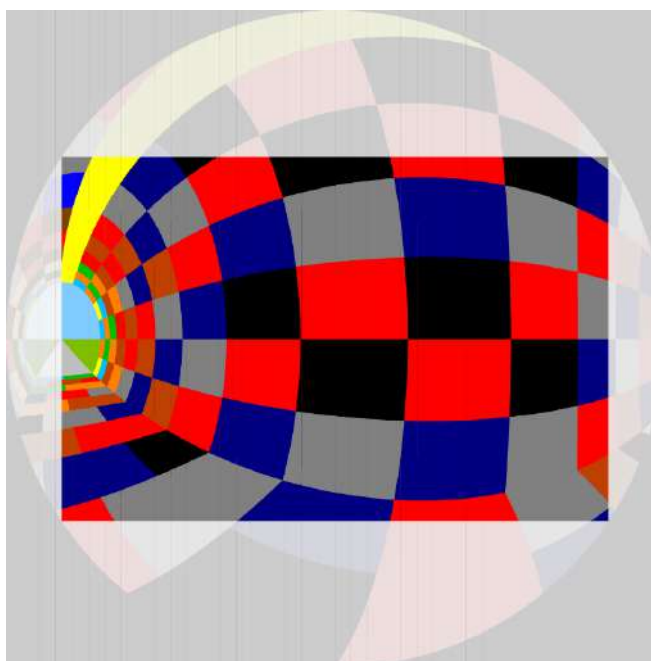


Рисунок 2.18 – Приклад зображення діагонального об'єктиву

Ще один різновид є проміжним, і коло зображення об'єктива не заповнює прямокутний кадр повністю, але й не реєструється на ньому повністю, залишаючись обрізаним з двох сторін. При цьому діаметр кола вписаний по довжині, а не по висоті, як у циркулярних об'єктивів (рис. 2.19).



а

б

Рисунок 2.19 – Приклад зображення обрізаного кола об'єктиву:

а – графічне, б – реальне

Аналогічно виглядає зображення повнокадрових циркулярних об'єктивів, встановлених на «обрізаний» камері, а також деяких зум-об'єктивів у проміжному положенні кільця масштабування.

Під час створення звичайних ширококутних об'єктивів прагнуть звести до нуля дисторсію — викривлення прямих ліній, які проходять центр кадру. Тому зображення, що дається ортоскопічним об'єктивом, еквівалентно гномонічної проєкції сфери на площину. У такому разі неможливо отримати кутове поле  $180^\circ$ , так як край поля зору виявиться нескінченно віддаленим. Для досягнення напівсферичного огляду в об'єктив при його розробці навмисно вносять негативну дисторсію, яка забезпечує специфічне відображення простору, залежно від інтенсивності спотворення, що відповідає тій чи іншій геометричній проєкції [26]

[27]. У більшості об'єтивів, доступних фотографам, реалізована рівновелика азимутальна проєкція Ламберта, яка досягається мінімальною оптичною складністю. При цьому залежність між фокусною відстанню  $f'$  об'єктива та його полем зору  $2 \cdot \omega$  складніше, ніж у ортоскопічних об'єктивах, і від величини дисторсії, визначальною тип проєкції сфери на площину.

Враховуючи все вищесказане, було вирішено створювати методику обробки відео для одного проєктору з лінзою Fisheye.

## 3 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ 3D ПАКЕТІВ

### 3.1 Autodesk Maya

Autodesk Maya (зазвичай скорочено просто Maya) – це програмне забезпечення для тривимірної комп'ютерної графіки, яке працює в Windows, macOS і Linux, спочатку розроблена Alias, а зараз належить і розробляється Autodesk (рис. 3.1).

Широко використовується в індустрії кіно, телебачення, анімації та відеоігор. Воно надає комплексний набір інструментів для 3D-моделювання, анімації, симуляції, візуалізації та композиції [28].



Рисунок 3.1 – Логотип Autodesk Maya

#### 3.1.1 Переваги і недоліки Autodesk Maya

Переваги:

- універсальність: Maya відома своєю універсальністю, пропонуючи широкий спектр інструментів для різних аспектів створення 3D-контенту, включаючи моделювання, оснастку, анімацію, динаміку та рендеринг;
- можливості анімації: Maya чудово справляється з анімацією, надаючи надійні інструменти для монтажу персонажів, анімації ключових кадрів і динаміки персонажів. Він підтримує як традиційні, так і процедурні методи анімації;

- розширена динаміка та моделювання: програмне забезпечення містить потужні інструменти динаміки та моделювання для створення реалістичних ефектів, таких як моделювання рідин, диму, вогню та тканини, це робить його кращим вибором для складних візуальних ефектів у кіно та анімації;
- галузеві стандарти кіно та телебачення: Maya стала галузевим стандартом програмного забезпечення для виробництва кіно та телебачення, багато студій і професіоналів покладаються на можливості Maya у створенні високоякісних візуальних ефектів і анімації;
- розширена підтримка плагінів: Maya підтримує величезну екосистему плагінів сторонніх розробників, що дозволяє користувачам розширювати функціональність програмного забезпечення та налаштовувати свій робочий процес відповідно до конкретних потреб.
- сценарії та доступ до API: Maya надає потужне середовище сценаріїв з MEL (вбудована мова Maya) і Python. Це дозволяє користувачам автоматизувати повторювані завдання, налаштовувати інструменти та створювати розширені робочі процеси;
- можливості візуалізації: Maya пропонує розширені можливості візуалізації, зокрема рендер Arnold, який забезпечує реалістичні ефекти освітлення та затінення, який також підтримує інші механізми візуалізації для користувачів на вибір;
- спільнота та навчальні ресурси Maya має велике та активне співтовариство користувачів, що означає великі онлайн-ресурси, навчальні посібники та форуми. Це полегшує користувачам пошук рішень проблем і розширення своїх знань.

#### Недоліки:

- крута крива навчання: Maya має складний інтерфейс і круту криву навчання, особливо для новачків, величезний набір функцій та інструментів може бути величезним, вимагаючи значних витрат часу, щоб стати фахівцем;

- ресурсомісткість: Maya може потребувати ресурсів, особливо під час роботи над складними сценами чи анімацією, користувачам може знадобитися потужне апаратне забезпечення, а час візуалізації може бути тривалим для отримання високоякісного результату;
- вартість: Autodesk Maya – це програмне забезпечення преміум-класу, яке має значну вартість, це може бути перешкодою для окремих художників або невеликих студій з обмеженим бюджетом;
- випадкові проблеми зі стабільністю: користувачі повідомляли про випадкові проблеми зі стабільністю, включаючи збої, особливо під час роботи над великими сценами або використання певних функцій.

Підсумовуючи, Autodesk Maya – це потужний і універсальний інструмент, який широко використовується для професійного створення 3D-контенту. Його сильні сторони полягають у анімації, динаміці та відтворенні, що робить його вибором для багатьох у індустрії розваг. Однак його складність і вартість можуть бути недоліком для початківців або тих, хто має обмежений бюджет. Користувачі часто обирають Maya на основі її можливостей і статусу галузевого стандарту, зважаючи переваги з кривою навчання та вимогами до ресурсів.

### **3.2 Cinema 4D**

Cinema 4D — це професійне програмне забезпечення для 3D-моделювання, анімації та візуалізації, розроблене компанією MAXON Computer GmbH. Він широко використовується в різних галузях, включаючи кіно, телебачення, рекламу, дизайн продуктів і архітектурну візуалізацію (рис. 3.2).

Його швидкий, потужний, гнучкий і стабільний набір інструментів робить тривимірні робочі процеси доступнішими та ефективнішими для професіоналів із дизайну, анімованої графіки, VFX, AR/MR/VR, розробки ігор і всіх видів візуалізації. Cinema 4D дає приголомшливі результати незалежно від того, працюєте ви самотійно чи в команді. Cinema 4D дозволяє експортувати

тривимірні моделі в такі програми, як Adobe Photoshop, Adobe After Effects та Final Cut Pro.

Крім основного рендера, Cinema 4D може працювати зі сторонніми рендерами, що вбудовуються до програми, або із зовнішніми [29].



Риснок 3.2 – Логотип Cinema 4D

### 3.2.1 Переваги і недоліки Cinema 4D

Переваги:

- зручний інтерфейс: однією з видатних особливостей Cinema 4D є його інтерфейс, інтуїтивно зрозумілий, що робить його доступним як для початківців, так і для досвідчених 3D-митців;
- універсальні інструменти моделювання: Cinema 4D пропонує ряд потужних інструментів моделювання, включаючи полігональне моделювання, моделювання на основі сплайнів і параметричне моделювання, ця універсальність дозволяє користувачам створювати широкий спектр 3D-моделей;
- MoGraph для рухомої графіки: Модуль MoGraph у Cinema 4D високо цінується для анімаційної графіки та процедурної анімації, це спрощує створення складної анімованої графіки, що робить його кращим вибором у галузі дизайну та телемовлення;
- можливості анімації: Cinema 4D виділяється завдяки надійним інструментам для анімації ключових кадрів, скелетна оснастка для персонажів і динамічні симуляції. Це дозволяє створювати реалістичні анімації та моделювати фізичні явища;

– розширений механізм візуалізації: Cinema 4D містить потужний механізм візуалізації, який підтримує такі функції, як глобальне освітлення, оклюзія навколишнього середовища та фізичне рендеринг, це призводить до високоякісних і реалістичних зображень;

– динамічні симуляції: програмне забезпечення надає інструменти динамічного моделювання для створення реалістичного моделювання тканини, частинок, волосся та рідин. Це важливо для досягнення реалістичної анімації та візуальних ефектів;

– інтеграція з іншим програмним забезпеченням: Cinema 4D бездоганно інтегрується з іншим програмним забезпеченням для дизайну та анімації. Він підтримує різні формати файлів, які зазвичай використовуються в галузі, забезпечуючи плавну співпрацю з програмами, такими як Adobe After Effects і Photoshop;

– система матеріалів на основі вузлів: Cinema 4D має систему матеріалів на основі вузлів, що дозволяє художникам створювати та налаштовувати матеріали за допомогою візуального редактора вузлів, це забезпечує гнучкість і контроль над зовнішнім виглядом поверхонь;

– активна спільнота та ресурси: Cinema 4D має динамічну та активну спільноту, користувачі можуть знайти в Інтернеті безліч навчальних посібників, плагінів і ресурсів, що полегшує навчання та вдосконалює свої навички.

#### Недоліки:

– вартість: Cinema 4D є комерційним програмним забезпеченням, і його повна версія може бути відносно дорогою. Ця вартість може бути розглянутою для окремих художників або невеликих студій з обмеженим бюджетом;

– спеціалізовані модулі: для деяких розширених функцій, як-от певне моделювання динаміки та модуль MoGraph, можуть знадобитися додаткові модулі або версії Cinema 4D Studio, що може збільшити загальну вартість;

- крута крива навчання для розширених функцій: незважаючи на те, що інтерфейс є дружнім до користувача, освоєння розширених функцій, особливо в динаміці та сценаріях, може вимагати навчання, користувачам може знадобитися час і практика, щоб набути досвіду в цих областях;
- ресурсомісткі: робота над складними сценами чи анімаціями з великою кількістю багатокутників може потребувати значних системних ресурсів, це може вплинути на продуктивність і час візуалізації, особливо на менш потужному обладнанні;
- конкурс: Cinema 4D конкурує з іншими 3D-програмами, кожне з яких має свої сильні сторони та унікальні функції, деякі користувачі можуть віддати перевагу іншим інструментам на основі їхніх конкретних потреб або наявних робочих процесів.

Підсумовуючи, Cinema 4D — це потужний і універсальний інструмент із рядом функцій, придатних для різноманітних застосувань у 3D-моделюванні та анімації. Його зручний інтерфейс, потужні можливості анімації та активна спільнота роблять його популярним вибором у творчій індустрії. Однак слід враховувати вартість і потенційні вимоги до ресурсів, і користувачі можуть вибрати Cinema 4D на основі своїх конкретних проектних вимог і переваг.

### **3.3 Autodesk 3ds Max**

Autodesk 3ds Max – популярне програмне забезпечення для 3D-моделювання, анімації, візуалізації та візуалізації, розроблене Autodesk. Він широко використовується в таких галузях, як архітектура, кіно, телебачення та розробка ігор [30].



Рисунок 3.2 – Логотип Autodesk 3ds Max

### 3.3.1 Переваги і недоліки Autodesk Maya

Переваги:

- комплексні інструменти 3D моделювання: 3ds Max надає повний набір інструментів 3D-моделювання, що дозволяє користувачам створювати широкий спектр моделей, від архітектурних елементів до складних персонажів і середовищ;
- можливості анімації: програмне забезпечення чудово підходить для анімації завдяки таким функціям, як анімація ключових кадрів, фальсифікація персонажів і вдосконалені контролери анімації; він підтримує як традиційну анімацію ключових кадрів, так і методи процедурної анімації;
- системи частинок і динаміка: 3ds Max містить надійні системи частинок і інструменти динаміки, що дає змогу створювати реалістичні ефекти, такі як симуляція диму, вогню та рідини, що особливо корисно для створення візуальних ефектів у фільмах та іграх;
- редактор матеріалів і затінення: редактор матеріалів у 3ds Max є потужним, дозволяючи користувачам створювати та редагувати матеріали за допомогою системи на основі вузлів, що полегшує реалістичне затінення та відтворення поверхонь, покращуючи загальну візуальну якість сцен;
- інтеграція з іншим програмним забезпеченням Autodesk: 3ds Max легко інтегрується з іншим програмним забезпеченням Autodesk, таким як

AutoCAD і Revit, полегшуючи робочий процес для професіоналів у сфері архітектури та дизайну;

- підтримка плагінів: 3ds Max підтримує широкий спектр плагінів сторонніх розробників, що розширює його функціональність, користувачі можуть покращити свій робочий процес і отримати доступ до додаткових інструментів і функцій за допомогою цих плагінів;

- сценарії та налаштування: програмне забезпечення забезпечує підтримку сценаріїв за допомогою MAXScript, що дозволяє користувачам автоматизувати завдання, створювати власні інструменти та розширювати функціональність; ця мова сценаріїв забезпечує високий ступінь налаштування;

- галузеві стандарти візуалізації: 3ds Max широко визнаний як галузевий стандартний інструмент для візуалізації архітектури, його можливості візуалізації та простота використання роблять його кращим вибором для професіоналів у галузі візуалізації.

Недоліки:

- крута крива навчання: у 3ds Max має складний інтерфейс, великі функції та можливості програмного забезпечення можуть бути приголомшливими для тих, хто новачок у 3D-моделюванні та анімації;

- ресурсомісткість: робота над складними сценами з великою кількістю багатокутників або детальними текстурами може потребувати ресурсів, користувачам може знадобитися потужне апаратне забезпечення для безперебійної роботи, а час візуалізації може бути тривалим для отримання високоякісного результату;

- вартість: 3ds Max — це комерційне програмне забезпечення, ліцензування якого пов'язане зі значною вартістю. Це може стати перешкодою для окремих художників або невеликих студій з обмеженим бюджетом;

- випадкові проблеми зі стабільністю: як і будь-яке складне програмне забезпечення, 3ds Max може час від часу мати проблеми зі

стабільністю або збої, особливо під час роботи над великими сценами або використання певних функцій.

Підсумовуючи, Autodesk 3ds Max – це потужний і універсальний інструмент для 3D-моделювання та анімації, який широко використовується в різних галузях промисловості. Його сильні сторони полягають у можливостях моделювання, інструментах анімації та інтеграції з іншим програмним забезпеченням Autodesk. Він є галузевим стандартний інструмент для візуалізації архітектури.

### **3.4 Blender**

Blender – це безкоштовний набір інструментів для 3D-комп'ютерної графіки з відкритим кодом, який використовується для створення анімаційних фільмів, візуальних ефектів, мистецтва, друківаних 3D-моделей, анімованої графіки, інтерактивних 3D-додатків, віртуальної реальності та, раніше, відеоігор.

Функції Blender включають: 3D-моделювання, UV розгортка, текстурювання, цифрове малювання, редагування растрової графіки, скелетна оснастка, симуляцію рідини та диму, моделювання частинок, створення скульптур, анімацію, рендеринг, анімаційну графіку, редагування відео та постобробку [31].



Рисунок 3.4 –Blender logo

#### **3.4.1 Переваги і недоліки Blender**

Переваги:

– відкритий і безкоштовний: Blender є вільно доступним і має відкритий код, що робить його доступним для широкого кола користувачів без будь-яких попередніх витрат. Це сприяло його популярності серед любителів, студентів і професіоналів.

– комплексні інструменти 3D моделювання: Blender надає різноманітний набір інструментів моделювання, включаючи полігональне моделювання, скульптуру та параметричне моделювання. Він задовольняє різноманітні потреби моделювання, від створення простих об'єктів до складних тривимірних персонажів.

– можливості анімації: Blender чудово підходить для анімації завдяки таким функціям, як анімація ключових кадрів, такелаж і анімація персонажів. Його інструменти анімації надійні та підходять як для 2D, так і для 3D анімації.

– візуалізація в реальному часі за допомогою Eevee: рушій візуалізації дозволяє користувачам бачити зміни у вікні перегляду в режимі реального часу, ця функція покращує робочий процес, надаючи миттєвий візуальний зворотний зв'язок.

– рушій для рендеру Cycles: рушій Cycles у Blender створює високоякісні рендери з підтримкою глобального освітлення, контактних тіней навколишнього середовища та трасування шляху, це дозволяє користувачам створювати реалістичні та візуально привабливі зображення.

– скульптинг та текстурування: Blender містить потужні інструменти для ліплення для додавання дрібних деталей до 3D-моделей, він також пропонує розширені можливості текстурування та ультрафіолетового відображення для створення деталізованих і текстурованих поверхонь.

– симуляції та динаміка: Blender містить інструменти моделювання рідини, диму, вогню, тканини та динаміки м'якого/твердого тіла, ці інструменти дозволяють користувачам моделювати фізику реального світу в анімації та візуальних ефектах.

- редагування та компонування відео: Blender має вбудований редактор відеоряду (VSE) для редагування та композиції відео, користувачі можуть редагувати та комбінувати відзнятий матеріал, додавати ефекти та створювати кінцеві анімації чи фільми в одному програмному забезпеченні;
- сценарії та додатки Python: Blender підтримує сценарії Python, що дозволяє користувачам автоматизувати завдання, створювати власні інструменти та розширювати функціональність програмного забезпечення. Доступна велика бібліотека доповнень, які пропонують додаткові функції та інструменти;
- активна спільнота та документація: Blender має велику та активну спільноту користувачів, розширена документація, навчальні посібники та форуми полегшують користувачам пошук підтримки, вивчення нових методів і співпрацю з іншими;
- кросплатформна сумісність: Blender доступний для Windows, macOS і Linux, що гарантує, що користувачі можуть запускати програмне забезпечення на різних операційних системах;
- регулярні оновлення та розвиток: Blender Foundation прагне до регулярних оновлень і розвитку. Постійно додаються нові функції та вдосконалення, що гарантує, що Blender залишається конкурентоспроможним у сфері 3D-графіки.

#### Недоліки:

- крива навчання: Blender має круту криву навчання, особливо для початківців, широкий набір функцій і унікальний інтерфейс можуть потребувати часу та зусиль для освоєння;
- налаштування дизайну інтерфейсу користувача: дизайн інтерфейсу користувача (UI) є питанням особистих уподобань, і деякі користувачі можуть вважати інтерфейс Blender менш звичним порівняно з іншим програмним забезпеченням 3D, однак останні оновлення вирішують деякі проблеми інтерфейсу користувача;

- сприйняття галузевого стандарту: незважаючи на те, що Blender широко використовується і поважається, деякі професійні середовища все ще переважно використовують стандартне програмне забезпечення, наприклад Autodesk Maya або Cinema 4D. Це може вплинути на співпрацю в певних галузях;
- бібліотека активів: Вбудовану бібліотеку ресурсів Blender і можливості керування можна вважати менш надійними порівняно з іншим комерційним програмним забезпеченням 3D.

Підсумовуючи, Blender — це потужне та багатофункціональне 3D програмне забезпечення з рядом можливостей. Його природа з відкритим кодом, активна спільнота та постійний розвиток сприяють його популярності. Однак користувачі повинні бути готові до кривої навчання, і індивідуальні переваги можуть відігравати роль у тому, наскільки добре програмне забезпечення підходить до конкретних робочих процесів.

Провівши порівняльний аналіз доступного програмного забезпечення, враховуючи необхідні завдання було обрано Blender через його широкі можливості та доступність за ліцензією з відкритим вихідним кодом, а також наявність двох рушіїв.

## 4 МЕТОДИКА ОБРОБКИ FULLDOME ВІДЕО

Щоб покращити обробку відео, необхідно зробити кроки, які дозволять пришвидшити рендер кожного окремого кадру. Тому запропоновано алгоритм створення камери в режимі «Fisheye» на спрощеному рендері EEVEE.

Для створення камери ми спочатку перемкнемося на рушій рендера Cycles, (рис 4.1).

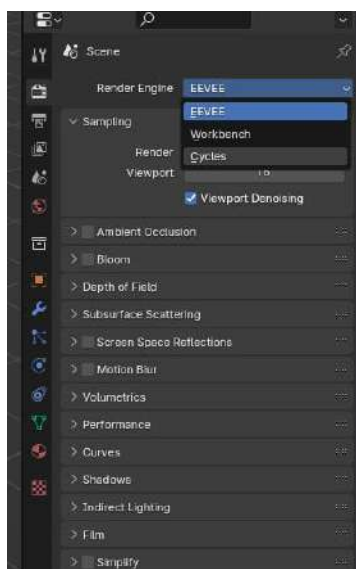


Рисунок 4.1 – Вибір рушію Cycles

Натискаємо комбінацію Shift+A та для створення камери тиснемо Camera (рис. 4.2).

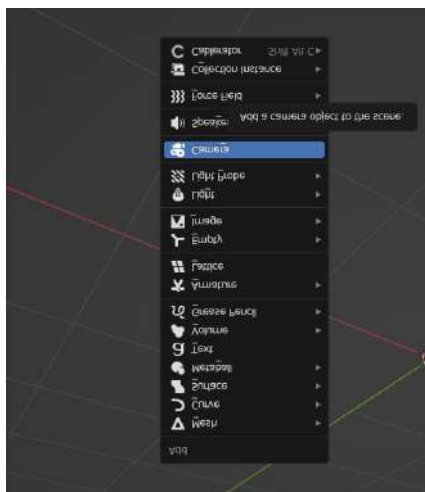


Рисунок 4.2 – Створення камери

Потім у налаштуваннях камери замінимо вид перспективи на вид панорами (рис. 4.3).

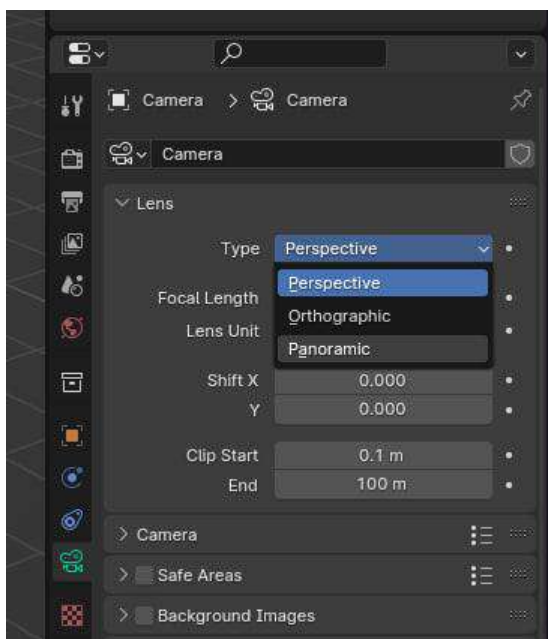


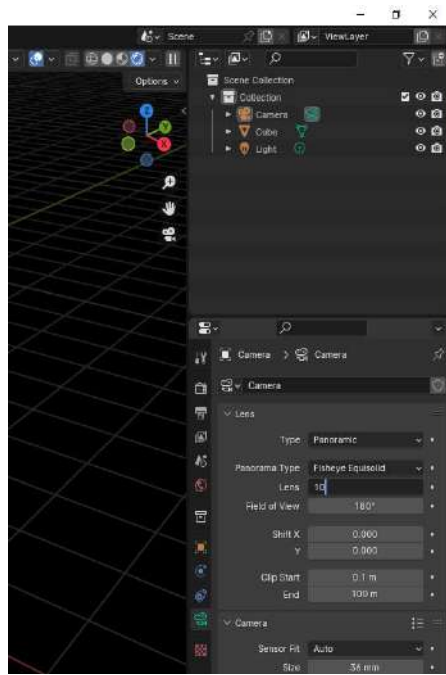
Рисунок 4.3 – Налаштування камери

Режим лінзи вже вказаний як «риб'яче око». Тепер наше зображення матиме наступний вигляд (рис. 4.4):

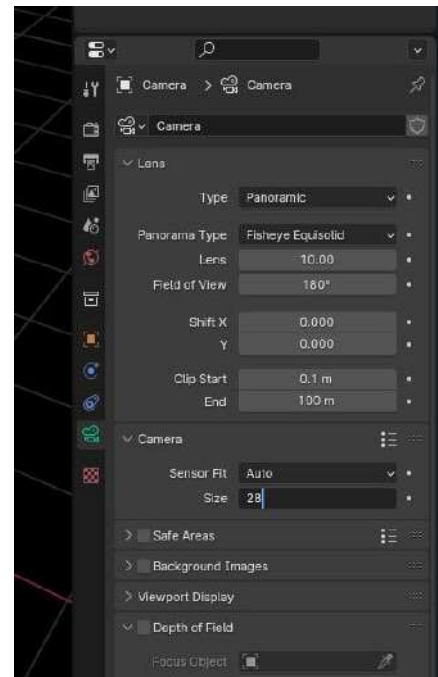


Рисунок 4.4 – Переключення режиму лінзи

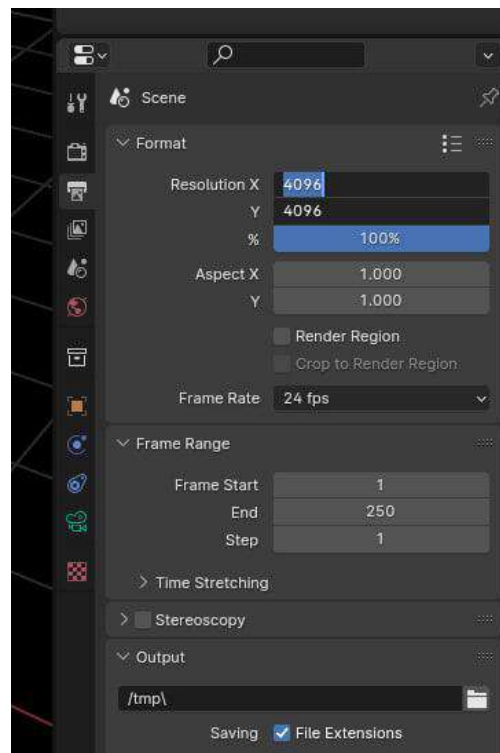
Тепер потрібно змінити розміри лінзи і зображення. Натиснувши на створену камеру, змінимо розмір лінзи у вкладці Data на 10 (рис. 4.5, а) і розмір камери на 28 мм (рис. 4.5, б). Розширення камери повинно бути квадратним, але оскільки купол досить великий, відповідно потрібно велика роздільна здатність, тому встановимо 4K (4096x4096) (рис. 4.5, в).



а



б



в

Рисунок 4.5 – Налаштування камери Cycles:

а – встановлення розміру лінзи; б – встановлення розміру камери; в – встановлення роздільної здатності

Тепер можемо бачити наступне зображення (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Вид з камери

Створимо тестову сцену для розуміння об'єму і для майбутнього визначення часових затрат на рендер.

Повернемося до твердження про неможливість створення панорамної камери в рендері Eevee на момент 20.12.2023.

Уявімо панорамну камеру, яка може створити такий знімок. Це камера з кутом огляду  $180^\circ$ , що означає, що камера збирає промені світла з напрямку векторів від  $181$  до  $360$  в системі локальних координат камери. Тепер знаючи під яким кутом потрібні вектори променів, ми можемо створити кілька камер з перспективою, щоб зібрати потрібні промені. Для зручності візьмемо поле зору камер із кутом огляду  $90^\circ$  (рис. 4.7).

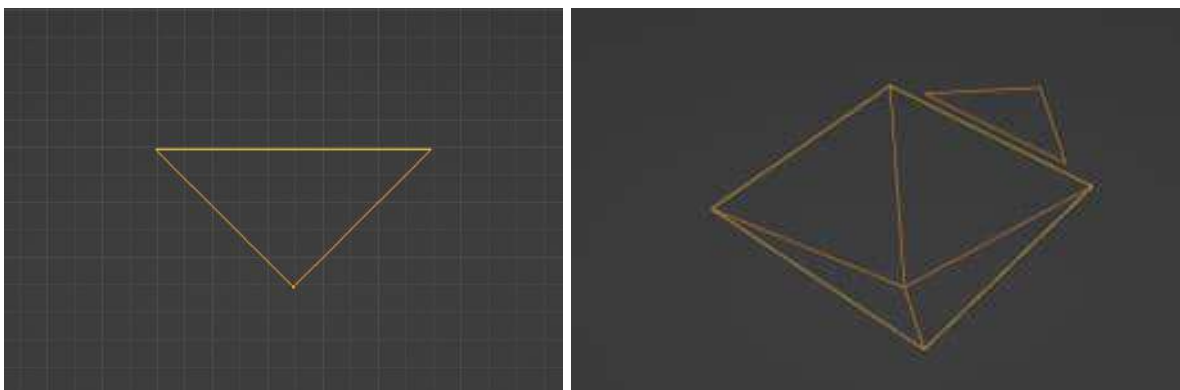


Рисунок 4.7– Створення першої камери

Кут було обрано емпіричним шляхом. Ми за допомогою камери отримуємо 50% з 180°. Ми можемо додати ще одну камеру(рис 4.8), і буде 100%.

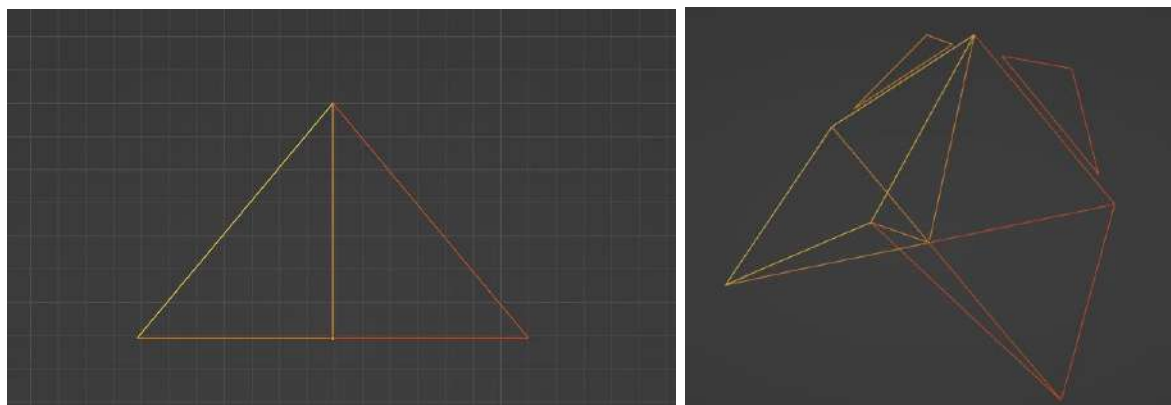


Рисунок 4.8 – Створення другої камери

Оскільки ми маємо 3 вісі, додамо ще 2 камери з кутом огляду 90 градусів (рис. 4.9).

Ми маємо 3 камери з кутом огляду 90°, що складає в сумі 270°.

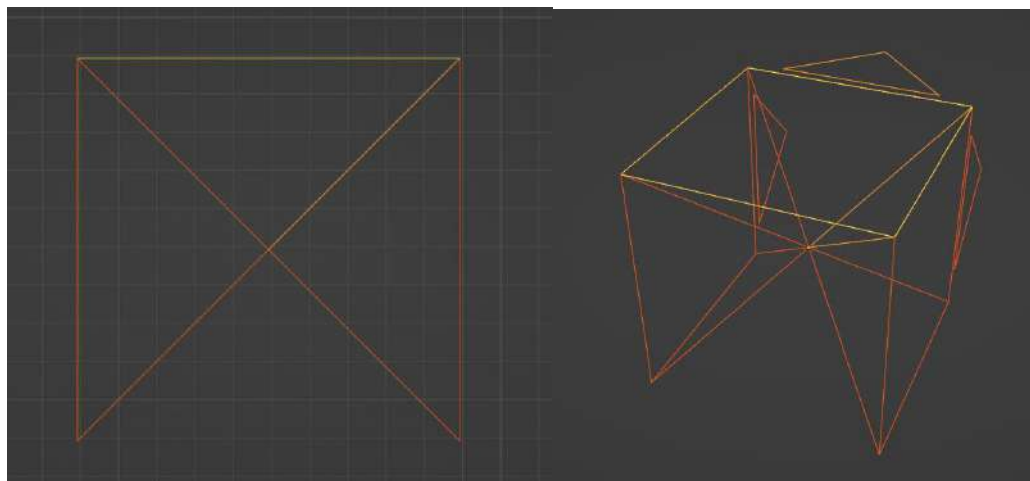


Рисунок 4.9 – Створення третьої камери

Тепер пригадаємо про третю вісь і додамо ще 2 камери з переду і ззаду. Тепер ми бачимо все те, що бачить і камера рендера Cycles, тільки з 5 камер Bevee.

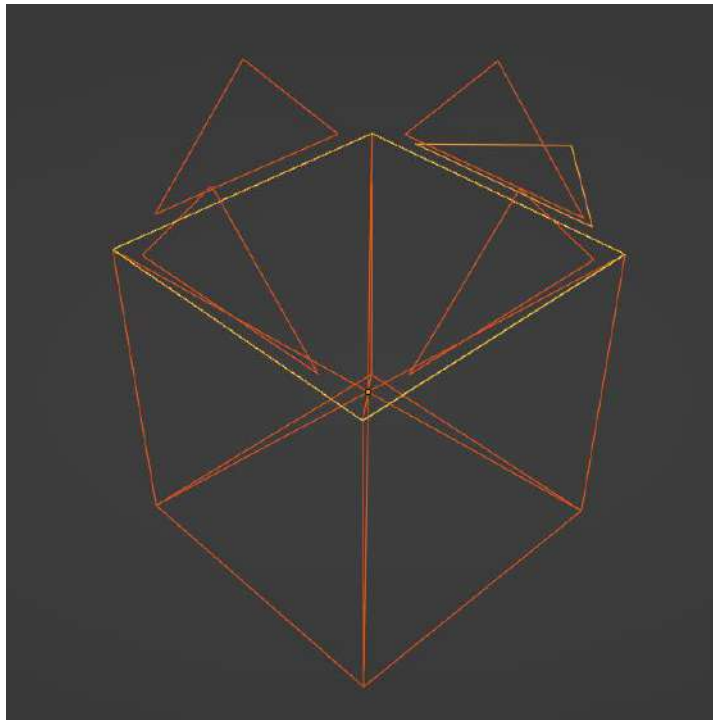


Рисунок 4.10 – Створення четвертої камери

Фіксуємо камери у вкладці Item за координатами обертання і переміщення, настигнувши на іконку замочка.

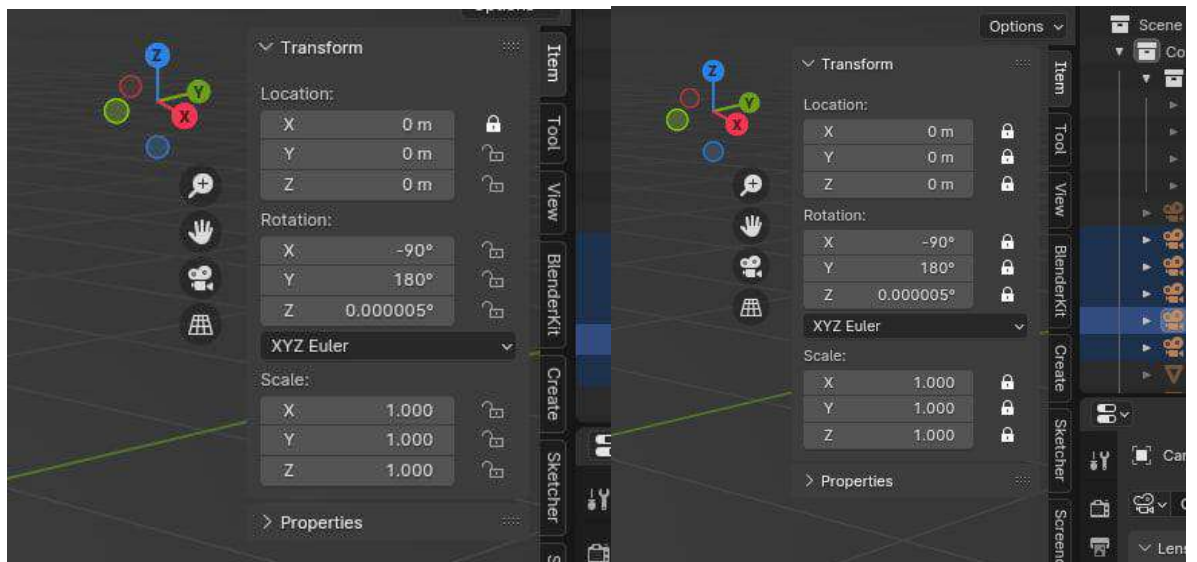
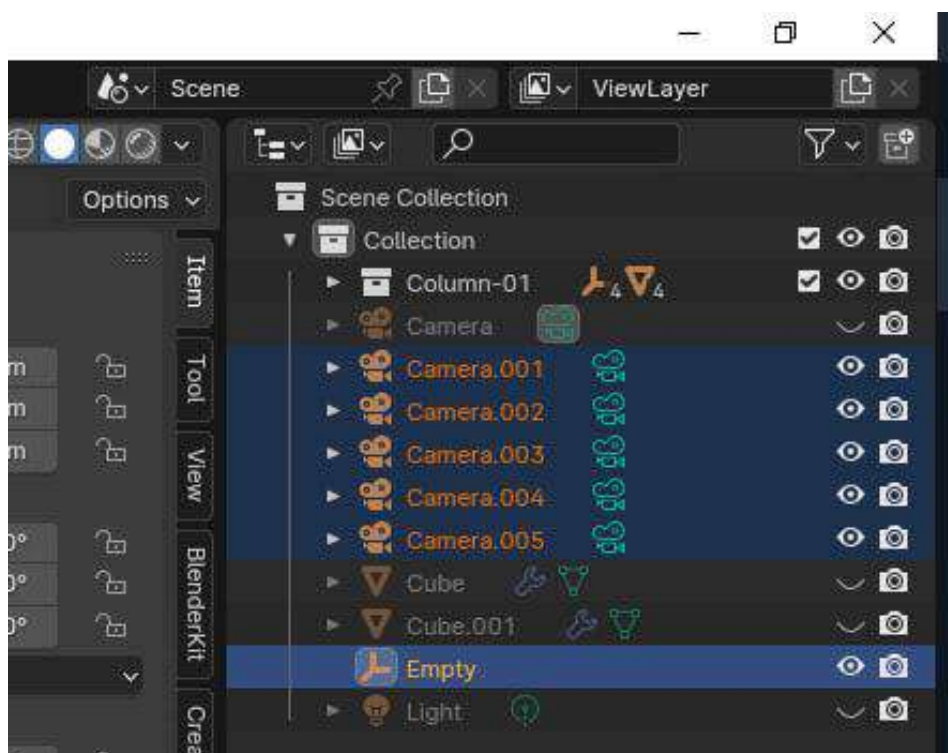
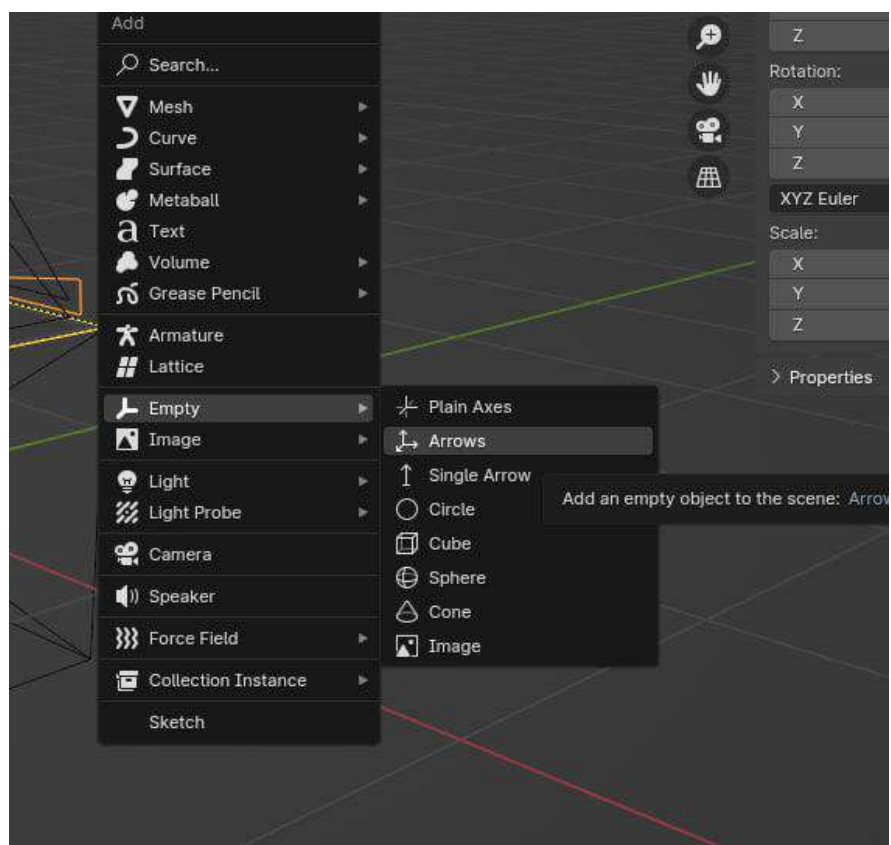


Рисунок 4.11 – Фіксація камери

Додаємо об'єкт Empty, натиснувши Shift+A у формі координат, за допомогою за якого будемо закріплювати камери.

Для прив'язки камер одночасно виділяємо всі камери мишкою, і затиснувши кнопку Shift, обираємо об'єкт Empty, далі тиснемо Ctrl+P (рис. 4.12). Потім потрібно додати опис того, що видно на рисунках, або хоча б підписи під ними.



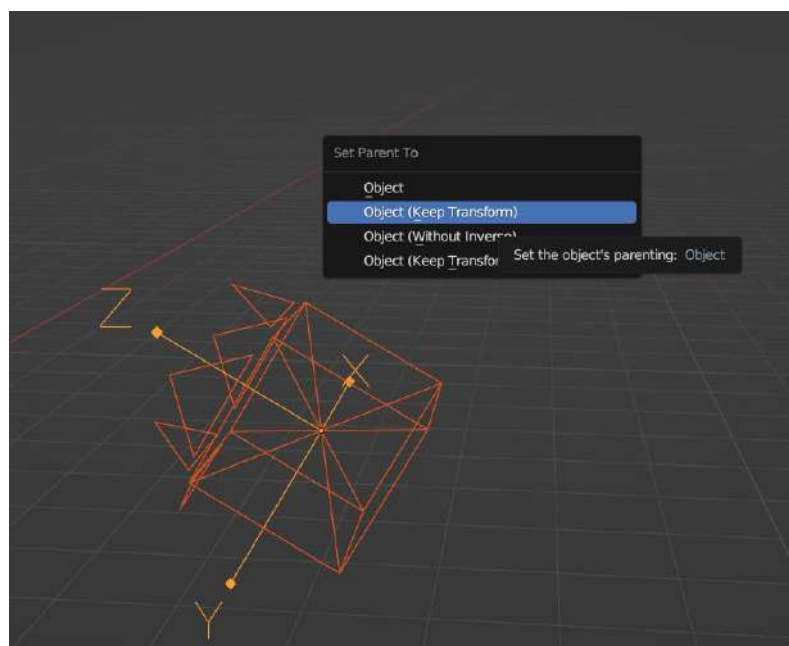
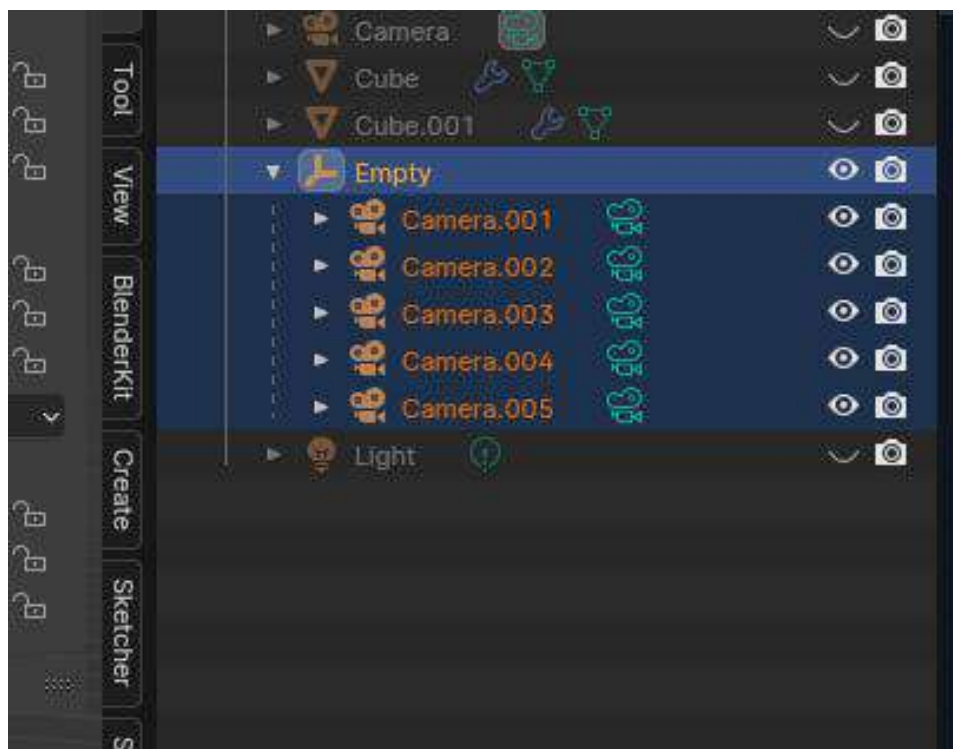


Рисунок 4.12 – Прив'язка камер до Empty

У вкладці Scene тиснемо галочку Render Region, щоб не витратити час на рендер зайвих 90°.

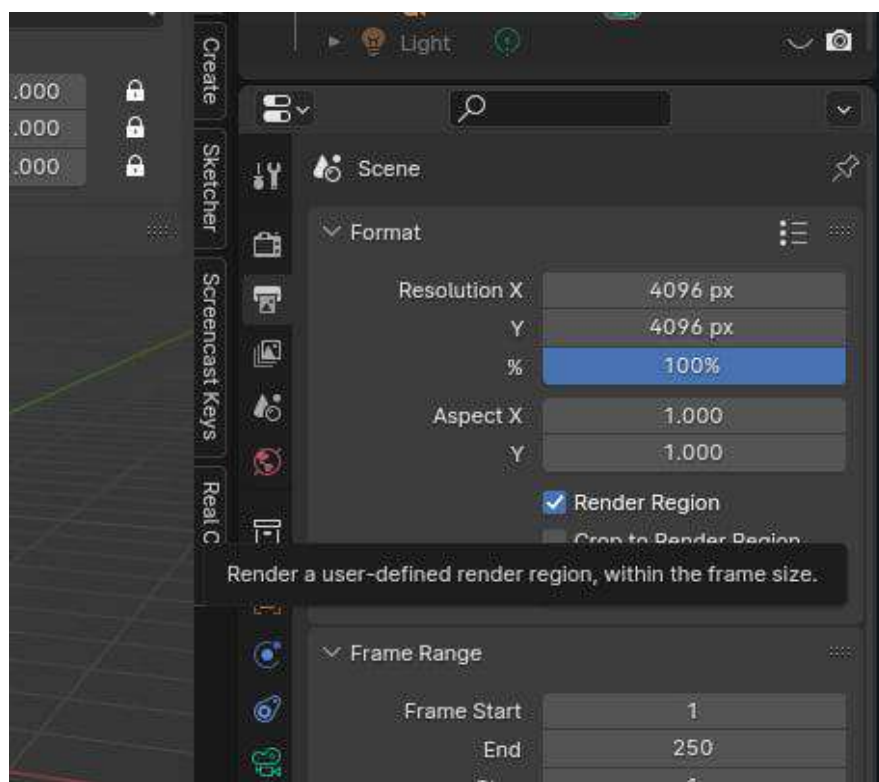


Рисунок 4.13 – Встановлення параметру Render Region

Тепер, щоб не витратити час на рендер окремої анімації для кожної камери, встановимо налаштування стереокамери.

Для охоплення всього простору по трьому вісям, нам потрібно рендерити не 2 камери, а 5. Тому вказуємо в назві камери, що вони належать до групи, не тільки за суфіксом "ліва" і "права" камера, але й додаємо "передня", "верхня" та "задня".

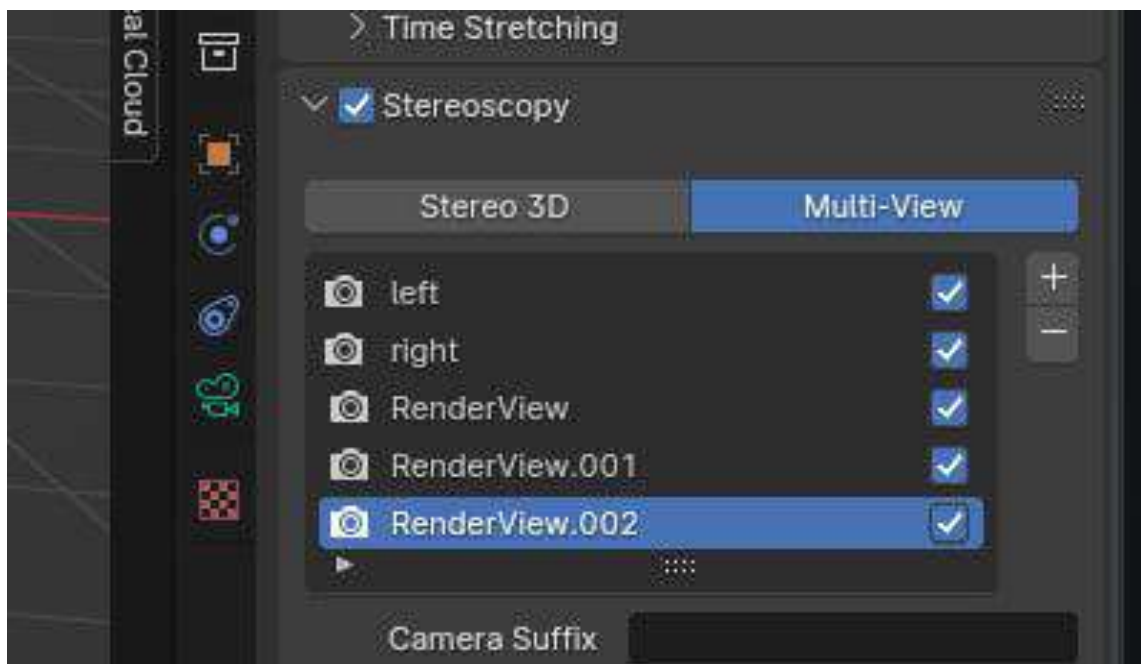
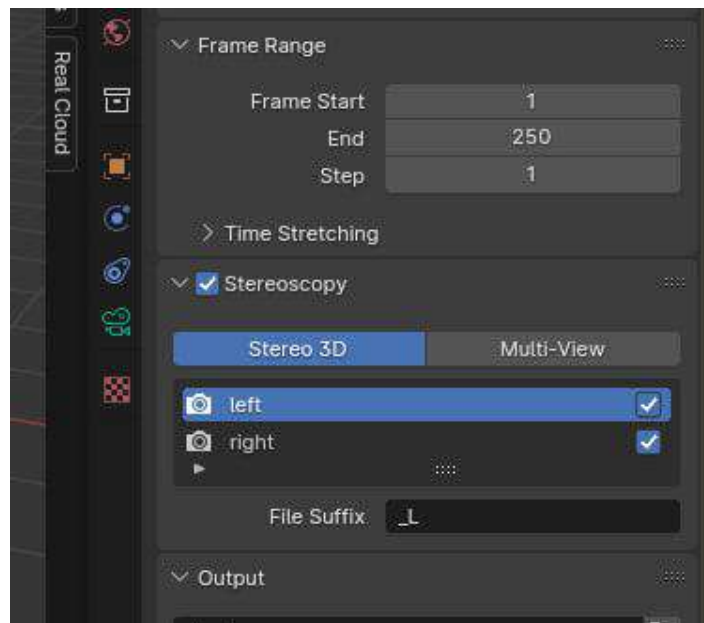


Рисунок 4.16 – Налаштування Stereo

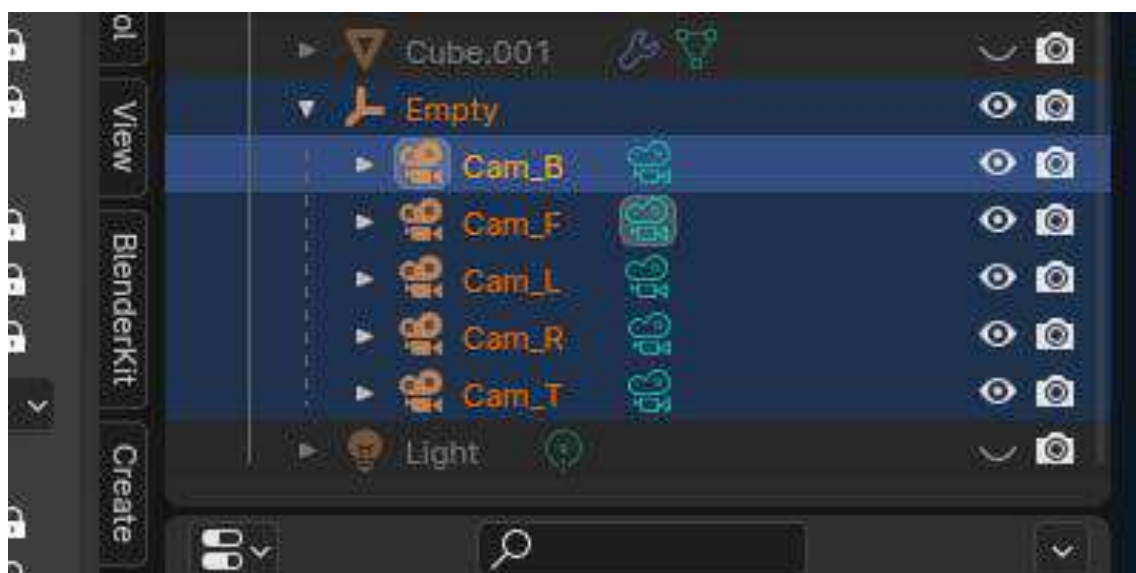


Рисунок 4.17– Розташовка суфіксів

На виході даного рендеру EEVEE маємо дані зображення (рис. 4.18).



Рисунок 4.18 – Результати рендера камер EEVEE

У новому документі Blender 3D створемо куб, в якого 5 площин з 6 будуть вказані як отримані зображення. Для цього виконуємо команду `Shift+A>Mesh>Cube`.

Для розтановки отриманих зображень у вкладці Material створюємо 5 матеріалів (рис. 4.19).

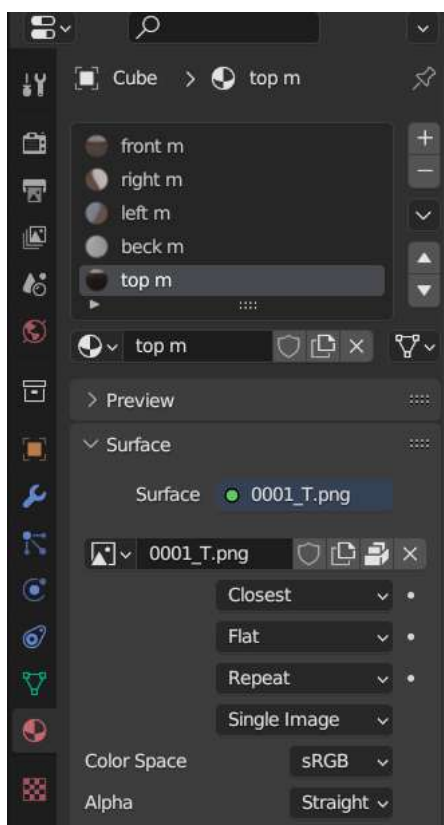


Рисунок 4.19 – Розстановка матеріалів

Далі необхідно перейти у вкладку Shading, далі додаємо ноду Image Texture, і за допомогою неї завантажуюмо отримані зображення (рис. 4.20).

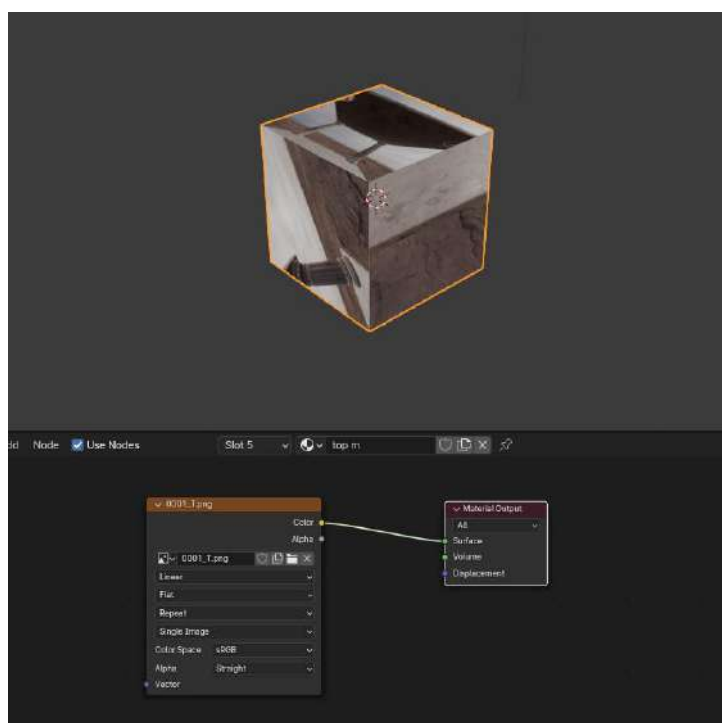


Рисунок 4.20 – Завантаження зображень в ноду Image Texture

Далі необхідно вирівняти отримання зображення у UV розгортці (рис. 4.21).

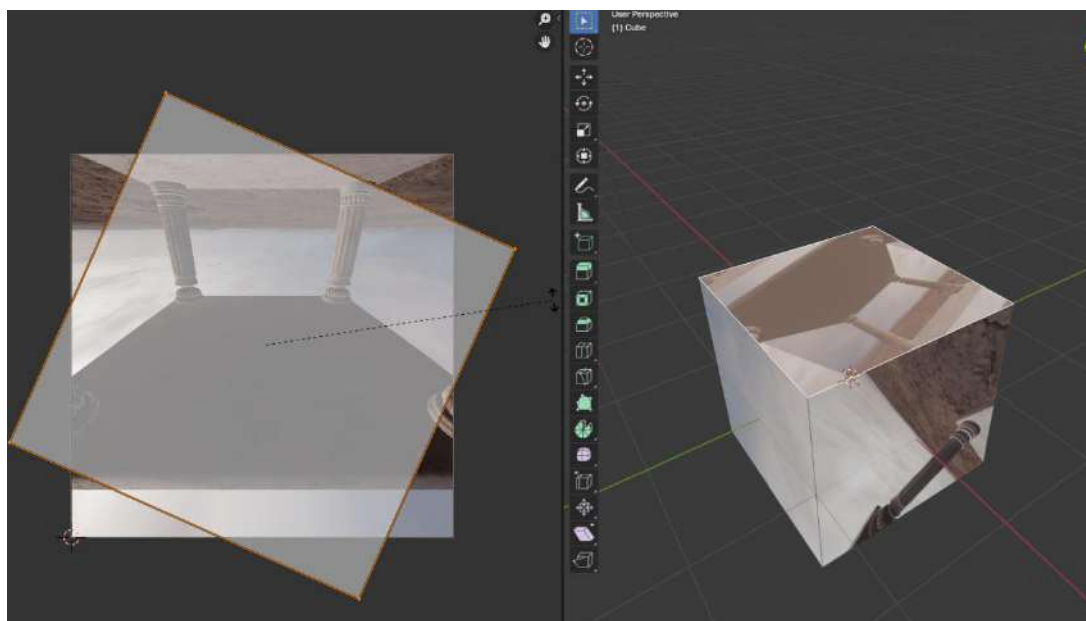


Рисунок 4.21 – Вирівнювання UV розгортки

Тепер за допомогою камери Cycles збираємо інформацію наших камер Eevee (рис. 4.22).



Рисунок 4.22 – Камера Cycles

Порівняння результатів отриманих створеною камерою Eevee та звичайною камерою Cycles з функцією Fisheye (рис. 4.23).

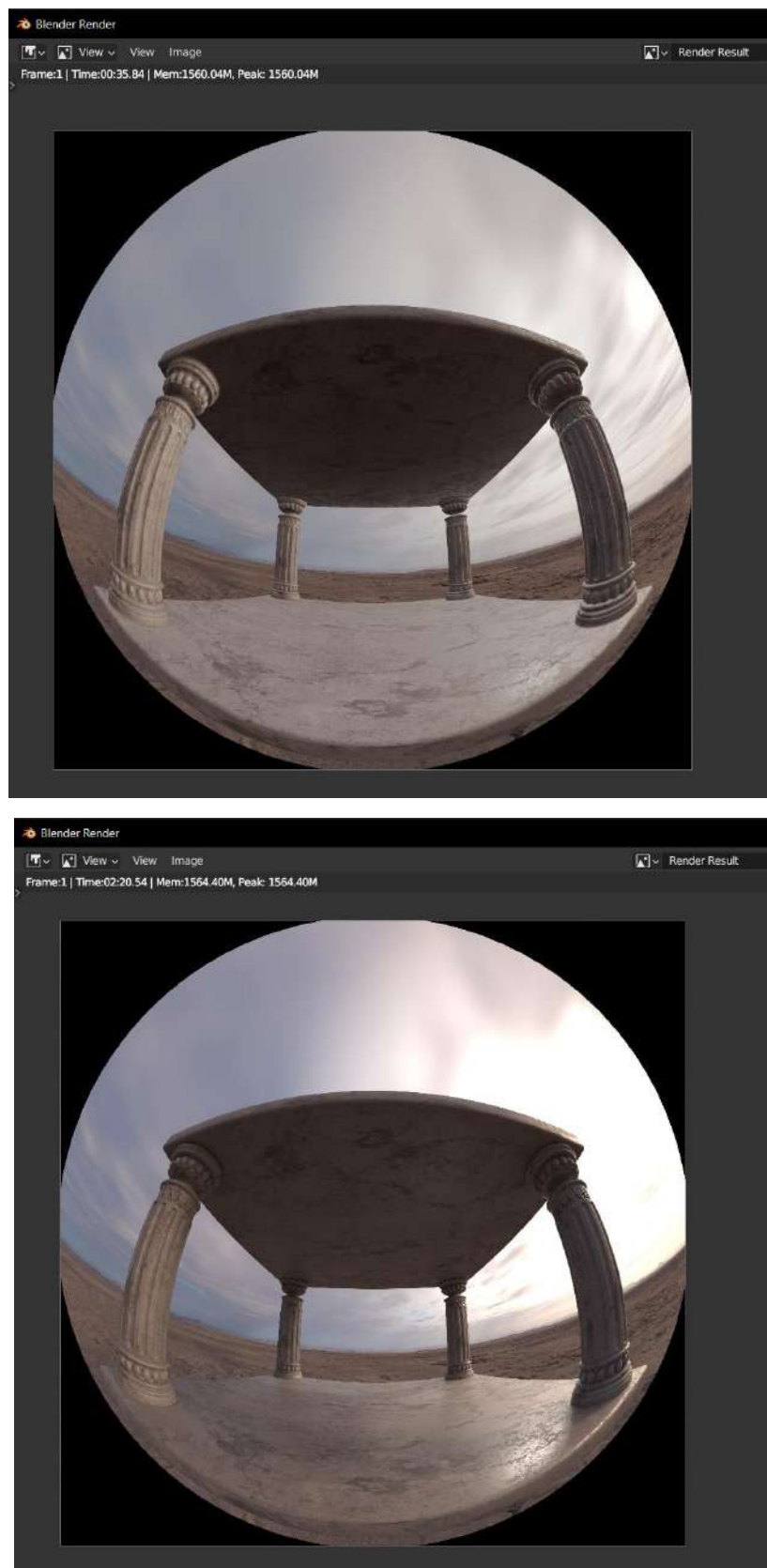


Рисунок 4.23 – Порівняння отриманих результатів

Час рендеру:

- Eevee 35,84 с;
- Cycles 140,54 с.

Алгоритм створення камери наведений на блок-схемі (рис. 4.24).

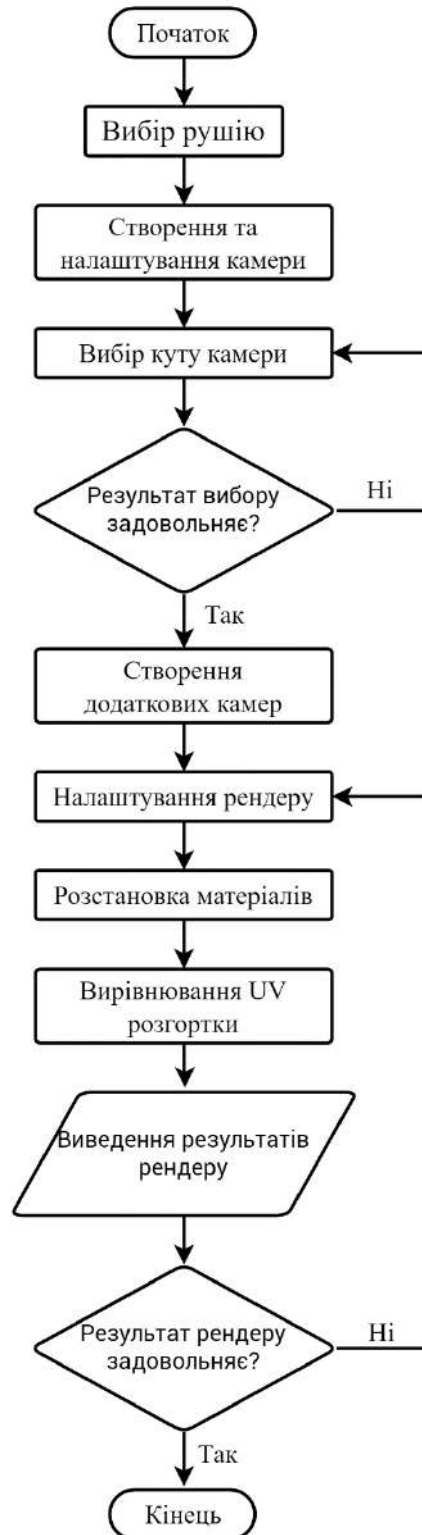


Рисунок 4.24 – Алгоритм створення камери

Було розроблено методику, яка на відміну від існуючих містить необхідність створення спеціальної камери, замість використання камери за замовчуванням, що в результаті дає змогу пришвидшити обробку кожного окремого кадру відео.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломного проєкту було розглянуто методи створення відеопроєкцій, застосування відеопроєкцій в різних галузях, наданий літературний огляд питанню технології Fulldome, зокрема, розглянута історія розвитку та технічні основи технології, види проєкторів, які використовують для відеопроєкцій формату Fulldome.

Проведено порівняння програмних пакетів для створення тривимірної комп'ютерної графіки:

- Autodesk Maya;
- Cinema 4D;
- Autodesk 3ds Max;
- Blender;

За результатами проведення аналізу характеристик 3D пакетів, їх переваг та недоліків прийнято рішення використовувати програму Blender. Програма має ряд переваг: широкий функціонал, вільна ліцензія, висока продуктивність роботи.

Запропонована методика обробки відео для відеопроєкції на складних поверхнях в 4 рази скорочує затребуваний час на рендер зображень формату Fulldome, що в свою чергу дає змогу економити час під час виготовлення відеоконтенту, а також при повторному рендері після правок.

Підсумовуючи, Fulldome технологія постає як потужний інструмент, який виходить за рамки традиційного створення зображень. Fulldome технологія є прикладом поєднання науки та мистецтва, починаючи з технічної основи проєкційних систем і зшивання зображень і закінчуючи різноманітними застосуваннями в планетаріях, кіно та освіті. Незважаючи на проблеми, пов'язані з обмеженнями роздільної здатності та створенням контенту, технологія стрімко розвивається.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. How To Project On 3D Geometry [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vuvv.org/documentation/how-to-project-on-3d-geometry#virtual-replica-of-the-real-scene>
2. Projection Mapping: Edge Blending vs Stacking [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.capelasers.co.za/projection-mapping-edge-blending-vs-stacking/>
3. A short history of 3D projection mapping [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://archive.ph/20110417112527/http://beta.fishburn-hedges.co.uk/2011/04/a-short-history-of-3d-projection-mapping/>
4. Projection Mapping in Oblivion (starring Tom Cruise) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20211019220037/http://articles.triplewidemedia.com/projection-mapping-in-the-making-of-oblivion-starring-tom-cruise/>
5. Projection of Greatness: The all-new Audi Q7 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=FNAtk0td8aM>
6. Illuminating Audi's latest advancements [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://strategyonline.ca/2016/11/17/illuminating-audis-latest-advancements/>
7. HOW TO USE PROJECTION MAPPING AT YOUR NEXT EVENT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20191016052036/https://freemanav-ca.com/how-to-use-projection-mapping-at-your-next-event/>
8. Integrated Visions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.integratedvisions.art/?page\\_id=59](https://www.integratedvisions.art/?page_id=59)
9. When Skyscrapers Are Your Screen [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.nytimes.com/2012/01/29/arts/design/video-mapping-artists-use-light-as-a-medium.html?\\_r=1&](https://www.nytimes.com/2012/01/29/arts/design/video-mapping-artists-use-light-as-a-medium.html?_r=1&)

10. Theatrix (in Japanese). Entertainment Plus [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<https://web.archive.org/web/20190629221156/https://etheatrix01.eplus2.jp/article/402497176.html>
11. Projection-Based Augmented Reality in Disney Theme Parks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6193074>
12. A World First: Lighting Up Stonehenge With Star Dj Paul Oakenfold [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://motionmapping.co.uk/case-studies/a-world-first-lighting-up-stonehenge-with-star-dj-paul-oakenfold/>
13. Prauge Orloj [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<https://www.czechcenter.org/blog/prague-astronomical-clock>
14. Zeiss projector [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Zeiss\\_projector](https://en.wikipedia.org/wiki/Zeiss_projector)
15. Stereo 3-Dimensional Photograph of Spitz A-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://planetariummuseum.com/index2019.html>
16. MEGASTAR-IIA [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<https://www.megastar.jp/en/products/megastar-2a/>
17. SKYMASTER ZKP 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<https://www.zeiss.com/planetariums/int/products/planetarium-technique/star-projectors/skymaster-zkp-4.html>
18. Planetarium Projection Systems: Delivering Awe and Wonder [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<https://www.bhphotovideo.com/explora/photography/features/planetarium-projection-systems-delivering-awe-and-wonder>
19. What is Fulldome? [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<https://creativeplanet.pl/en/what-is-fulldome/>
20. Digital Fulldome Projection Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://paulbourke.net/dome/domesummary.pdf>
21. Fisheye lens [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Fisheye\\_lens](https://en.wikipedia.org/wiki/Fisheye_lens)

22. Projection mapping [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Projection\\_mapping](https://en.wikipedia.org/wiki/Projection_mapping)
23. Можливості використання світлової та звукової техніки в освітньому процесі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vseosvita.ua/library/mozlivosti-vikoristanna-svitlovoi-ta-zvukovoi-tehniki-v-osvitnomu-procesi-399528.html>
24. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
25. Огляд Tokina 107 Fisheye 10-17mm F3.5-4.5 DX AT-X Internal Focus [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radojuva.com/2016/11/tokina-10-17-fisheye-if-dx-at-x/>
26. About the various projections of the photographic objective lenses [Електронний ресурс]. –  
Режим доступу: [http://michel.thoby.free.fr/Fisheye\\_history\\_short/Projections/Variou\\_s\\_lens\\_projection.html](http://michel.thoby.free.fr/Fisheye_history_short/Projections/Variou_s_lens_projection.html)
27. Miyamoto, Kenro (1964). "Fish Eye Lens". Journal of the Optical Society of America. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opg.optica.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-54-8-1060>
28. Autodesk Maya [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk\\_Maya](https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Maya)
29. Cinema 4D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maxon.net/en/cinema-4d>
30. Autodesk 3ds Max [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk\\_3ds\\_Max](https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max)
31. Blender (software) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Blender\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Blender_(software))
32. Blender documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.blender.org/>
33. Autodesk Maya: Create expansive worlds, complex characters, and dazzling effects [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.autodesk.com/products/maya/overview?term=1->

[YEAR&tab=subscription](#)