

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

ЯРМУСЬ Максим Вадимович

Алгоритми візуалізації приміщень засобами
тривимірного моделювання / Algorithms for visualization of
building by means of three-dimensional modelling

спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійна програма – Комп'ютерна інженерія

Випускна кваліфікаційна робота

Виконав: студент групи КІзм-21
Ярмусь Максим Вадимович

Науковий керівник
к.т.н., доцент Гураль І.В.

ТЕРНОПІЛЬ - 2024

АНОТАЦІЯ

Ярмусь М.В. Алгоритми візуалізації приміщень засобами тривимірного моделювання. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», освітньо-професійна програма. Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2024.

Робота написана обсягом 76 сторінок і містить 14 ілюстрацій, 1 таблицю, 1 додаток та 40 джерел за переліком посилань. Метою роботи є підвищення якості візуалізації приміщень за допомогою вдосконалення алгоритмів тривимірного моделювання та інтерактивної взаємодії з 3D-моделями.

Методи досліджень: аналітичні для систематизації існуючих методів та алгоритмів; експериментальні для тестування алгоритмів побудови, оптимізації, текстурювання та освітлення; методи комп'ютерного моделювання та візуалізації для створення реалістичних 3D-моделей.

Результати роботи можуть бути використані в архітектурному проектуванні, інтер'єрному дизайні, будівництві, а також у VR/AR застосунках для створення інтерактивних і реалістичних віртуальних турів. Рекомендації щодо впровадження удосконалених алгоритмів можуть знайти практичне застосування у розробці програмного забезпечення для 3D-візуалізації, навчальних симуляцій та демонстраційних програм, підвищуючи точність, реалістичність і ефективність представлення приміщень.

Орієнтовні напрямки розвитку досліджень: подальша автоматизація процесу текстурювання та освітлення, впровадження штучного інтелекту для покращення адаптивності та продуктивності, оптимізація алгоритмів для мобільних пристроїв та вбудованих систем, розширення інтерактивних можливостей у VR/AR середовищах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРИМІЩЕНЬ, ТЕКСТУРУВАННЯ, ОСВІТЛЕННЯ, BLENDER.

ANNOTATION

Yarmus M.V. Algoritms for visualization of building by means of three-dimensional modelling. – Manuscript.

Qualification paper for the degree of Master in specialty 123 "Computer Engineering," Educational and Professional Program. West Ukrainian National University, Ternopil, 2024.

The paper consists of 76 pages and includes 14 illustrations, 1 table, 1 appendix, and 40 references. The aim of the work is to improve the quality of room visualization by enhancing three-dimensional modeling algorithms and interactive interaction with 3D models.

Research methods. Analytical methods for systematizing existing methods and algorithms; experimental methods for testing construction, optimization, texturing, and lighting algorithms; computer modeling and visualization methods for creating realistic 3D models.

The results of the work can be used in architectural design, interior design, construction, as well as in VR/AR applications for creating interactive and realistic virtual tours. The recommendations on implementing the improved algorithms can be practically applied in developing software for 3D visualization, educational simulations, and demonstration programs, thereby increasing the accuracy, realism, and effectiveness of room representation.

Prospective research directions. Further automation of texturing and lighting processes, integration of artificial intelligence to enhance adaptability and performance, optimization of algorithms for mobile devices and embedded systems, and expanding interactive capabilities in VR/AR environments.

KEYWORDS. THREE-DIMENSIONAL MODELING, ROOM VISUALIZATION, TEXTURING, LIGHTING, BLENDER.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Особливості тривимірного моделювання та візуалізації приміщень.....	8
1.1 Етапи розвитку тривимірного моделювання.....	8
1.2 Основні принципи візуалізації приміщень.....	11
1.3 Аналіз програмного забезпечення для тривимірного моделювання приміщень.....	19
1.4 Висновки до розділу.....	24
2 Алгоритми побудови та оптимізації тривимірних моделей приміщень.....	26
2.1 Методи побудови геометричних моделей приміщень.....	26
2.2 Алгоритми оптимізації геометричних моделей приміщень.....	31
2.3 Текстурування та освітлення в тривимірних моделях приміщень.....	35
2.4 Висновки до розділу.....	45
3 Практичне застосування алгоритмів тривимірної візуалізації приміщень.....	47
3.1 Побудова базової геометрії приміщення в Blender.....	47
3.2 Моделювання меблів та деталей інтер'єру.....	51
3.3 Текстурування та освітлення для реалістичної візуалізації приміщення.....	54
3.4 Висновки до розділу.....	60
Висновки.....	62
Список використаних джерел.....	64
Додаток А. Світлокопії публікацій.....	67

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій тривимірного моделювання та візуалізації значно розширив можливості проектування і дизайну приміщень, забезпечуючи точне відображення інтер'єрів, ефективне управління простором і детальне представлення майбутніх об'єктів. Особливо актуальним це стало в архітектурі та дизайні, де 3D-візуалізація дозволяє створювати інтерактивні, реалістичні моделі приміщень для віртуального огляду і оцінки проектів. Однак ефективність і якість тривимірної візуалізації значною мірою залежить від використаних алгоритмів та методів побудови моделей, текстуровання, оптимізації та освітлення. Саме тому дослідження ефективних алгоритмів для створення 3D-моделей приміщень є надзвичайно важливим для підвищення точності, реалістичності та продуктивності візуалізації.

Метою роботи є підвищення якості візуалізації приміщень за допомогою вдосконалення алгоритмів тривимірного моделювання та інтерактивної взаємодії з 3D-моделями.

Для досягнення цієї мети у роботі поставлено наступні завдання:

- 1) провести детальний аналіз теоретичних основ і історичного розвитку технології тривимірного моделювання;
- 2) дослідити і порівняти основні принципи візуалізації приміщень;
- 3) розглянути сучасне програмне забезпечення для тривимірного моделювання;
- 4) вивчити алгоритми побудови і оптимізації геометричних моделей;
- 5) розробити алгоритм адаптивного текстуровання та освітлення;
- 6) побудувати модель приміщення спальні у Blender із застосуванням розробленого алгоритму.

Об'єкт дослідження – процес тривимірного моделювання та візуалізації приміщень. Предмет дослідження – алгоритми побудови, оптимізації, текстуровання і інтерактивної взаємодії з моделями приміщень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- 1) розроблено алгоритм адаптивного текстуровання та освітлення для покращення реалістичності 3D-візуалізації інтер'єрів.
- 2) створено модель приміщення спальні у Blender із застосуванням розробленого алгоритму для підвищення деталізації.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення роботи полягає у створенні тривимірної моделі приміщення спальні у програмному середовищі Blender із застосуванням розробленого алгоритму адаптивного текстуровання та освітлення. Створена модель дозволяє покращити деталізацію та реалістичність візуалізації, демонструючи ефективність розроблених алгоритмів. Результати роботи можуть бути використані для подальшого вдосконалення технологій 3D-візуалізації у сфері архітектурного дизайну, розробки інтерактивних VR/AR-середовищ та створення реалістичних презентацій архітектурних проєктів.

Публікації та апробація МР. Основні результати досліджень опубліковано в тезах доповідей «Застосування симетричних криптоалгоритмів для захисту інформації» обсягом 1 сторінка на науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2023) та «Аналіз методів та алгоритмів реконструкції обличчя людини на основі стереозображень для біометричних систем» обсягом 2 сторінки на науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2024) [1, 2].

Зазначена кваліфікаційна робота містить три розділи [3, 4].

У першому розділі проведено аналіз теоретичних основ тривимірного моделювання, розвитку технологій 3D-візуалізації, основні принципи візуалізації приміщень і наведено порівняння програмного забезпечення для 3D-моделювання.

Другий розділ присвячений алгоритмам побудови та оптимізації тривимірних моделей, а також методам текстуровання і освітлення, які забезпечують високу якість візуалізації.

У третьому розділі розглянуто практичне застосування алгоритмів тривимірної візуалізації приміщень в інтерактивних середовищах (VR/AR), а також перспективи розвитку технологій 3D-моделювання в архітектурі та дизайні.

1 ОСОБЛИВОСТІ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ

1.1 Етапи розвитку тривимірного моделювання

Тривимірне моделювання, або 3D-моделювання, є процесом створення об'ємних об'єктів у віртуальному середовищі за допомогою спеціалізованих програмних засобів. На сьогодні ця технологія знаходить застосування в багатьох сферах: від архітектури та дизайну до кінематографії, відеоігор, науки та промисловості [5]. Однак, щоб зрозуміти її сучасний стан, важливо розглянути історичний розвиток 3D-моделювання, який можна умовно поділити на декілька ключових етапів.

Перші кроки у розвитку комп'ютерної графіки, що стали фундаментом для сучасного тривимірного моделювання, відносяться до середини XX століття. У 1960-х роках інженери та науковці почали розробляти перші методи зображення об'ємних об'єктів на екрані комп'ютера. Одним із піонерів у цій галузі став Айвен Сазерленд, який створив систему Sketchpad у 1963 році [6]. Ця програма була однією з перших, яка дозволяла взаємодіяти з графічними об'єктами на екрані комп'ютера за допомогою стилуса, і хоч вона була двовимірною, її ідеї заклали основи для майбутнього розвитку 3D-графіки.

Паралельно з Sketchpad, інші дослідники працювали над проблемою відображення тривимірних об'єктів на двовимірних екранах. Зокрема, вже у 1960-х роках почали розроблятися основні алгоритми, які дозволяли зображати тривимірні сцени на екрані: алгоритм видалення прихованих поверхонь, алгоритм трасування променів, а також перші підходи до освітлення та тіней [7]. Ці досягнення стали основою для розвитку тривимірної комп'ютерної графіки у 1970-х роках.

З початку 1970-х років інтерес до тривимірної графіки почав активно зростати, особливо у контексті промислового дизайну та архітектури. В цей період був розроблений один із найважливіших алгоритмів для відображення

тривимірних об'єктів – алгоритм сканування-затінення (scanline algorithm) [8]. Він дозволяв більш ефективно визначати, які частини об'єкта повинні бути видимими для користувача, а які мають бути приховані іншими об'єктами або поверхнями.

У той же час було розроблено кілька важливих методів для поліпшення реалістичності тривимірних зображень. Наприклад, у 1971 році Анрі Гуро запропонував метод Гуро для згладжування, який дозволяв більш реалістично відтворювати зміну освітлення на об'єктах [9]. Пізніше, у 1975 році, Буй-Фонг запропонував ще досконаліший метод затінення – Фонгів метод, що забезпечував більш плавні переходи між яскравими та тіньовими частинами об'єкта [10].

У ці роки тривимірна графіка поступово виходить за межі суто академічних досліджень і починає застосовуватися в кіноіндустрії. Першими прикладами тривимірної графіки в кіно були такі фільми, як *Westworld* (1973) та *Star Wars* (1977) [11], де вперше використали комп'ютерну графіку для створення об'ємних об'єктів. Цей крок ознаменував початок комерційного використання 3D-технологій.

З 1990-х років відбулося значне прискорення розвитку тривимірного моделювання завдяки поширенню персональних комп'ютерів і появі спеціалізованого програмного забезпечення для 3D-графіки. Однією з найважливіших подій цього періоду стало створення програми 3D Studio (пізніше перейменованої на 3ds Max) у 1990 році [12]. Це програмне забезпечення стало доступним для широкого кола користувачів і дозволило їм створювати тривимірні об'єкти та сцени на персональних комп'ютерах. У 1995 році компанія Alias випустила іншу відому програму для 3D-моделювання – Maya, яка стала популярною серед професіоналів у галузі кінематографії та анімації [13].

1990-ті роки також ознаменувалися значним прогресом у технологіях апаратної підтримки тривимірної графіки. Випуск графічних процесорів (GPU), таких як NVIDIA RIVA 128 у 1997 році, зробив можливим реальну обробку

тривимірних сцен на звичайних персональних комп'ютерах [14]. Це відкрило нові можливості для використання 3D-графіки у відеоіграх, дизайні, архітектурі та інших галузях.

Важливо зазначити, що 1990-ті роки також були періодом значного прогресу в області анімації та симуляції фізичних процесів у тривимірних сценах. Це дозволило моделювати більш реалістичні рухи, взаємодії між об'єктами, симуляцію рідин, тканин тощо. Особливо вагомим внеском у цій сфері стали алгоритми динаміки твердих тіл (rigid body dynamics) та часткових систем (particle systems) [15], які використовуються й донині.

Початок нового тисячоліття ознаменувався подальшим розвитком тривимірної графіки, яка вже стала невід'ємною частиною кіноіндустрії, відеоігор та індустрії розваг. У цей період ми стали свідками появи фільмів, у яких тривимірна графіка займає ключову роль. Яскравим прикладом є «Аватар» (2009) [16], де було використано найсучасніші на той момент технології тривимірного моделювання та анімації. Крім того, значного поширення набула анімація персонажів, створених за допомогою технології motion capture, що дозволяє записувати рухи реальних людей і переносити їх на тривимірних героїв [17].

У 2000-х роках також відбувся значний стрибок у розвитку програмного забезпечення для 3D-моделювання. Окрім уже згаданих Maya та 3ds Max, на ринок вийшли інші потужні програми, такі як Blender – безкоштовна та відкрита система для тривимірного моделювання, яка швидко завоювала популярність серед художників і дизайнерів [18]. Завдяки відкритому вихідному коду Blender став платформою для розробки численних плагінів та інструментів, що дозволяють розширювати його можливості.

Також 2000-ті роки ознаменувалися швидким розвитком реалістичної візуалізації тривимірних сцен. Сучасні рендерери, такі як V-Ray, Mental Ray та Arnold, дозволяють досягти фотореалістичних результатів завдяки покращеним алгоритмам освітлення, тіней та матеріалів [19]. Важливим кроком стало також використання технологій глобального освітлення (global illumination) та

відстеження променів (ray tracing) [20], що дозволяють більш точно моделювати взаємодію світла з об'єктами в сцені.

Сучасне тривимірне моделювання переживає новий етап розвитку завдяки появі нових технологій, таких як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR) та штучний інтелект (AI). Інструменти для створення віртуальних світів, такі як Unreal Engine та Unity, дозволяють створювати реалістичні інтерактивні сцени з високою якістю графіки у режимі реального часу [21]. Це відкриває нові можливості для архітекторів, дизайнерів та розробників ігор, які тепер можуть створювати віртуальні моделі приміщень і об'єктів, з якими користувачі можуть взаємодіяти.

Штучний інтелект також починає відігравати важливу роль у тривимірному моделюванні. Алгоритми глибокого навчання (deep learning) вже використовуються для автоматизації процесу текстуровання, створення реалістичних персонажів та автоматичного генерування тривимірних моделей на основі фотографій або сканів реальних об'єктів [22].

Важливою подією в сучасному тривимірному моделюванні стало запровадження технології трасування променів у реальному часі (real-time ray tracing), яка набула популярності після інтеграції цієї функції у графічні процесори компаній NVIDIA та AMD. Це дозволило досягти неймовірного рівня реалістичності зображень у відеоіграх і візуалізаціях, де світло і тіні виглядають надзвичайно природно.

1.2 Основні принципи візуалізації приміщень

Алгоритми побудови тривимірних моделей приміщень є ключовим етапом у створенні високоякісних візуалізацій у 3D-середовищах [23]. Основна мета таких алгоритмів – забезпечити правильну геометричну побудову об'єктів для відображення приміщень у віртуальному просторі з максимальною

реалістичністю. Для досягнення цієї мети використовуються різні підходи, зокрема полігональне моделювання, сплайнове моделювання та методи побудови поверхонь, які дозволяють врахувати всі деталі інтер'єру та структури приміщення.

До основних етапів побудови моделей приміщень відносять наступне.

Створення базової геометрії приміщення. Перший етап моделювання – це побудова основної форми приміщення, включаючи стіни, стелю та підлогу. Тут зазвичай використовується метод полігонального моделювання, що є одним із найпоширеніших підходів для роботи з тривимірною геометрією. Полігони, найчастіше трикутники або чотирикутники, служать будівельними блоками, з яких створюється поверхня об'єкта. Кожен полігон визначається своєю формою через вершини, і за допомогою інструментів моделювання можна задати параметри форми для таких елементів, як стіни та підлога, починаючи з простих примітивів і поступово додаючи деталі.

Використання готових шаблонів та компонентів. Щоб скоротити час моделювання та досягти більшої точності, часто застосовуються готові шаблони або компоненти, такі як двері, вікна, сходи тощо. Ці елементи легко інтегруються в базову геометрію, значно спрощуючи процес моделювання. У більшості сучасних 3D-програм є бібліотеки об'єктів, які можна використовувати в моделях приміщень. Це дозволяє уникнути трудомісткого створення дрібних деталей вручну і водночас забезпечує високу точність відтворення архітектурних особливостей.

Використання інструментів сплайнового моделювання для створення складних форм. Сплайнове моделювання дозволяє створювати плавні криві та складні форми, такі як арки, куполи або вигнуті елементи інтер'єру. Сплайни – це математичні криві, які можуть визначати форму моделі з високою точністю. Використовуючи сплайни, можна створювати архітектурні елементи, які важко або неможливо відтворити за допомогою полігонального моделювання. Сплайни також можуть бути основою для генерації поверхонь шляхом їх екструзії або обертання навколо осі.

Врахування масштабів та пропорцій у моделюванні. Однією з важливих вимог до 3D-моделей приміщень є точність масштабів та пропорцій. Це досягається шляхом встановлення правильних параметрів при моделюванні базових елементів. Наприклад, висота стель, товщина стін, розміри вікон і дверей мають відповідати реальним розмірам, щоб забезпечити точність і реалістичність моделей. Цей етап є критично важливим при створенні архітектурних моделей, які повинні відповідати будівельним стандартам.

Додавання дрібних деталей і текстуровування. Після створення основної геометрії приміщення додаються деталі, такі як плінтуси, декоративні елементи або меблі, що підвищують реалістичність моделі. На цьому етапі застосовуються різні методи текстуровування, включаючи UV-мапування, щоб надати поверхням потрібний вигляд. Деталізація моделі за допомогою текстур і матеріалів дозволяє створити відчуття реалістичності, відображаючи особливості поверхонь, такі як дерево, бетон чи метал.

Кінцевими етапами побудови тривимірної моделі приміщення є оптимізація та підготовка моделі до рендерингу або інтерактивного використання (наприклад, у VR/AR середовищах) [24]. Оптимізація включає зменшення кількості полігонів, ретопологію та використання карт нормалей, що дозволяє зберегти візуальну якість моделі при зниженні обчислювального навантаження. У результаті отримується деталізована та реалістична модель приміщення, яка може бути використана для архітектурної візуалізації, інтерактивних турів або інших потреб візуалізації.

Сплайнове моделювання є одним із важливих методів для створення складних та гладких форм у тривимірному моделюванні, особливо в тих випадках, коли потрібна висока точність і плавність контурів. Сплайни – це криві, які визначаються контрольними точками (вузлами), між якими програма інтерполює плавну лінію [24]. Цей метод дозволяє створювати форми, які важко відтворити за допомогою полігонального моделювання, особливо при моделюванні архітектурних елементів з плавними переходами.

Сплайнове моделювання особливо корисне при створенні складних архітектурних елементів інтер'єру, таких як арки, куполи, колони, плавні переходи між поверхнями, а також різні декоративні деталі. Наприклад, якщо у приміщенні є арковий дверний проріз або вигнуті стельові елементи, їх значно легше змодельовати за допомогою сплайнів. Контрольні точки задаються у ключових місцях на поверхні, а між ними автоматично формується гладка крива, яка точно передає форму елемента.

До основних етапів моделювання зі сплайнами відносять наступне.

Задання контрольних точок. Першим кроком у сплайновому моделюванні є встановлення контрольних точок, які визначають основну форму майбутньої кривої. Користувач розташовує точки у просторі, задаючи ключові позиції на об'єкті. Наприклад, при моделюванні арки контрольні точки можуть бути розташовані у місцях переходу від стін до верхньої частини арки.

Інтерполяція кривої між контрольними точками. Після встановлення контрольних точок програма інтерполює між ними гладку криву. Цей процес автоматично визначає плавність кривої, що дозволяє досягти високої точності у відтворенні форми. Інтерполяція може виконуватися різними методами, зокрема за допомогою В-сплайнів або кривих Безьє, які забезпечують високий рівень контролю над формою.

Екструзія та обертання сплайнів. Створену сплайнову криву можна використовувати як базу для екструзії (витягування) або обертання навколо осі, що дозволяє отримати тривимірні об'єкти. Наприклад, обертаючи сплайн навколо осі, можна створити круглі або еліптичні колони. Екструзія дозволяє витягнути сплайн у просторі для створення стін, перегородок або інших архітектурних елементів.

Деталізація форми. Після створення базової форми з використанням сплайнів можна додавати додаткові контрольні точки або змінювати існуючі для уточнення форми. Це дозволяє детальніше налаштувати криву, щоб забезпечити точне відображення складних геометричних форм, таких як різьблені елементи або орнаменти.

Сплайнове моделювання дозволяє значно скоротити час роботи над складними формами та зменшити кількість полігонів, необхідних для відтворення гладких поверхонь. Завдяки цьому підходу можна досягти високої точності та плавності, що є особливо важливим для архітектурних моделей, де потрібно передати витонченість конструкцій і дотримати реалістичність. Крім того, сплайнове моделювання дозволяє легко редагувати форму шляхом зміни положення контрольних точок, що дає більше гнучкості та контролю над кінцевим результатом.

Завдяки своїй точності та універсальності, сплайнове моделювання стало невід'ємною частиною процесу створення якісних тривимірних моделей приміщень і використовується в архітектурі для моделювання елементів, які потребують плавності форм і вигнутих поверхонь.

Boolean-операції (булеві операції) є одним із важливих інструментів у тривимірному моделюванні, які дозволяють комбінувати та модифікувати геометричні форми для створення складних об'єктів [25]. Ці операції використовуються для роботи з двома або більше об'єктами, де можна застосувати різні типи взаємодій між формами, що значно полегшує моделювання складних конструкцій. Boolean-операції зазвичай включають три основні типи: об'єднання (Union), віднімання (Subtract) та перетин (Intersect), кожен з яких має своє специфічне призначення.

Основні Boolean-операції включають:

- Union (об'єднання): з'єднання двох об'єктів в один;
- Subtract (віднімання): видалення частини одного об'єкта за допомогою іншого;
- Intersect (перетин): збереження лише тієї частини, де об'єкти перетинаються.

Операція Union дозволяє з'єднати дві або більше форми в один суцільний об'єкт. Це корисно, коли потрібно створити один об'єкт із декількох окремих частин. Наприклад, при моделюванні приміщень Union може використовуватися для об'єднання різних елементів декору або архітектурних деталей, таких як

колони та підвісні балки, в одну єдину структуру. Після застосування Union об'єкт сприймається як один елемент, що полегшує подальше редагування та маніпуляції з ним.

Операція Subtract дозволяє видалити частину одного об'єкта за допомогою іншого. Це особливо корисно для створення отворів у стінах для вікон і дверей. Наприклад, щоб створити віконний або дверний проріз, спочатку моделюється форма стіни як суцільний об'єкт, після чого створюється окремий об'єкт, що має форму отвору (наприклад, прямокутник для дверей або квадратик для вікна). Використовуючи Subtract, можна видалити цю форму з основного об'єкта стіни, створивши точний отвір потрібного розміру і форми.

Операція Intersect зберігає лише ту частину об'єктів, де вони перетинаються. Цей метод є корисним для створення складних деталей і форм, де потрібна точна зона перетину між двома об'єктами. Наприклад, Intersect можна використовувати для створення складних елементів декору або архітектурних конструкцій, де потрібно показати лише ту частину, що знаходиться в межах перетину двох об'єктів.

Boolean-операції широко застосовуються в архітектурному моделюванні для створення різноманітних конструктивних елементів. Наприклад:

- вікна та двері: використання Subtract дозволяє швидко створювати отвори в стінах для вікон і дверей, забезпечуючи точність розмірів і положення.
- декоративні ніші та арки: за допомогою Union можна об'єднати різні геометричні форми, створюючи аркові конструкції або декоративні ніші.
- складні архітектурні елементи: за допомогою Intersect можна створювати деталі зі складною формою, які з'являються лише на перетинах різних об'єктів, наприклад, нестандартні декоративні елементи або структурні компоненти.

Boolean-операції є простими у використанні та значно скорочують час моделювання, оскільки дозволяють швидко створювати складні геометричні форми з базових об'єктів. Вони особливо корисні в архітектурному моделюванні, оскільки дозволяють легко формувати точні отвори та

нестандартні форми, що важливо для створення реалістичних і деталізованих моделей приміщень. Завдяки Boolean-операціям моделі виглядають природно і відповідають точним розмірам, що є необхідним для архітектурної візуалізації.

У процесі тривимірного моделювання приміщень особливе значення має дотримання архітектурних стандартів та вимог, що забезпечує реалістичне та точне відтворення простору [26]. Для досягнення цього важливо враховувати пропорції та масштаби кожного елемента інтер'єру, що робить модель придатною для професійної візуалізації та проектування. Наприклад, такі характеристики, як висота стель, ширина дверних і віконних прорізів, повинні відповідати реальним стандартам будівництва або технічному завданню проєкту.

До основних етапів моделювання приміщень відносять наступне.

Використання креслень та планів для точності. Один з основних методів забезпечення точності під час моделювання – це використання креслень та планів приміщень. Ці двовимірні зображення часто імпортуються у 3D-середовище і використовуються як референси, які допомагають моделювальникам створювати об'єкти з потрібними розмірами та пропорціями. Це дозволяє підтримувати масштабування і дотримуватися пропорцій усіх елементів, що особливо важливо для архітектурних та інтер'єрних проєктів.

Моделювання базової геометрії та основних елементів. На початковому етапі моделювання створюється базова геометрія приміщення, включаючи стіни, підлогу, стелю, дверні та віконні отвори. Тут зазвичай використовуються прості полігональні або сплайнові моделі, які дозволяють швидко побудувати основну структуру приміщення. Цей етап є фундаментом для подальшої деталізації моделі та додавання додаткових елементів.

Деталізація моделі та використання бібліотек готових елементів. Після побудови базової геометрії до моделі додаються деталі та допоміжні елементи інтер'єру, такі як меблі, освітлювальні прилади, декоративні елементи. Для прискорення роботи часто використовуються бібліотеки готових моделей, які можна імпортувати у проєкт. Наприклад, моделі меблів та освітлення можуть

бути вже створені як окремі елементи, що дозволяє швидко розмістити їх у просторі та уникнути додаткового моделювання.

Створення 2D-плану приміщення. Ще одним важливим кроком є створення 2D-плану, що дозволяє з висоти бачити розташування всіх елементів у приміщенні. Це допомагає архітекторам та дизайнерам аналізувати просторові взаємозв'язки між об'єктами, а також відстежувати зміни на різних етапах розробки моделі. Використання 2D-проекцій спрощує роботу з простором, надаючи чітке уявлення про розташування та пропорції об'єктів.

Текстурування та налаштування матеріалів. Реалістичність моделі значною мірою залежить від текстурування та налаштування матеріалів. Текстурування полягає в нанесенні зображень (текстур) на поверхні об'єктів, які відображають матеріал, з якого вони виготовлені. Наприклад, підлога може мати текстуру деревини, стіни – цегли, а меблі – текстуру тканини. Крім того, для додаткової деталізації використовуються карти відбиття, карти нерівностей (bump maps) та карти нормалей (normal maps), що дозволяють створювати ефект глибини та детальності без збільшення кількості полігонів.

Налаштування освітлення для реалістичної візуалізації. Освітлення є одним з найважливіших факторів для створення реалістичних 3D-сцен. У тривимірному моделюванні використовуються різні типи джерел світла, такі як точкові, спрямовані та розсіяні джерела світла. Реалістичне освітлення дозволяє передати взаємодію світла з об'єктами в приміщенні, включаючи тіні, відбиття та відблиски. Глобальне освітлення (Global Illumination) є однією з найбільш передових технологій, що враховує як пряме освітлення від джерел світла, так і відбите світло від поверхонь. Це створює ефект природного освітлення, що суттєво підвищує рівень реалістичності сцени.

Налаштування матеріалів – це процес, що дозволяє змінювати такі параметри, як прозорість, відбивна здатність, текстура поверхні, щоб створити фотореалістичне зображення об'єктів [27]. Наприклад, скляні поверхні можуть мати налаштовану прозорість та рефракцію (заломлення світла), що робить їх

максимально схожими на справжнє скло. Металічні поверхні можуть мати високу відбивну здатність, що додає блиску та реалістичності.

Алгоритми побудови моделей приміщень відіграють ключову роль у створенні високоякісних візуалізацій у 3D-середовищах. Правильне використання методів моделювання, текстурювання, освітлення та налаштування матеріалів дозволяє досягти реалістичності та точності, що відповідають стандартам архітектурного проектування. Завдяки цьому підходу тривимірні моделі приміщень можуть використовуватися не лише для візуалізації, а й для прийняття рішень на різних етапах проектування, що робить їх важливим інструментом у сучасній архітектурі та дизайні.

1.3. Аналіз програмного забезпечення для тривимірного моделювання приміщень

Сучасне тривимірне моделювання є важливою частиною багатьох галузей, таких як архітектура, дизайн інтер'єру, кінематографія, інженерія, створення відеоігор тощо. Для виконання цих завдань існує багато програмного забезпечення, яке надає можливість створювати складні 3D-моделі. У цьому підрозділі буде розглянуто три найбільш популярні програми для 3D-моделювання: Blender, 3ds Max та SketchUp, а також їхні функціональні можливості, переваги та недоліки.

Розглянемо ряд популярних програм для 3D-моделювання.

Blender – це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, яке надає широкі можливості для тривимірного моделювання, анімації, візуалізації, скульптингу та симуляції фізичних ефектів [28]. Він підтримує розробку повноцінних 3D-сцен і містить усі необхідні інструменти для роботи з тривимірною графікою, що робить його корисним як для новачків, так і для професіоналів у сфері 3D.

Blender пропонує потужний набір функцій для полігонального моделювання, включаючи підтримку NURBS і кривих Безьє, Boolean-операцій, а також інструменти для деталізації та оптимізації моделей. Програма також має вбудовані засоби для текстуровання, включаючи UV-мапування, підтримку карт Normal, Specular і Bump, що дозволяє досягти реалістичності текстур.

Анімаційний модуль Blender підтримує ключові кадри, криву анімації, скелетну анімацію, симуляції тканин, рідин та інших фізичних ефектів, що дозволяє створювати складні динамічні сцени. Візуалізація в Blender виконується за допомогою рендер-двигунів, таких як Cycles і Eevee, які дозволяють створювати як фотореалістичні, так і стилізовані зображення з різним рівнем деталізації.

Однією з ключових особливостей Blender є його спільнота користувачів, яка постійно розробляє плагіни та доповнення, що розширюють функціональність програми. Завдяки активному розвитку та регулярним оновленням Blender залишається популярним вибором серед 3D-художників, аніматорів, дизайнерів і розробників ігор.

3ds Max, розроблений компанією Autodesk, є одним із найпопулярніших і найпотужніших інструментів для тривимірного моделювання, рендерингу та анімації. Завдяки широкому набору функцій та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, 3ds Max активно використовується професіоналами у таких сферах, як архітектурна візуалізація, дизайн інтер'єрів, кінематографія, створення відеоігор і візуальних ефектів.

Ця програма пропонує великий набір інструментів для полігонального моделювання, що включає методи швидкого створення складних геометричних форм, Boolean-операції, NURBS і сплайнове моделювання. Високий рівень деталізації дозволяє користувачам створювати точні й деталізовані моделі будівель, меблів, персонажів та інших об'єктів, що є важливим для архітектурного та дизайнерського проектування.

Для текстуровання в 3ds Max передбачені такі інструменти, як UV-мапування, вбудовані бібліотеки матеріалів та підтримка текстурних карт

(Normal, Bump, Specular), що дозволяє реалізувати детальне та реалістичне текстурування моделей. Крім цього, програма підтримує налаштування освітлення та фізично коректний рендеринг, що забезпечує високу реалістичність при візуалізації.

3ds Max оснащений потужним анімаційним модулем, який включає підтримку ключових кадрів, морфінг, систему частинок і симуляцію динамічних ефектів, таких як рідини, тканини та інші фізичні властивості [29]. Це дозволяє створювати складні анімаційні сцени, що є важливими для кінематографії та індустрії розваг.

Вбудовані рендер-двигуни, такі як Arnold, дозволяють досягти фотореалістичності при візуалізації, створюючи якісні зображення з різним ступенем деталізації. Крім того, програма підтримує численні плагіни та скрипти, що дозволяє користувачам налаштовувати робочий процес під конкретні потреби проєкту, а також інтеграцію з іншими продуктами Autodesk.

Завдяки своїй універсальності, потужності та гнучкості, 3ds Max є вибором багатьох професіоналів, які працюють з 3D-графікою, анімацією та візуальними ефектами, забезпечуючи високу продуктивність та якість візуалізації.

SketchUp – це інтуїтивно зрозуміле програмне забезпечення для 3D-моделювання, розроблене для спрощення процесу створення тривимірних моделей, особливо у сфері архітектури, дизайну інтер'єру та ландшафтного дизайну [30]. Його головна особливість – дружній до користувача інтерфейс, що робить програму доступною як для початківців, так і для професіоналів. Простота інструментів SketchUp дозволяє швидко створювати тривимірні моделі без складного навчання, що підходить для створення концептуальних моделей і макетів.

SketchUp забезпечує ефективні інструменти для полігонального моделювання, що дозволяють користувачам будувати й редагувати об'єкти з високою швидкістю. Програма включає в себе такі функції, як Push/Pull для швидкої екструзії поверхонь, масштабування, інструменти для роботи з лініями і площинами, що дозволяє швидко змінювати геометрію моделей. Незважаючи

на свою простоту, SketchUp також підтримує роботу з шарами та групами, що полегшує організацію великих і складних моделей.

Для текстурування SketchUp пропонує вбудовані бібліотеки матеріалів, які користувачі можуть легко застосовувати до поверхонь. Програма підтримує імпорт власних текстур, що розширює можливості візуалізації та дозволяє створювати більш реалістичні моделі. Крім того, за допомогою додаткових плагінів SketchUp можна інтегрувати з програмами для рендерингу, такими як V-Ray, що дозволяє отримувати більш фотореалістичні зображення моделей.

SketchUp має широку підтримку спільноти та багатий вибір плагінів, доступних через SketchUp Extension Warehouse. Це дозволяє користувачам додавати нові функції та адаптувати програму під власні потреби. Наприклад, плагіни можуть додавати можливості для детальнішого моделювання, розширених інструментів для вимірювання або аналізу, а також підтримку для роботи з параметричними об'єктами.

Завдяки можливості швидкого створення моделей і легкості у використанні, SketchUp широко використовується для попередньої візуалізації будівель, інтер'єрів та ландшафтів. Програма підтримує експорт у різні формати файлів, що дозволяє легко передавати моделі для подальшої роботи в інших професійних інструментах. Це робить SketchUp зручним рішенням для концептуального проектування та початкової стадії розробки проєктів.

Blender є чудовим вибором для тих, хто потребує універсального інструменту для створення тривимірних сцен та анімацій без необхідності великих витрат. Його безкоштовність та постійна підтримка спільноти робить його привабливим як для новачків, так і для професіоналів. Однак, для архітекторів та дизайнерів інтер'єру може бути складним через відсутність прямої інтеграції з професійними архітектурними програмами.

У таблиці 1.1. наведено функціональні можливості та порівняння.

Таблиця 1.1 – Функціональні можливості програмного забезпечення та їх порівняння

ПЗ	Переваги	Недоліки
Blender	- безкоштовний та з відкритим кодом; - підтримка великої кількості функцій, таких як анімація, скульптинг, рендеринг; - висока гнучкість завдяки підтримці численних форматів файлів; - потужна спільнота користувачів, постійне оновлення та велика кількість навчальних ресурсів;	- інтерфейс може здатися складним для новачків; - відсутність прямих інтеграцій з професійними програмами для архітектури (AutoCAD, Revit); - для роботи з великими сценами може потребувати більше ресурсів, ніж деякі комерційні програми;
3ds Max	- потужні інструменти для полігонального та NURBS-моделювання; - підтримка реалістичного рендерингу завдяки вбудованим двигунам (Arnold, V-Ray); - розвинені інструменти для анімації та симуляцій фізики; - інтеграція з іншими продуктами Autodesk для архітектурних та інженерних рішень;	- дороге ліцензування, що може бути обмежуючим фактором для окремих користувачів чи малих компаній; - складність для новачків через великий обсяг функціоналу; - високі вимоги до ресурсів комп'ютера, особливо при роботі з великими сценами;
SketchUp	- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє швидко навчитися працювати; - придатний для швидкого створення архітектурних проєктів і креслень; - підтримка великої бібліотеки готових моделей (3D Warehouse); - легка інтеграція з плагінами для візуалізації та рендерингу.	- обмежені можливості для детального моделювання складних об'єктів; - не підходить для роботи з дуже великими та складними проєктами; - для досягнення фотореалістичної візуалізації необхідно використовувати додаткові рендеринг-двигуни.

3ds Max, будучи потужним інструментом, найкраще підходить для тих, хто працює в галузі архітектури, дизайну інтер'єрів, створення відеоігор та анімації. Він дозволяє створювати високоякісні рендери та моделі, але його вартість та складність у вивченні можуть бути перешкодою для початківців.

SketchUp є найпростішим у використанні серед трьох програм і найкраще підходить для архітекторів та дизайнерів, які шукають простий інструмент для швидкого створення ескізів та креслень. Його обмежена функціональність для складного моделювання компенсується можливістю легкого інтегрування з іншими програмами для рендерингу.

Вибір програмного забезпечення для 3D-моделювання залежить від конкретних потреб користувача. Blender – це універсальний та потужний інструмент для тих, хто шукає безкоштовну та багатофункціональну платформу. 3ds Max пропонує професійний інструментарій для складних проєктів, але його вартість та складність роблять його менш доступним для новачків. SketchUp є ідеальним вибором для тих, хто хоче швидко створювати архітектурні проєкти з мінімальними зусиллями.

1.4 Висновки до розділу

У першому розділі розглянуто теоретичні основи тривимірного моделювання та візуалізації приміщень, а також історичний розвиток цієї технології. Тривимірне моделювання, що охоплює широкий спектр застосувань від архітектури до кінематографії, стало можливим завдяки ряду важливих наукових досягнень, починаючи з 1960-х років. Основні етапи розвитку 3D-моделювання включають:

- появу перших методів комп'ютерної графіки та основних алгоритмів, що стали базою для подальшого розвитку тривимірної графіки;

- активний розвиток тривимірних алгоритмів та програмного забезпечення в 1970-1980-х роках, що ознаменувало комерційне використання 3D-технологій у кіноіндустрії;

- еру персональних комп'ютерів у 1990-х роках, коли 3D-моделювання стало доступним для широкої аудиторії завдяки розробці потужних програм, таких як 3ds Max та Maya;

- виникнення нових технологій у 2000-х роках, включаючи віртуальну реальність, штучний інтелект та трасування променів у реальному часі, які істотно розширили можливості тривимірного моделювання.

Основні принципи візуалізації приміщень були розглянуті, підкреслюючи важливість використання різних алгоритмів для досягнення реалістичності. Зокрема, полігональне та сплайнове моделювання, а також булеві операції стали основою для створення точних і детальних моделей.

Огляд сучасного програмного забезпечення для тривимірного моделювання, такого як Blender, 3ds Max і SketchUp, показує різноманітність інструментів, доступних для користувачів, кожен з яких має свої переваги та недоліки, що дозволяє вибрати оптимальний варіант залежно від конкретних потреб.

Таким чином, тривимірне моделювання є динамічною та швидко розвиваючою галуззю, яка продовжує еволюціонувати, впливаючи на різні сфери діяльності, включаючи архітектуру, дизайн, розваги та науку.

2 АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ПРИМІЩЕНЬ

2.1 Методи побудови геометричних моделей приміщень

У процесі моделювання тривимірних приміщень дуже важливо правильно підібрати методи та інструменти, які дозволяють відтворити всі архітектурні деталі та особливості. Від вибору методів побудови моделей залежить як точність, так і реалістичність кінцевого результату. У цьому підрозділі розглядаються основні підходи до створення тривимірних моделей приміщень, включаючи роботу з прямокутними та багатокутними приміщеннями, використання сплайнів для складних форм і відповідність моделей архітектурним вимогам.

Прямокутні приміщення є найбільш поширеним типом архітектурних об'єктів. Це можуть бути кімнати, офіси, коридори та інші споруди, де стіни переважно мають прямокутну форму. Створення таких приміщень у 3D-середовищі є базовим завданням для моделювальника. Існує кілька основних методів, які дозволяють швидко і точно змодельовати прямокутні приміщення:

Полігональне моделювання, що зображено на рисунку 2.1, є найпростішим і найчастіше використовуваним методом для створення приміщень з прямими стінами [31]. В основі полігонального моделювання лежать багатоугольники (полігони), які об'єднуються для створення складних геометричних форм. Зазвичай для моделювання приміщень використовуються чотирикутні полігони, які формують стіни, підлогу та стелю.

Модель приміщення будується шляхом послідовного створення основних елементів: підлоги, стін та стелі. Для кожного з цих елементів моделювальник визначає форму полігонів, їх розміри та відносне положення один до одного [32].

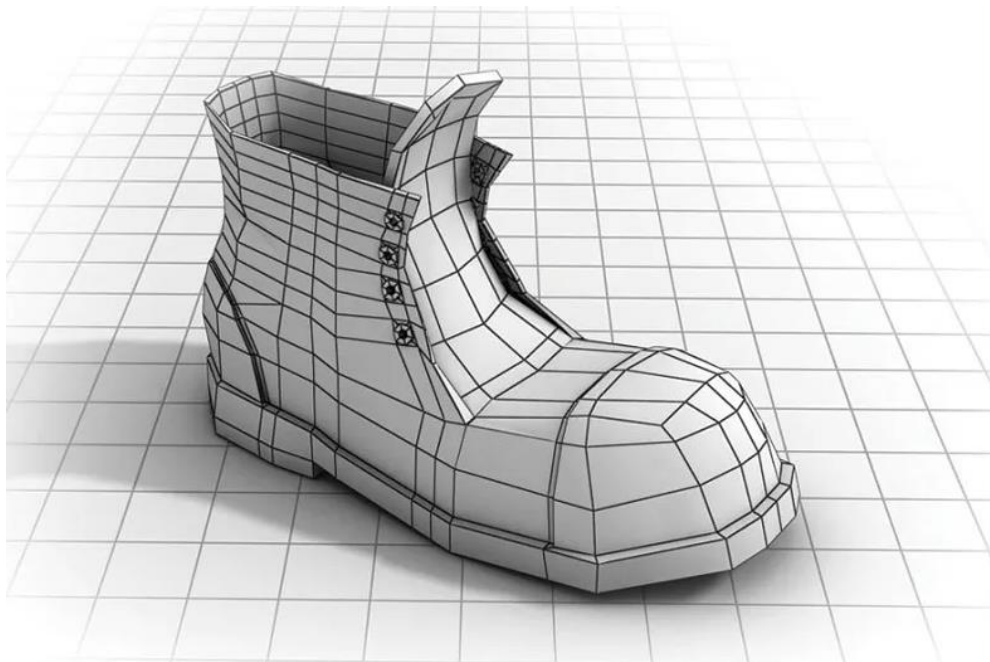


Рисунок 2.1 – Полігональне моделювання

Вох-моделювання є окремим підходом у полігональному моделюванні, коли початкова форма (зазвичай прямокутний паралелепіпед або куб) деталізується шляхом поділу на окремі частини. Цей метод особливо корисний для створення приміщень прямокутної форми, де відразу задається базова геометрія, яка потім уточнюється додаванням вікон, дверей, арок тощо.

Процес Вох-моделювання полягає в тому, щоб почати з базової геометричної фігури (прямокутника або куба) та модифікувати її шляхом розділення на менші частини, витягування або видалення частин об'єкта [33]. Таким чином можна легко створювати складніші приміщення з різними архітектурними особливостями.

Boolean-операції є корисним інструментом при моделюванні складних об'єктів, зокрема приміщень з багатокутними стінами або отворами для вікон та дверей. Boolean-операції дозволяють об'єднувати дві або більше геометричні форми в одну, або вирізати одну форму з іншої. Це особливо корисно для моделювання прямокутних приміщень, коли необхідно вирізати отвори для дверей чи вікон у стінах.

Boolean-операції працюють з такими базовими командами, як об'єднання об'єктів (Union), віднімання об'єкта з іншого (Subtract) або знаходження перетину між двома об'єктами (Intersect). Наприклад, можна змодельовати стіну як суцільний блок, а потім за допомогою Boolean-операції вирізати отвори для вікон і дверей, використовуючи спеціальні об'єкти, що відповідають цим елементам.

Хоча прямокутні приміщення є найпоширенішими, архітектурні проєкти часто включають приміщення з більш складними формами, такими як багатокутні кімнати, арки, круглі стіни або купольні стелі. Для моделювання таких елементів часто використовують сплайни та криві поверхні, що дозволяє створювати гладкі форми та геометрично складні структури.

Сплайни – це криві лінії (рисунок 2.2), які використовуються для створення складних форм у тривимірному просторі [34]. Сплайни є дуже корисними для моделювання криволінійних стін, арок, віконних прорізів і декоративних елементів.

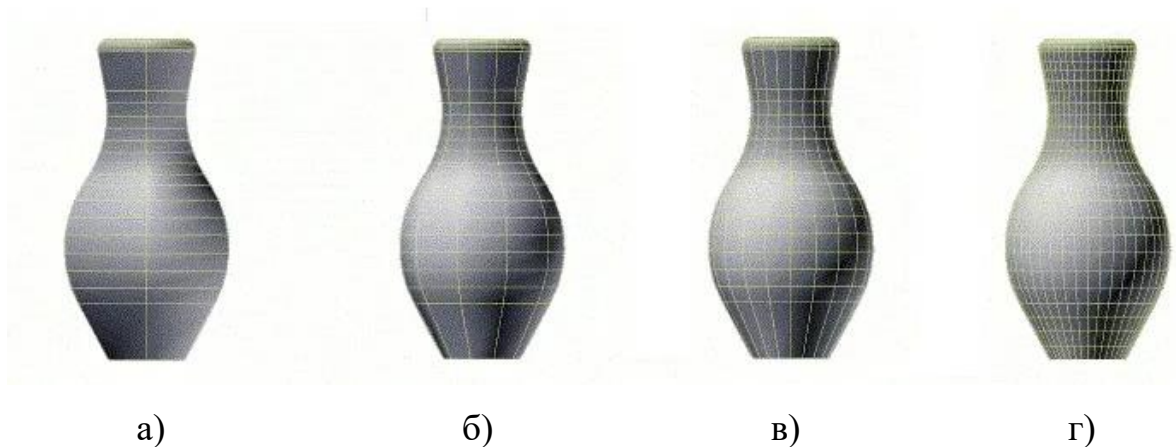


Рисунок 2.2 – Сплайнове моделювання (а) у порівнянні з полігональним моделюванням (б, в, г)

Використовуючи сплайнові криві, моделювальники можуть легко створювати складніші форми, ніж це можливо при використанні полігонів. Наприклад, для створення арки достатньо створити сплайн у формі півкола, а потім витягнути його вздовж однієї з осей для створення тривимірної форми.

NURBS-модельювання (Non-Uniform Rational B-Splines) – це більш складна форма сплайнового моделювання, яка дозволяє створювати дуже точні та гладкі криволінійні поверхні [35]. NURBS-моделі використовуються для створення складних органічних форм та поверхонь з високою точністю. Ця технологія є особливо корисною при моделюванні архітектурних елементів, таких як колони, куполи або криволінійні стіни (рисунок 2.3).

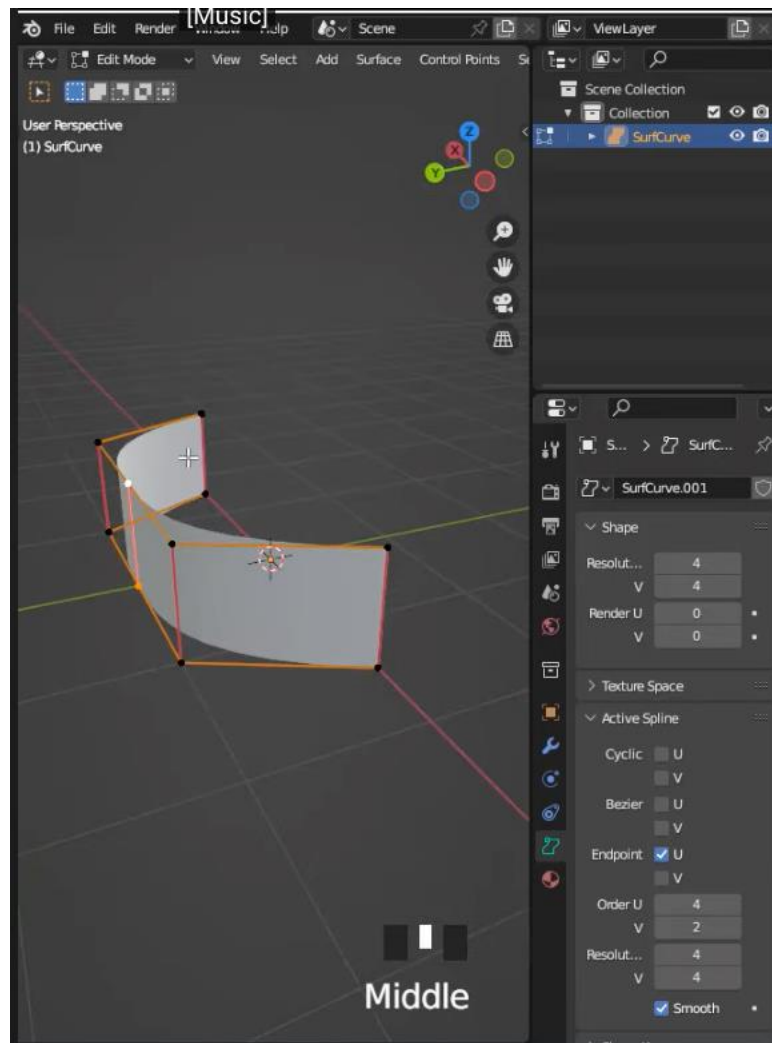


Рисунок 2.3 – NURBS-модельювання

У NURBS-модельюванні використовуються математичні криві, що забезпечують безперервність і гладкість поверхні. Це дозволяє досягти високого рівня деталізації навіть для складних форм. Наприклад, при моделюванні купольної стелі, NURBS дозволяє відтворити точні контури поверхні без зайвого ускладнення геометрії.

Для створення криволінійних елементів або гладких поверхонь також використовується метод поверхневого моделювання. Цей підхід дозволяє створювати складні геометричні форми за допомогою двовимірних кривих, які потім перетворюються на тривимірні поверхні. Такий підхід особливо корисний для моделювання архітектурних елементів з вигнутими або хвилястими поверхнями.

Поверхневі моделі можуть бути використані для створення декоративних елементів, таких як балюстради, колони, арки, склепіння або навіть для створення інтер'єрних елементів, таких як меблі або предмети інтер'єру з плавними лініями.

Одним з ключових аспектів побудови тривимірних моделей приміщень є відповідність архітектурним вимогам. Реалістичне відтворення приміщення вимагає врахування не лише геометричних форм, але й архітектурних стандартів, таких як пропорції, масштаби, розміщення вікон, дверей, товщина стін, висота стелі тощо.

Важливою вимогою при створенні тривимірних моделей приміщень є дотримання точних пропорцій та масштабу. Це особливо важливо, коли модель використовується для архітектурних або інженерних проектів, де точність має велике значення.

Для цього моделювальник використовує реальні креслення та плани приміщення. Ці плани імпортуються у тривимірне середовище як двовимірні референси, які допомагають моделювати об'єкти з точною відповідністю до фізичних розмірів.

У процесі моделювання також необхідно враховувати архітектурні стандарти, такі як мінімальна висота стелі, ширина дверних прорізів, розміщення елементів інтер'єру та інші технічні вимоги, які можуть залежати від конкретних нормативів у будівництві.

Наприклад, для моделювання житлового приміщення у відповідності до будівельних стандартів, моделювальник повинен враховувати мінімальну висоту

стелі (зазвичай не менше 2,5 метрів), товщину стін та допустимі розміри дверних і віконних прорізів.

При створенні моделей приміщень також важливо правильно розміщувати всі елементи відносно один одного. Це включає точне вирівнювання стін, дверей, вікон, а також інших архітектурних елементів. Для цього використовуються інструменти, які дозволяють вимірювати відстані між об'єктами, встановлювати обмеження та керувати вирівнюванням елементів.

Часто моделі приміщень створюються як частина більшого проекту, тому важливо, щоб моделі могли інтегруватися з іншими програмними продуктами. Наприклад, при моделюванні архітектурних об'єктів тривимірні моделі можуть бути імпортовані в системи архітектурного проектування, такі як AutoCAD або Revit, для подальшого використання в архітектурному або будівельному проекті.

Методи побудови геометричних моделей приміщень охоплюють різні підходи, включаючи полігональне моделювання, Boolean-операції, сплайнове та NURBS-моделювання. Вибір методу залежить від конкретного типу приміщення та вимог до його моделювання. Важливим аспектом також є відповідність моделі архітектурним стандартам і вимогам, які забезпечують точність та реалістичність візуалізації. Завдяки поєднанню різних методів моделювання можна створювати складні та деталізовані моделі приміщень, які відображають всі особливості архітектури та інтер'єру.

2.2. Алгоритми оптимізації геометричних моделей приміщень

Оптимізація тривимірних моделей є важливим аспектом у процесі їхнього створення, особливо коли йдеться про великі проекти або проекти, що вимагають реального часу рендерингу (наприклад, у відеоіграх або віртуальній реальності). Основна мета оптимізації – забезпечити баланс між якістю візуалізації та продуктивністю, тобто зменшити навантаження на комп'ютерну систему без

значних втрат у якості зображення. У цьому підрозділі ми розглянемо кілька ключових алгоритмів, які використовуються для оптимізації тривимірних моделей приміщень: зменшення кількості полігонів, використання технології Level of Detail (LOD) та баланс між якістю та швидкістю візуалізації [36].

Одним із найважливіших методів оптимізації геометричних моделей є зменшення кількості полігонів (polygon reduction) – процес, при якому кількість полігонів у моделі зменшується, щоб знизити навантаження на систему, але при цьому зберігається візуальна якість моделі. Велика кількість полігонів у моделі може значно уповільнити рендеринг або навіть зробити неможливою її обробку на слабких пристроях.

Одним із найпоширеніших методів зменшення кількості полігонів є декапітація (або редукція полігонів) [37]. Цей процес полягає в тому, що з моделі видаляються зайві полігони або об'єднуються кілька полігонів в один, щоб знизити загальну складність моделі без втрати її загальної форми. Програми для 3D-моделювання, такі як Blender та 3ds Max, мають спеціальні інструменти для автоматичної декапітації, які аналізують модель і видаляють непотрібні полігони.

Алгоритм декапітації зазвичай фокусується на зонах моделі, де деталі менш помітні для користувача або де висока щільність полігонів не додає значної інформації. Наприклад, на рівних площинах або у віддалених частинах моделі можна зменшити кількість полігонів без помітної втрати якості. Однак, у більш деталізованих зонах, таких як краї або вигини, алгоритми декапітації зазвичай зберігають більше полігонів.

Ретопологія є іншим ефективним методом для оптимізації моделей, особливо коли йдеться про складні або органічні форми [38]. Цей метод полягає у створенні нової сітки з меншою кількістю полігонів поверх оригінальної моделі. Нову сітку можна вручну або автоматично підлаштовувати під форму старої моделі, що дозволяє зберегти основні деталі та форми, але з набагато меншою кількістю полігонів.

Ретопологія використовується, коли важливо зберегти максимальну якість при мінімальній кількості полігонів. Наприклад, цей метод може бути корисним для зменшення складності моделей меблів або інших інтер'єрних об'єктів, зберігаючи при цьому точність їхньої форми.

Ще одним ефективним методом зменшення кількості полігонів без втрати якості є використання карти нормалей (Normal Maps) та карти нерівностей (Bump Maps) [39]. Ці карти дозволяють симулювати деталі на поверхні об'єкта без необхідності створення додаткових полігонів. Наприклад, замість того, щоб моделювати кожен дрібний елемент текстури стіни або меблів (такі як цеглини або тканинні візерунки), можна використовувати Normal Maps, щоб створити ілюзію складної поверхні.

Normal Maps дозволяють значно зменшити кількість полігонів, оскільки реальні деталі моделі замінюються текстурою, яка дає враження наявності цих деталей за рахунок правильного освітлення та відбивання світла. Це робить моделі набагато простішими, не втрачаючи при цьому візуальної реалістичності.

Технологія Level of Detail (LOD) є одним з основних методів оптимізації тривимірних моделей у випадках, коли модель відображається на різних відстанях від камери. Суть LOD полягає в тому, що модель автоматично підлаштовується до тієї кількості полігонів, яка потрібна для відображення в певний момент часу залежно від відстані до камери. Це дозволяє знизити кількість полігонів у сцені, що рендериться, і, таким чином, підвищити продуктивність.

Технологія LOD базується на тому, що для кожної моделі створюється кілька версій з різною кількістю полігонів. Для близьких відстаней використовується найбільш деталізована версія моделі, яка містить максимальну кількість полігонів. Проте, коли модель віддаляється від камери, автоматично замінюється на менш деталізовану версію з меншою кількістю полігонів.

Рендеринг-система автоматично визначає, на якій відстані знаходиться модель від камери, і підбирає відповідну версію моделі. Якщо модель знаходиться далеко від користувача, деталі стають менш помітними, тому

програма замінює її на версію з меншою кількістю полігонів, що зменшує навантаження на рендеринг. При наближенні до об'єкта використовується більш деталізована версія моделі.

Технологія LOD широко використовується у відеоіграх та інтерактивних додатках, де потрібна висока продуктивність і велика кількість одночасно відображуваних об'єктів. У архітектурній візуалізації LOD також використовується для моделей великих об'єктів або будівель, коли деталі необхідні лише при наближенні камери до об'єкта.

Одним із основних викликів у процесі оптимізації тривимірних моделей є пошук балансу між високою якістю візуалізації та необхідною швидкістю рендерингу. Досягнення цього балансу особливо важливе для проєктів, які вимагають реального часу відображення (наприклад, ігри, віртуальна реальність або інтерактивні архітектурні моделі). Нижче розглянемо основні підходи до досягнення компромісу між якістю та продуктивністю.

Одним з головних факторів, що впливає на продуктивність, є розмір текстур, які використовуються у моделі. Великі текстури з високою роздільною здатністю можуть значно підвищити якість моделі, але одночасно збільшують час рендерингу та навантаження на пам'ять комп'ютера. Щоб досягти компромісу між якістю та продуктивністю, можна використовувати текстури меншого розміру або зменшити їх роздільну здатність, не втрачаючи при цьому важливих деталей.

У багатьох 3D-проєктах використовуються складні матеріали з високою кількістю відображень, прозоростей та інших візуальних ефектів. Ці ефекти можуть суттєво збільшити час рендерингу. Для оптимізації можна використовувати спрощені матеріали або комбіновані шейдери, які дозволяють зменшити кількість обчислень під час рендерингу, зберігаючи при цьому якість візуалізації.

Освітлення є ключовим аспектом для досягнення високоякісної візуалізації, але складні алгоритми освітлення, такі як глобальне освітлення (Global Illumination) або трасування променів (Ray Tracing), можуть бути надто

ресурсомісткими для реального часу [40]. Для оптимізації можна використовувати спрощені методи освітлення, такі як затінення на основі текстур (light baking), коли світло та тіні попередньо розраховуються і записуються у текстури, що значно знижує навантаження на рендеринг-систему.

У деяких випадках можна використовувати фіксовані джерела світла, які не змінюються під час роботи сцени. Це дозволяє зменшити кількість динамічних обчислень під час рендерингу, знижуючи навантаження на систему, зберігаючи при цьому прийнятний рівень якості освітлення.

Для складних сцен можна використовувати проксі-об'єкти, які є спрощеними версіями більш деталізованих об'єктів. Під час рендерингу система використовує проксі-моделі для економії ресурсів, але у фінальному результаті рендерить повністю деталізовані об'єкти.

Ключовим підходом до досягнення компромісу є керування рівнем деталізації кожного елемента сцени. Наприклад, можна збільшити деталізацію тих об'єктів, які знаходяться у фокусі або найближче до камери, і зменшити її для другорядних елементів, які менше впливають на загальне сприйняття сцени.

Оптимізація тривимірних моделей приміщень є критично важливою для досягнення високої продуктивності та якості візуалізації. Використання таких методів, як зменшення кількості полігонів, Level of Detail та баланс між якістю й швидкістю рендерингу, дозволяє досягти необхідного результату без значних втрат у візуальній якості. Ці підходи дають змогу створювати складні сцени, які можуть працювати в реальному часі навіть на обмежених апаратних ресурсах.

2.3. Алгоритми текстурування та освітлення в тривимірних моделях приміщень

Текстурування і освітлення є одними з найважливіших етапів у створенні реалістичних тривимірних моделей. Незалежно від того, наскільки детально і

правильно змодельована геометрія об'єкта, без правильно підібраних текстур та налаштування освітлення модель виглядатиме штучно та неправдоподібно. У цьому підрозділі ми розглянемо основні алгоритми створення реалістичних текстур, прийоми розстановки світла у тривимірних приміщеннях, а також використання технологій глобального освітлення для досягнення реалістичності сцени.

Текстурування – це процес накладання зображень (текстур) на поверхні тривимірних об'єктів для створення візуальної ілюзії різних матеріалів, таких як дерево, метал, камінь або тканина. Без текстур тривимірні моделі виглядають плоскими та позбавленими реалістичних деталей. Тому текстури дозволяють передати матеріальність поверхонь і надають моделі правдоподібний вигляд. Для цього використовуються різні техніки та алгоритми. Алгоритм текстурування має наступні кроки.

Крок 1. Підготовка моделі та створення UV-розгортки, що дозволяє коректно накласти текстуру на поверхню.

Крок 2. Нанесення базової дифузної карти, що визначає основний вигляд та колір поверхні.

Крок 3. Створення та нанесення карти нормалей для симуляції дрібних деталей поверхні без додавання полігонів.

Крок 4. Нанесення карти висот для імітації нерівностей та рельєфу на поверхні.

Крок 5. Додавання карти відблисків (specular map) для визначення областей з блиском та їх інтенсивності.

Крок 6. Використання карти шорсткості для налаштування того, як світло відбивається від поверхні, щоб досягти реалістичного вигляду матеріалу.

На рисунку 3.4 зображена схема алгоритму текстурування.

Перед тим як накласти текстури на модель, необхідно підготувати її UV-розгортку. UV-мапування (UV-mapping) – це процес проєкції двовимірного зображення на тривимірну модель. "U" і "V" – це координати текстури, що представляють площину, на яку розгортається модель.



Рисунок 2.4 – Схема алгоритму текстуровання

Для накладання текстур на тривимірну модель використовується розгортка поверхні моделі у двовимірний простір. У цьому процесі кожна вершина тривимірної моделі має бути пов'язана з відповідною точкою на текстурі. Після створення UV-мапи, модель готова до нанесення текстури, яка точно відповідає формі об'єкта.

Для складних форм об'єктів використовується техніка розгортки, коли модель розрізається на кілька частин (шви) і розгортається у двовимірну площину. Це дозволяє зберегти цілісність текстури при нанесенні її на складні поверхні. Програми для 3D-моделювання, такі як Blender, 3ds Max, мають інструменти для автоматичної або ручної розгортки моделі з мінімізацією спотворень.

Для досягнення реалістичності у тривимірних моделях використовуються не лише базові текстури кольору, але й кілька інших типів карт, які відповідають за різні аспекти взаємодії світла з поверхнею.

Diffuse Map (дифузна карта) – це базова карта текстури, яка визначає колір і основний вигляд поверхні під розсіяним світлом. Вона відповідає за те, як виглядатиме модель у звичайному освітленні.

Normal Map – це спеціальна текстурна карта, яка відповідає за симуляцію дрібних деталей на поверхні об'єкта, таких як нерівності, зморшки, або візерунки, без необхідності додавання додаткових полігонів. Вона змінює напрямки нормалі поверхні об'єкта, що впливає на взаємодію з освітленням і створює ілюзію деталей.

Bump Map – це ще один спосіб симуляції нерівностей на поверхні об'єкта. Хоча Bump Map працює за аналогією з Normal Map, вона використовує простіший алгоритм. Bump Maps застосовуються для менш критичних деталей, оскільки на відміну від Normal Maps вони не змінюють напрямки світла, а лише створюють ілюзію змін на поверхні.

Specular Map контролює, які частини поверхні об'єкта мають відблиски і як сильно вони відбивають світло. Це важливо для матеріалів, які мають блискучі поверхні, такі як метал, скло або поліровані матеріали. Specular Maps дозволяють імітувати різні рівні блиску на різних ділянках поверхні моделі.

Карта шорсткості (Roughness Map) і карта глянцевої (Gloss Map) визначають, наскільки гладкою або шорсткою є поверхня. Від цього залежить, як поверхня буде взаємодіяти зі світлом. Наприклад, на дуже гладкій поверхні світло відбиватиметься, створюючи чіткі відблиски, тоді як на шорсткій поверхні світло буде розсіюватися.

Правильне налаштування освітлення є ключовим елементом для досягнення реалістичності тривимірної сцени. Світло не лише визначає, як виглядатимуть текстури та матеріали, але й створює атмосферу та настрій приміщення. Освітлення відіграє ключову роль у створенні реалістичних тривимірних сцен. Воно визначає, як світло взаємодіє з поверхнею об'єктів, створюючи тіні, відблиски та інші ефекти. Покроковий алгоритм представлений нижче. Схема алгоритму освітлення зображена на рисунку 2.5.

Крок 1. Вибір типів світла (точкове світло, направлене світло, прожектор) для моделі.

Крок 2. Розташування джерел світла у сцені для забезпечення правильного освітлення.

Крок 3. Налаштування інтенсивності світла та його кольору.

Крок 4. Використання технологій глобального освітлення для симуляції відбитого світла від інших об'єктів.

Крок 5. Застосування технології ambient occlusion для додавання глибини у тіні.



Рисунок 2.5 – Схема алгоритму освітлення

Розглянемо детальніше основні типи джерел світла, їх поділяють на: точкове світло, спрямоване світло, прожектор та оточуюче світло.

Точкове світло випромінюється з одного джерела у всі напрямки. Воно часто використовується для симуляції ламп або інших джерел світла, які

знаходяться в центрі приміщення. Точкове світло створює м'які тіні та забезпечує рівномірне освітлення.

Спрямоване світло імітує світло, яке йде з одного напрямку, наприклад, світло від сонця. Таке джерело світла випромінюється паралельними променями та часто використовується для симуляції денного освітлення або природних джерел світла.

Прожектор випромінює світло у вигляді конуса з чітко окресленим кутом. Його використовують для створення акцентованого освітлення на певній частині сцени або об'єкті. Прожектори широко застосовуються для симуляції штучного освітлення, наприклад, ліхтарів або сценічних світильників.

Оточуюче світло є рівномірним джерелом освітлення, яке не має конкретного напрямку. Воно імітує розсіяне світло, яке присутнє у реальному світі, навіть якщо немає прямого джерела світла. Оточуюче світло допомагає заповнити темні кути та забезпечити загальне освітлення сцени.

Техніки розстановки світла поділяють на триточкове освітлення, освітлення з глобальним відбиттям та Light Baking.

Триточкове освітлення – це класична техніка освітлення, яка використовує три джерела світла: ключове світло (Key Light), заповнююче світло (Fill Light) та контурне світло (Back Light). Ключове світло – це основне джерело, яке створює основні тіні та підсвічує об'єкт. Заповнююче світло м'яко заповнює тіні, створені ключовим світлом, а контурне світло підсвічує об'єкт ззаду, відокремлюючи його від фону.

Освітлення з глобальним відбиттям – ця техніка використовує відбиття світла від стін, підлоги та інших поверхонь для більш природного та м'якого освітлення сцени. Це імітує реальні фізичні властивості світла, коли воно відбивається від поверхонь і взаємодіє з оточенням.

Для сцен, де важливо зберегти продуктивність, використовується техніка Light Baking. Це процес попереднього розрахунку світла та тіней, які потім зберігаються у текстурах об'єктів. Це дозволяє значно знизити навантаження на

систему під час рендерингу, оскільки система не повинна обчислювати освітлення в реальному часі.

Однією з найбільш важливих технологій для створення реалістичних тривимірних сцен є глобальне освітлення (Global Illumination, GI). Це метод, який враховує взаємодію світла не тільки між джерелом світла та об'єктом, але й між різними поверхнями сцени. Тобто, світло, що відбивається від однієї поверхні, може освітлювати інші об'єкти в сцені.

Принципи роботи глобального освітлення при прямому та непрямому освітленні. Пряме освітлення – це світло, яке потрапляє безпосередньо від джерела на об'єкт. Непряме освітлення – це світло, яке відбивається від інших об'єктів і потрапляє на об'єкт після одного або кількох відбиттів. Глобальне освітлення об'єднує ці два компоненти, що створює більш реалістичну взаємодію світла в сцені.

Алгоритми Global Illumination – основні алгоритми глобального освітлення, які включають радіосіті (Radiosity) та трасування фотонів (Photon Mapping) [59]. Радіосіті моделює розповсюдження світла в замкнутій сцені, зокрема у приміщеннях, тоді як трасування фотонів симулює розсіювання фотонів від джерела світла до поверхонь сцени.

Трасування променів (Ray Tracing) – цей метод використовується для симуляції реалістичної взаємодії світла з об'єктами у сцені. Він відстежує траєкторію кожного променя світла від джерела через сцену і враховує його відбивання, заломлення та поглинання поверхнями. Трасування променів дозволяє створювати фотореалістичні зображення, однак вимагає значних ресурсів для рендерингу.

Path Tracing є вдосконаленим методом трасування променів, який використовує випадкові траєкторії променів для симуляції складних взаємодій світла. Цей метод забезпечує ще більш реалістичне освітлення та тіні, однак є ще більш вимогливим до обчислювальних ресурсів.

До переваг глобального освітлення відносять:

- реалістичне відображення світла;

- природність тіней та відблисків.

Глобальне освітлення дозволяє досягти набагато реалістичнішого освітлення сцени, оскільки враховує відбиття світла від різних поверхонь. Це створює ефект розсіяного світла та природніших тіней, що важливо для архітектурної візуалізації та симуляції реальних приміщень.

Завдяки глобальному освітленню тіні стають м'якшими та більш природними, а відблиски виглядають реалістично, відображаючи складні взаємодії світла з поверхнями.

Текстурування і освітлення є основними елементами, що визначають візуальну реалістичність тривимірних моделей. Алгоритми створення реалістичних текстур, такі як UV-мапування, використання Normal і Specular Maps, дозволяють створювати детальні та матеріально виразні поверхні об'єктів. Освітлення, зокрема через використання технологій глобального освітлення, значно покращує взаємодію між світлом і матеріалами, створюючи правдоподібні сцени. Завдяки комбінуванню цих технологій можна досягати фотореалістичної візуалізації тривимірних моделей приміщень.

На основі наведених алгоритмів розроблено новий алгоритм адаптивного текстурування та освітлення, що передбачає динамічне налаштування текстур і освітлення залежно від умов сцени і характеристик об'єкта. Цей підхід дозволяє створювати більш реалістичні моделі та сцени, які адаптуються до різних зовнішніх факторів, таких як зміна кута огляду, рівня деталізації або умов освітлення.

Основна ідея полягає в тому, щоб застосовувати різні рівні деталізації та налаштування текстур і освітлення на основі характеристик моделі та умов, в яких вона відображається. Наприклад, для віддалених об'єктів використовуються спрощені текстури і базове освітлення, тоді як для об'єктів крупним планом застосовуються текстури високої деталізації і складніші налаштування освітлення.

Покроковий алгоритм адаптивного текстурування та освітлення наведено нижче.

Крок 1. Підготовка тривимірної моделі та створення UV-розгортки для основного нанесення текстури.

Крок 2. Розробка кількох рівнів деталізації (LOD, Level of Detail) для текстур. Використання текстури високої роздільної здатності для об'єктів крупним планом і зменшені текстури для віддалених об'єктів.

Крок 3. Створення карти нормалей і висот для текстур високої деталізації та спрощення карти для текстур нижчого рівня деталізації.

Крок 4. Налаштування методу автоматичного перемикавання між різними рівнями деталізації текстур залежно від відстані до камери та роздільної здатності екрана.

Крок 5. Вибір адаптивного освітлення, яке змінює інтенсивність і тип світла залежно від позиції камери та умов сцени (наприклад, освітлення вдень і вночі).

Крок 6. Розташування джерела світла динамічно залежно від положення об'єкта і зміни точки огляду камери, щоб забезпечити реалістичність відблисків та тіней.

Крок 7. Застосування глобального освітлення та технології ambient occlusion для забезпечення реалістичної взаємодії світла з об'єктами у сцені, адаптуючи його інтенсивність та кут падіння відповідно до відстані між об'єктами та джерелом світла.

Крок 8. Використання динамічного налаштування карт шорсткості та глянцевої. Для об'єктів ближнього плану – детальні карти, а для віддалених – спрощені карти з меншою кількістю деталей.

Крок 9. Реалізація методу обчислення тіней з адаптацією якості залежно від розташування камери. При крупному плані використовуються тіні високої деталізації, при віддаленому плані – спрощені тіні для економії обчислювальних ресурсів.

Крок 10. Перевірка і оптимізація роботи алгоритму на різних сценах, щоб переконатися, що адаптація текстуровання і освітлення відбувається без втрати продуктивності і якості зображення.

Схема адаптивного алгоритму наведена на рисунку 2.6

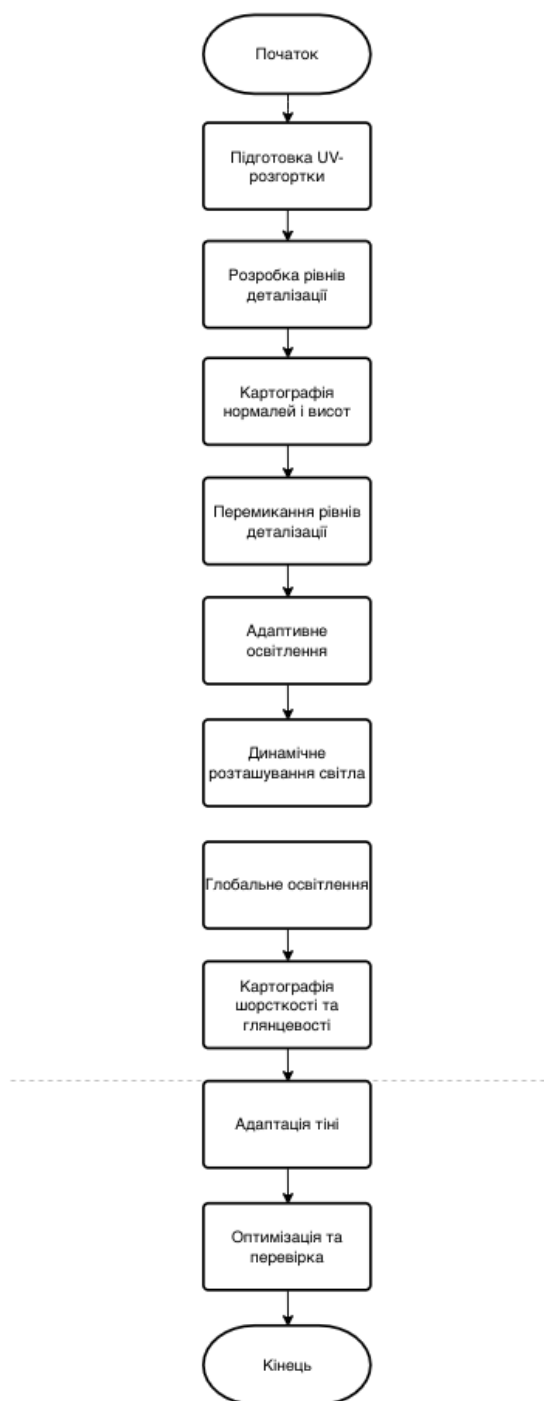


Рисунок 2.6 – Схема алгоритму адаптивного текстуровання та освітлення

Цей алгоритм забезпечує ефективну адаптацію текстуровання та освітлення в реальному часі, дозволяючи зберігати баланс між реалістичністю та продуктивністю в тривимірних сценах.

2.4 Висновки до розділу

У другому розділі були розглянуті основні алгоритми побудови, оптимізації, текстурювання та освітлення тривимірних моделей приміщень. Процес моделювання є складним і вимагає точного підбору методів для досягнення максимальної реалістичності і точності. Основні аспекти, які було висвітлено, включають:

- різноманітність методів побудови геометричних моделей приміщень, серед яких полігональне моделювання, Vox-моделювання, Boolean-операції та сплайнове моделювання. Кожен з цих методів має свої особливості, що дозволяє досягати різних архітектурних форм і деталей;

- значення NURBS-моделювання та поверхневого моделювання для створення гладких і складних форм, таких як арки та куполи, що є важливими елементами в архітектурних проектах;

- актуальність архітектурних стандартів і вимог при моделюванні. Дотримання точних пропорцій і масштабів є критично важливим для реалістичності створених моделей, особливо у контексті архітектурних та інженерних проектів;

- основні алгоритми оптимізації моделей, зокрема зменшення кількості полігонів, ретопологія та використання карт нормалей, які допомагають зберегти візуальну якість при зменшенні навантаження на систему. Застосування технології Level of Detail (LOD) дозволяє оптимізувати продуктивність при рендерингу, зберігаючи високу якість візуалізації;

- роль текстурювання та освітлення в досягненні реалістичності тривимірних моделей. Використання UV-мапування та різних типів карт (Normal, Specular, Bump) допомагає відтворити матеріальність об'єктів, а налаштування освітлення за допомогою глобального освітлення (Global Illumination) забезпечує природність тіней та відблисків.

Завдяки поєднанню цих методів і технологій стає можливим створення високоякісних, деталізованих тривимірних моделей приміщень, що відповідають вимогам сучасних архітектурних проектів. Високий рівень реалістичності досягається не лише через детальне моделювання, але й завдяки уважному підбору текстур і налаштувань освітлення, що робить тривимірні моделі придатними для використання в різних галузях, від архітектури до відеоігор та віртуальної реальності.

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ТРИВИМІРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ

3.1. Побудова базової геометрії приміщення в Blender

Розглянемо використання алгоритмів тривимірної візуалізації на прикладі створення базової геометрії спальні в Blender. Blender є одним із найбільш популярних та потужних інструментів для тривимірного моделювання з відкритим вихідним кодом. Однією з його основних переваг є доступність, адже програмне забезпечення є безкоштовним, що робить його ідеальним вибором як для новачків, так і для професіоналів. Blender підтримує широкий спектр функцій, включаючи полігональне та сплайнове моделювання, Boolean-операції, текстурювання, рендеринг та освітлення, що дозволяє створювати реалістичні й детальні моделі приміщень. Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, потужним інструментам моделювання та підтримці великої спільноти з численними навчальними матеріалами, Blender є оптимальним вибором для створення складних архітектурних моделей, таких як інтер'єр спальні.

Перший крок у створенні моделі спальні в Blender – це підготовка робочого середовища. Це включає налаштування проєкту, вибір одиниць виміру, таких як метри або сантиметри, та підготовку робочого простору. Налаштування масштабу є важливим для того, щоб усі об'єкти в моделі відповідали реальним розмірам і пропорціям. Це забезпечує правильне співвідношення між елементами інтер'єру.

Створення базової форми приміщення є важливим етапом (рисунок 3.1). У Blender для цього використовуються базові об'єкти, такі як куби, які масштабують до необхідних розмірів. Для побудови стін застосовують модифікатор Extrude, що дозволяє витягувати поверхні для створення об'ємних форм. Створення підлоги та стелі досягається шляхом копіювання та модифікації наявних геометричних об'єктів.

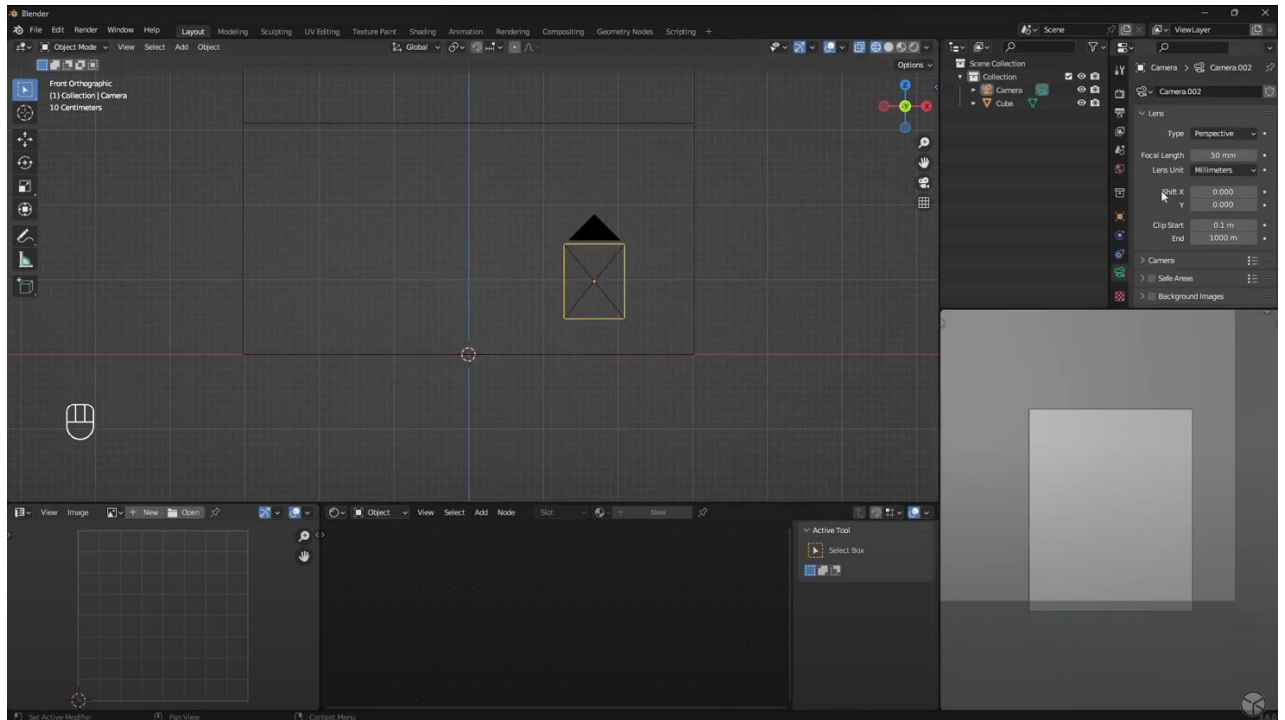


Рисунок 3.1 – Створення базової форми приміщення в середовищі Blender

Для створення отворів для вікон та дверей (рисунок 3.2) використовуються Boolean-операції, що є ефективним способом вирізання точних отворів у стінах. Створюються додаткові об'єкти, що мають форму необхідних отворів, які розташовуються у відповідних місцях стін. Застосування модифікатора Boolean з опцією Subtract дозволяє швидко й точно вирізати ці об'єкти зі стін, створюючи необхідні отвори.

Після створення основної форми приміщення слід налаштувати параметри стін, підлоги та стелі. Це включає встановлення товщини стін, висоти стелі та загальних розмірів приміщення. Blender дозволяє використовувати числові параметри для точного встановлення розмірів, що забезпечує відповідність моделі кресленням та планам приміщення.

Додатково до основної геометрії додаються елементи, такі як плінтуси, лиштви навколо вікон та дверей, а також інші архітектурні деталі. Для цього використовуються інструменти моделювання, зокрема Bevel, що допомагає створювати гладкі краї, та Array, який полегшує дублювання елементів уздовж стін. Ці деталі роблять модель більш реалістичною та правдоподібною.

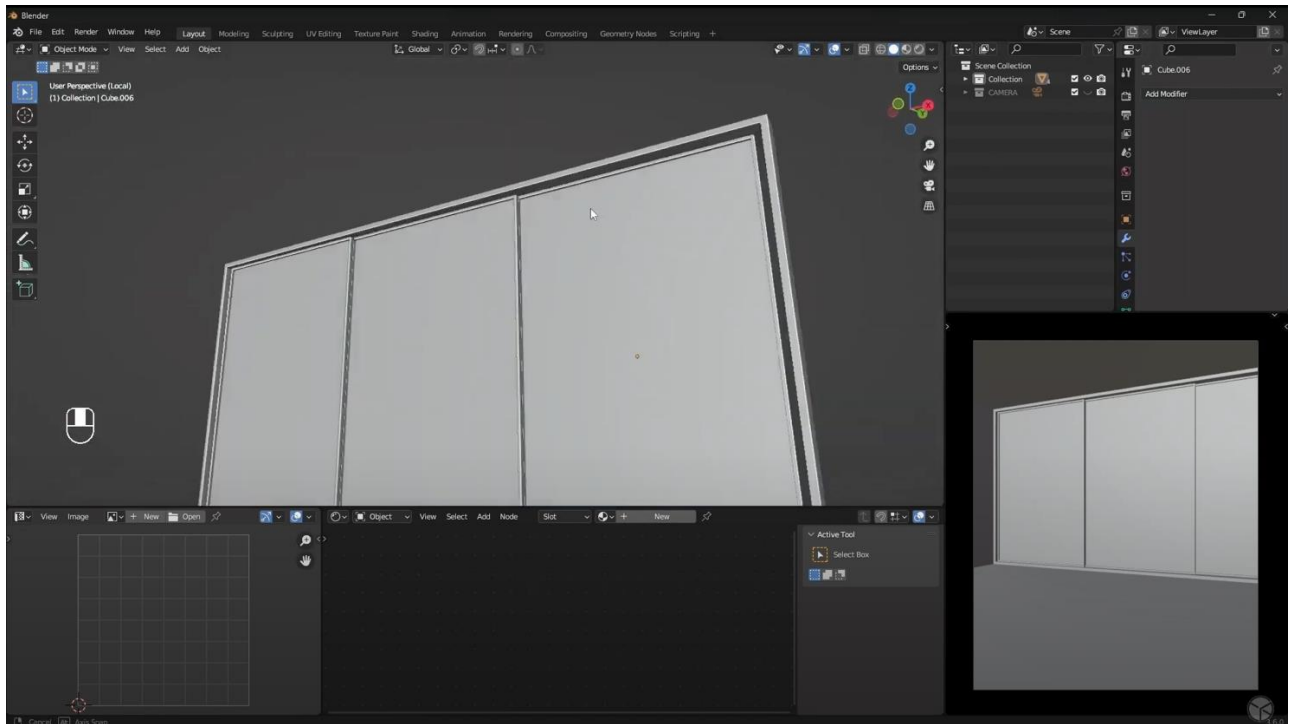


Рисунок 3.2 – Створення отворів для вікон та дверей

Якщо спальня має складні елементи, такі як підвісні стелі або декоративні балки, вони створюються за допомогою додаткових інструментів моделювання та модифікаторів. Модифікатор Solidify додає товщину об'єктам, а Mirror допомагає створювати симетричні елементи. Сплайнове моделювання дозволяє створювати криволінійні форми, такі як арки чи складні об'ємні елементи стелі.

Важливим аспектом для забезпечення точності є імпорт креслень або референсів. Blender дозволяє імпортувати зображення креслень, які можна використовувати як підкладки для звірки розмірів та пропорцій об'єктів. Це значно підвищує точність моделювання, забезпечуючи відповідність моделі технічному завданню та реальним розмірам приміщення.

Після створення базової геометрії моделі переходять до редагування в режимі Edit Mode, де можна коригувати розташування вершин та граней для досягнення необхідної точності. Використання інструментів, таких як Knife для створення додаткових розрізів, дозволяє моделювати складні форми та вносити зміни до існуючої геометрії.

Додаткові кімнатні елементи, такі як ніші, виступи або вбудовані полиці, також додаються на цьому етапі. Це можна зробити за допомогою інструментів Extrude для витягування елементів із поверхонь або Boolean для вирізання. Наприклад, для створення ніші в стіні можна створити окремий об'єкт потрібної форми та вирізати його зі стіни за допомогою Boolean-операції.

Після завершення побудови базової геометрії важливо перевірити модель на відповідність архітектурним стандартам та вимогам. Це включає звірку розмірів приміщення, висоти стель та розмірів дверних і віконних отворів із кресленнями або технічним завданням. Blender має інструменти для вимірювання відстаней між вершинами, що полегшує процес перевірки точності.

Використання Blender для створення базової геометрії має значні переваги. Програма забезпечує високу гнучкість у моделюванні завдяки інструментам та модифікаторам, які спрощують роботу навіть із найскладнішими моделями. Доступність великої кількості плагінів та скриптів дозволяє автоматизувати певні процеси, такі як створення дверей і вікон, що пришвидшує процес моделювання.

Blender дозволяє створювати реалістичні моделі без значного навантаження на систему завдяки методам оптимізації. Наприклад, модифікатор Decimate дозволяє зменшити кількість полігонів у моделі без втрати якості, що робить її придатною для використання у віртуальних турах та архітектурних візуалізаціях.

Таким чином, створення базової геометрії приміщення в Blender є основоположним етапом, який закладає фундамент для подальшого процесу деталізації, текстуровання та освітлення. Завдяки потужним інструментам і можливостям, Blender забезпечує створення високоякісних моделей, які відповідають сучасним архітектурним стандартам і вимогам замовників.

3.2. Додавання меблів та деталей інтер'єру

Додавання меблів та деталей інтер'єру є важливим етапом у створенні реалістичної моделі спальні в Blender. Меблі та елементи декору допомагають створити атмосферу приміщення та надають йому завершеності. Для розгляду процесу моделювання візьмемо як приклад інтер'єр із двоспальним ліжком, журнальним столиком зліва від нього, трьома підвішеними лампами над столиком та численними вазонами. На ліжку розташовані дві подушки розміром 50х70 см, дві декоративні подушки та плед (рисунок 3.3).

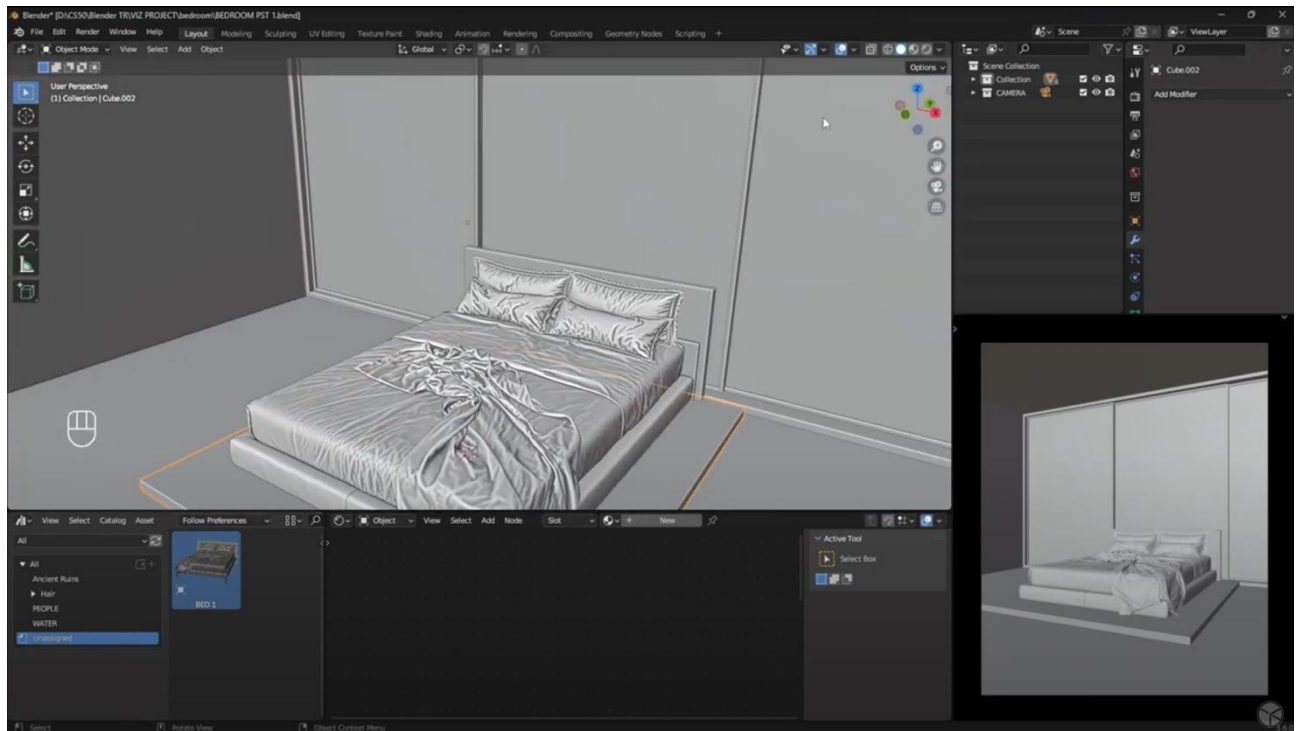


Рисунок 3.3 – Модель ліжка та деталей інтер'єру

Спочатку розглянемо створення ліжка. Оскільки ліжко є двоспальним і стоїть без ніжок, його основа моделюється за допомогою простого куба, який масштабують відповідно до розмірів ліжка. Використання інструментів Extrude і Bevel допомагає додати закруглені краї та зробити основу ліжка більш реалістичною. Далі моделюються подушки. Для створення подушок

використовуються модифікатори Subdivision Surface, які допомагають згладити форму та надати їй м'яких обрисів. Подушки розміром 50x70 см розташовуються по обидва боки ліжка, а дві декоративні подушки створюються меншого розміру та мають різну форму, щоб додати різноманітності інтер'єру.

Плед на ліжку додається за допомогою використання модифікатора Cloth. Спочатку створюється проста плоска сітка, яка має форму прямокутника і розташовується над ліжком. Потім застосовується модифікатор Cloth із налаштуваннями, що імітують тканину. Під впливом гравітації та сили зіткнення з поверхнею ліжка сітка набуває природних складок, що робить плед реалістичним. Для додаткової деталізації модифікатор Subdivision Surface допомагає згладити поверхню та зробити її більш м'якою.

Наступним кроком є моделювання журнального столика, який розташовується зліва від ліжка (рисунки 3.4).

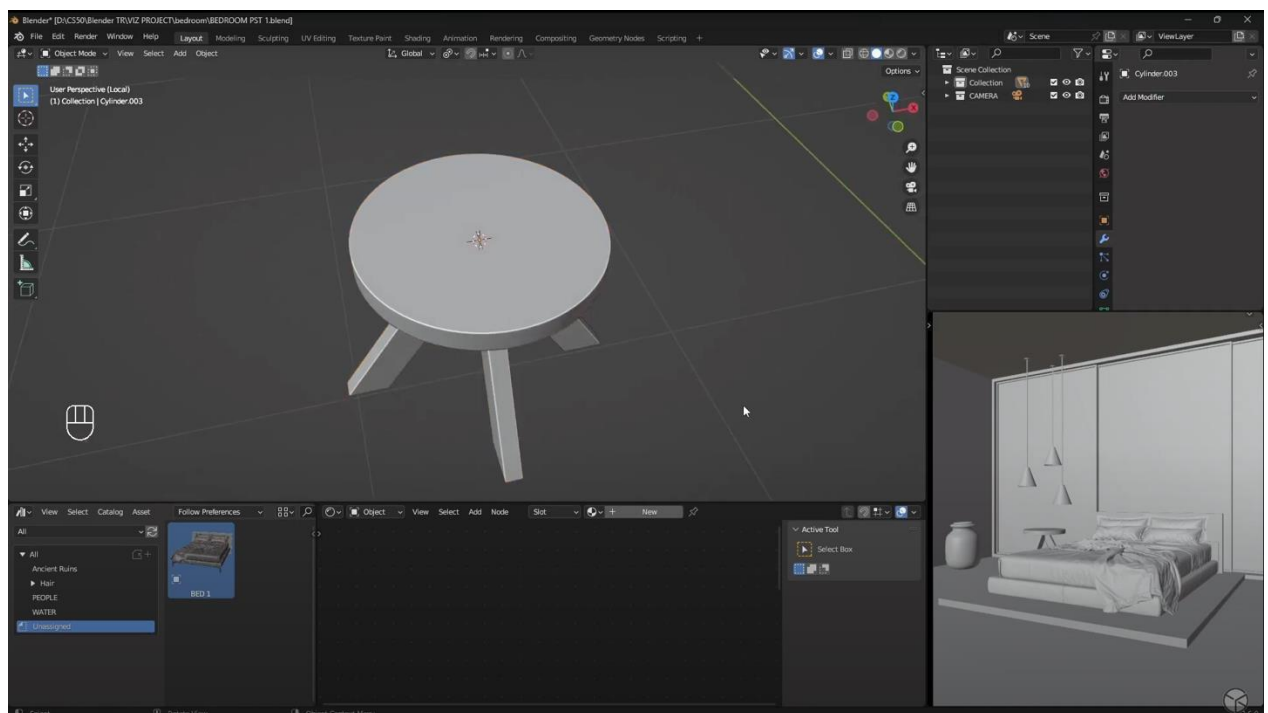


Рисунок 3.4 – Моделювання журнального столика

Для створення столика використовується базова форма, наприклад, куб або циліндр, який потім змінюється відповідно до бажаних пропорцій. Додаткові деталі, такі як крайки, створюються за допомогою модифікатора Bevel, щоб

надати столу акуратного вигляду. На журнальному столику можна розташувати декор, наприклад, книги або невеликі вазони.

Особливу увагу слід приділити трьом підвішеним лампам, які розташовані над журнальним столиком. Для їх створення використовується комбінація циліндрів та сферичних об'єктів, які допомагають змоделювати абажури та декоративні елементи ламп. Ланцюги або підвіски для ламп створюються за допомогою модифікатора Array, що дозволяє створювати послідовності об'єктів однакової форми. Після створення ламп важливо налаштувати їхнє розташування на правильній висоті та відстані одна від одної для досягнення естетичного балансу.

Декор у вигляді вазонів додає приміщенню жвавості та свіжості. У Blender можна використовувати готові моделі рослин або створити власні за допомогою інструментів моделювання та використання модифікатора Particle System для імітації листя або гілок. Різноманітні розміри та форми вазонів дозволяють додати динаміку до інтер'єру. Важливо розташувати їх так, щоб приміщення виглядало гармонійно та не було перевантажене деталями (рисунк 3.5).

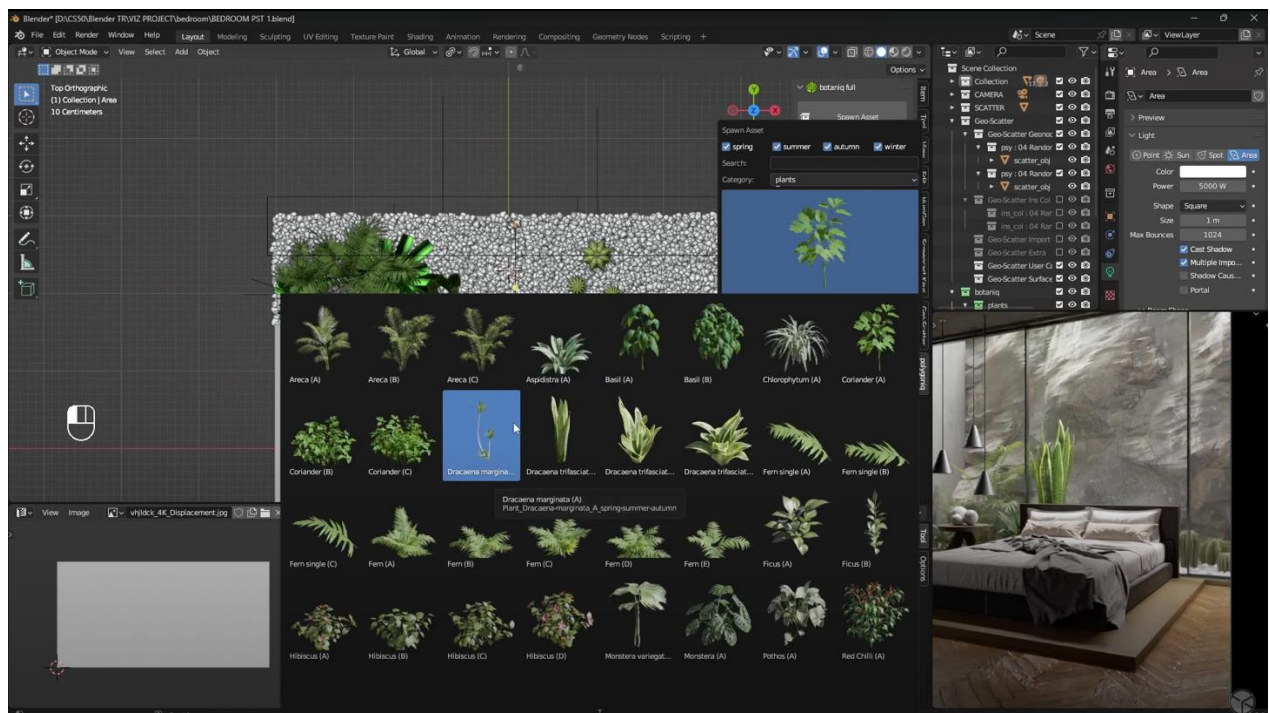


Рисунок 3.5 – Моделювання вазонів

Після завершення моделювання меблів та декору слід перевірити правильність їхнього розташування, щоб забезпечити зручний простір для пересування та функціональність інтер'єру. Blender дозволяє вимірювати відстані між об'єктами, що допомагає підтримувати відповідність ергономічним стандартам.

3.3. Текстурування та освітлення для реалістичної візуалізації приміщення

Текстурування та освітлення є важливими етапами для створення реалістичної візуалізації приміщення у тривимірному середовищі, таких як Blender. Після побудови базової геометрії та додавання меблів і деталей інтер'єру, саме текстури та освітлення перетворюють модель на реалістичну та живу сцену. Ці етапи вимагають уваги до дрібниць, оскільки кожна поверхня має взаємодіяти зі світлом відповідно до її матеріальних властивостей, а освітлення має правильно підкреслювати форми та створювати потрібний настрій.

Текстурування – це процес нанесення двовимірних зображень (текстур) на тривимірні об'єкти для того, щоб відтворити їхній зовнішній вигляд, матеріали та властивості. У Blender цей процес здійснюється за допомогою системи UV-мапування, яка дозволяє проєктувати текстури на об'єкти таким чином, щоб вони відповідали їхнім геометричним формам.

Спочатку необхідно підготувати модель до нанесення текстур. Для цього об'єкт розгортають на двовимірну площину, щоб створити UV-розгортку. Розгортка дозволяє визначити, як текстура буде розташована на поверхні об'єкта. У Blender існують різні методи створення UV-розгортки, наприклад, автоматичне розгортання (Smart UV Project) або ручне розгортання для більш точного налаштування. Ручне налаштування дозволяє уникнути спотворень текстури на складних поверхнях.

Для текстурування спальні важливо правильно вибрати текстури для кожного елемента. Ліжко, журнальний столик, лампи та вазони повинні мати різні матеріали, які відображають їхні фізичні властивості. Наприклад, для ліжка використовуються текстури тканини для матраца, подушок і пледа, які можуть включати в себе деталі, такі як візерунки чи текстура волокон. Використання карт нормалей (normal maps) допомагає додати рельєфності та глибини поверхням без збільшення кількості полігонів. Карти нормалей дозволяють створювати ефект нерівностей на поверхні, що виглядає більш реалістично.

Подушки на ліжку можуть мати різні текстури, щоб створити контраст і виділити їх як окремі елементи інтер'єру. Декоративні подушки можна текстурувати за допомогою матеріалів з візерунками або орнаментами. Плед потребує застосування більш складної текстури, яка відображає його м'якість та природні складки. У цьому випадку корисно застосувати карти нерівностей або карти розсіювання (diffuse maps), щоб передати глибину кольорів і тканинний вигляд.

Для журнального столика важливо підібрати текстуру, яка передає матеріал, з якого він зроблений. Наприклад, дерев'яний столик матиме текстуру з видимими волокнами дерева, що підкреслюють його природне походження. Також важливо застосувати карти відбиття (reflectance maps) для створення ефекту блиску, особливо якщо поверхня столика лакована.

Лампи, що висять над столиком, можуть мати комбінацію металевих і скляних матеріалів. У цьому випадку необхідно налаштувати параметри прозорості, відбивної здатності та рефракції (заломлення світла) для скляних елементів, щоб відобразити реалістичне проходження світла крізь них. Металеві частини ламп повинні мати відповідний блиск і відбивну здатність, що додає їм деталізації.

Вазони, розташовані в різних місцях кімнати, можуть бути створені з використанням текстур, що імітують глину, кераміку або метал. Це допоможе додати різноманітність у візуалізацію приміщення. Листя рослин можна

текстурувати за допомогою карт альфа-прозорості, щоб створити напівпрозорі краї та реалістичне відображення світла на листі.

Blender пропонує потужний інструмент для налаштування матеріалів – редактор шейдерів (Shader Editor), що дозволяє створювати складні матеріали за допомогою вузлів (nodes). Використовуючи вузли, можна комбінувати різні текстури, карти нормалей, карти відбиття та інші карти для створення реалістичних матеріалів. Наприклад, для створення тканини можна використовувати вузол Diffuse BSDF для основного кольору та вузол Bump для додавання рельєфу (рисунок 3.6).

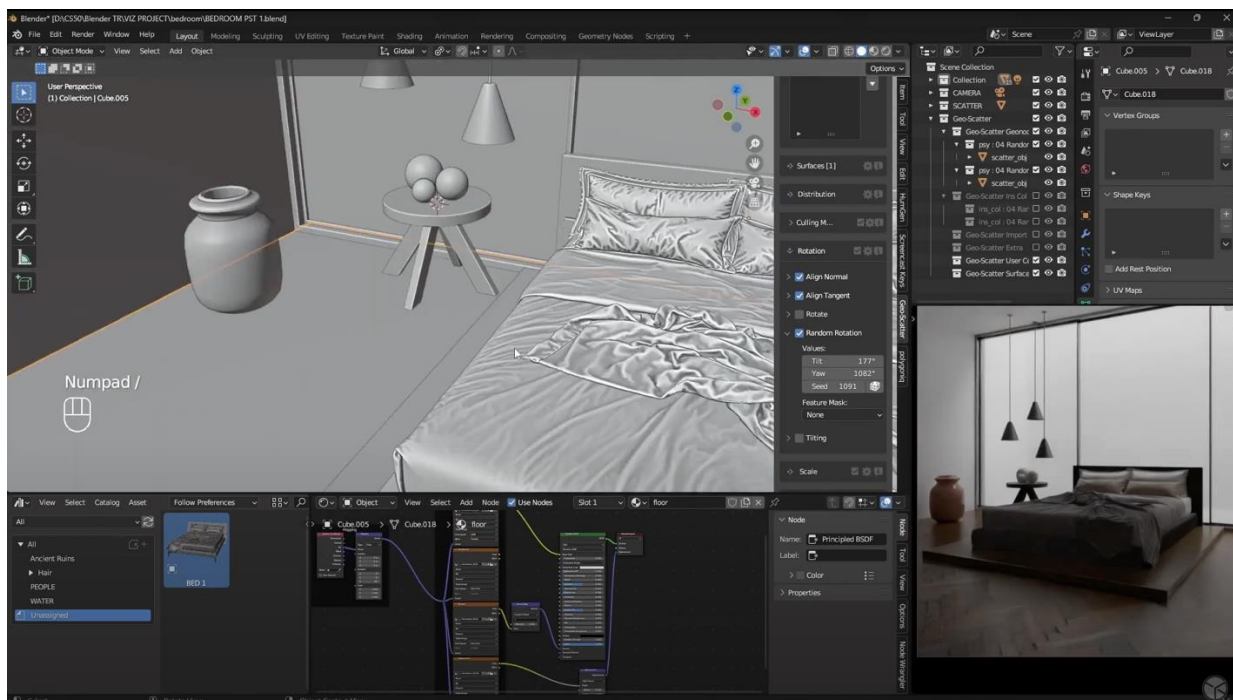


Рисунок 3.6 – Використання вузла Diffuse BSDF та вузла Bump для створення тканини

Матеріали можна налаштовувати для кожного елемента окремо. Ліжко матиме матеріал із текстурою тканини, зокрема з додатковими картами, які додають відчуття м'якості та складок. Журнальний столик матиме налаштовану карту відбиття, яка допоможе створити блискучу поверхню. Лампи матимуть комбінацію прозорих і металевих матеріалів для реалістичного відтворення

світлових ефектів. Вазони можуть мати матову або блискучу текстуру залежно від бажаного ефекту.

Освітлення є ключовим елементом для створення реалістичної сцени. У тривимірному моделюванні використовуються різні типи джерел світла, серед яких точкові, спрямовані та розсіяні джерела. У випадку моделювання спальні важливо налаштувати освітлення так, щоб воно підкреслювало основні елементи інтер'єру та створювало затишну атмосферу (рисунк 3.7).



Рисунок 3.7 – Моделювання освітлення в приміщенні спальні

Основне освітлення може бути створене за допомогою направленого джерела світла (Area Light), що імітує природне світло, яке проникає через вікно. Це допомагає створити базову освітленість у приміщенні та підкреслити тіні на об'єктах. Важливо розташувати джерело світла таким чином, щоб тіні виглядали природно і створювали ефект глибини.

Для додаткового освітлення використовуються точкові джерела світла (Point Light), розташовані в різних точках кімнати. Наприклад, підвішені лампи

над журнальним столиком можна налаштувати як джерела точкового світла з теплим відтінком, що створює затишок і додає деталізації. Налаштування інтенсивності світла та його кольору дозволяють змінювати атмосферу приміщення, роблячи її більш інтимною чи святковою.

Реалістичне відтворення світла також залежить від використання технології глобального освітлення (Global Illumination). Цей метод враховує не тільки пряме освітлення від джерел світла, а й відбите світло від поверхонь, що додає глибини та природності сцени. У Blender можна використовувати рендер-двигуни Cycles або Eevee. Cycles є більш точним і реалістичним завдяки підтримці фізично коректного рендерингу, що враховує складні взаємодії світла з матеріалами.

Налаштування відбиттів і прозорості є важливим для створення правильного освітлення. Наприклад, скляні елементи ламп можуть створювати відблиски, що додають сцені динамічності. Використання HDRI-зображень як оточуючого освітлення допомагає створити реалістичні відблиски та розсіяне світло, що імітує природне освітлення. HDRI-карти забезпечують широкий динамічний діапазон і дозволяють відтворити сцену з усіма деталями, включаючи найяскравіші та найтемніші області.

Для створення затишної атмосфери спальні важливо використовувати теплі відтінки світла. Підвішені лампи можуть мати тепле жовте світло, що створює ефект м'якого освітлення. Направлене світло можна використовувати для підсвічування конкретних зон, таких як ліжко або журнальний столик, щоб створити акценти. Розташування та налаштування джерел світла мають бути продуманими, щоб уникнути надмірних тіней та забезпечити рівномірний розподіл світла.

Тіні також грають важливу роль у створенні реалістичності. Blender дозволяє налаштовувати м'якість та інтенсивність тіней, що допомагає уникнути надмірних контрастів і створює природні переходи. Наприклад, тіні від ламп, що висять над столиком, мають бути м'якими та не дуже різкими, щоб створювати комфортне освітлення.

Окрім основних джерел світла, у спальні можна використовувати додаткове освітлення для підсвічування вазонів чи декоративних елементів. Це допомагає створити глибину сцени та привертає увагу до деталей. Можна застосовувати світлодіодні стрічки або інші типи акцентного освітлення, щоб підкреслити структуру стін або створити затишну атмосферу.

Реалістичне освітлення в сцені залежить від того, як матеріали об'єктів реагують на світло. Наприклад, дерев'яні поверхні журнального столика можуть мати матовий блиск, який відображає світло менш інтенсивно, ніж глянцева поверхня. Використання налаштувань відбиття та прозорості допомагає створити реалістичну взаємодію світла з матеріалами.

Для тканин, таких як покривало на ліжку або штори, налаштовуються параметри, що імітують розсіювання світла, завдяки чому вони виглядають м'якими та реалістичними. У Blender можна використовувати вузли для створення матеріалів із різними параметрами прозорості та відбивної здатності. Наприклад, вузол Translucent BSDF може використовуватись для створення ефекту прозорості тканини, а Glossy BSDF – для відображення блиску на металевих елементах ламп.

Після того як усі текстури нанесені, а освітлення налаштоване, важливо зробити тестовий рендеринг для перевірки загального вигляду.

На цьому етапі коригуються інтенсивність світла, розташування джерел світла та параметри матеріалів. Можна змінити колір і відтінок освітлення, щоб створити бажану атмосферу.

На рисунку 3.8 представлено результат моделювання, тобто реалістична та деталізована модель спальні, яка відтворює справжню атмосферу та передає всі особливості приміщення.



Рисунок 3.8 – Реалістична та деталізована модель спальні із використанням алгоритмів візуалізації

Blender дозволяє використовувати інструменти постобробки для додаткової корекції зображення. Це включає налаштування яскравості, контрасту, кольорової гами та інших параметрів, які допомагають підкреслити ключові елементи сцени.

3.4 Висновки до розділу

У розділі розглянуто та детально описано процес створення моделі спальні у програмному забезпеченні Blender, з акцентом на ключові етапи моделювання: побудову базової геометрії, додавання меблів і деталей інтер'єру, а також текстурування та освітлення для досягнення високої реалістичності.

Побудовано базову геометрію, продемонстровано важливість точного створення основних елементів приміщення, таких як стіни, підлога, стеля, а також правильного розташування віконних та дверних прорізів. Використання таких інструментів, як модифікатори Extrude та Boolean, забезпечує ефективне створення об'ємних форм і точних отворів, що відповідають кресленням і технічним вимогам. Цей процес закладає основу для подальшої деталізації моделі та створює міцний фундамент для наступних етапів.

Також додано меблі та елементи інтер'єру, та показано, як розміщення і налаштування об'єктів допомагають створити атмосферу приміщення. Моделювання двоспального ліжка, журнального столика, трьох підвішених ламп та численних вазонів було описано з акцентом на техніки використання базових і складних геометричних форм, модифікаторів для згладжування поверхонь і створення деталей. Важливу роль відіграють ергономічні аспекти, що забезпечують комфортне планування простору та відповідність стандартам інтер'єрного дизайну.

Детально описано текстурювання та освітлення, показано, як нанесення текстур і налаштування матеріалів впливають на сприйняття моделі. Використання UV-мапування та редактора шейдерів у Blender дозволяє створювати різноманітні матеріали з властивостями прозорості, відбиття та рельєфності. Особливу увагу було приділено створенню реалістичного освітлення за допомогою технологій глобального освітлення та налаштувань HDRI. Підбір теплих відтінків для підвішених ламп та налаштування різних джерел світла дозволили створити затишну та привабливу атмосферу.

Завдяки поєднанню описаних методів моделювання, текстурювання та освітлення створюється реалістична тривимірна модель спальні, яка відповідає сучасним стандартам архітектурної візуалізації. Застосування інструментів і алгоритмів Blender дозволяє досягти високої деталізації та точності, що робить моделі придатними для використання в архітектурних проєктах, дизайні інтер'єрів та віртуальних турах.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі проведено дослідження основних алгоритмів та розроблено нові методи для підвищення якості 3D-візуалізації приміщень. У ході виконання роботи досягнуто наступних результатів.

1. Проведено аналіз етапів розвитку та теоретичних основ 3D-моделювання і візуалізації приміщень: дослідження основних етапів розвитку комп'ютерної графіки дозволило визначити оптимальні підходи, що є актуальними для сучасного тривимірного моделювання.

2. Розглянуто основні принципи та алгоритми візуалізації приміщень: включено аналіз полігонального, сплайнового моделювання, Boolean-операцій, NURBS-моделювання, а також алгоритмів оптимізації моделей, що забезпечує високу деталізацію та реалістичність при оптимальних ресурсних витратах.

3. Проаналізовано сучасне програмне забезпечення для 3D-моделювання: проведено порівняння таких інструментів, як Blender, 3ds Max і SketchUp, що дало можливість обрати найоптимальніші засоби для виконання задачі відповідно до функціональних можливостей та вимог проекту.

4. Розроблено алгоритм адаптивного текстурювання та освітлення для інтер'єрів, що дозволить забезпечити реалістичне відображення матеріалів та освітлення, наближене до умов реального середовища, та підвищить якість візуалізації.

5. Удосконалено методи інтерактивної взаємодії з тривимірними моделями: застосовані нові підходи до рендерингу та підвищення продуктивності забезпечують можливість досліджувати та оцінювати моделі приміщень у реальному часі з високим рівнем деталізації та стабільною швидкістю роботи.

6. Розроблено модель приміщення спальні у Blender із застосуванням описаних алгоритмів: забезпечено оптимізацію моделей для підтримки якості при мінімальних ресурсних витратах, що дозволяє підвищити ефективність

взаємодії з тривимірними моделями та зберегти високу продуктивність під час роботи.

Загалом, виконана робота дозволяє підвищити точність, реалістичність та ефективність візуалізації приміщень, що відкриває нові перспективи для застосування 3D-технологій у архітектурному проектуванні, дизайні інтер'єрів та інтерактивних середовищах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ярмусь М.В., Цимбал Д.М. Застосування симетричних криптоалгоритмів для захисту інформації \\\ Матеріали науково-практичної конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2023). Тернопіль, 2023. С. 34.
2. Годя В.В., Ярмусь М.В. Аналіз методів та алгоритмів реконструкції обличчя на основі стереозображень для біометричних систем \\\ Матеріали науково-практичної конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2024). Тернопіль, 2024. С. 38-39.
3. Березький О.М., Мельник Г.М. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи з освітнього ступеня «Магістр». Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія. Магістерська програма – Комп'ютерна інженерія. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. 33 с.
4. Гураль І.В., Дубчак Л.О. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів, звітів про проходження практики, випускних кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Комп'ютерна інженерія» / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ТНЕУ, 2019. 33 с.
5. Савчук В. П. Основи комп'ютерної графіки: підручник. – Київ: Наукова думка, 2020. 450 с.
6. Sutherland, I. E. Sketchpad: A man-machine graphical communication system // Proceedings of the AFIPS Spring Joint Computer Conference. – 1963. – P. 329-346.
7. Foley, J. D., Van Dam, A., Feiner, S. K., & Hughes, J. F. Computer Graphics: Principles and Practice. – Addison-Wesley, 1996. 1175 p.
8. Appel, A. Some techniques for shading machine renderings of solids // AFIPS Conference Proceedings. – 1968. – Vol. 32. – P. 37-45.
9. Gouraud, H. Continuous shading of curved surfaces // IEEE Transactions on Computers. – 1971. – Vol. C-20(6). – P. 623-629.

10. Phong, B. T. Illumination for computer generated pictures // Communications of the ACM. – 1975. – Vol. 18(6). – P. 311-317.
11. Хоменко О. В. Комп'ютерна графіка в кінематографі: від 2D до 3D // Кіно і культура. – 2022. – № 1. – С. 12-19.
12. Autodesk 3ds Max Documentation. – Autodesk Inc., 2023. 600 p.
13. Alias Systems Corporation. Maya User Guide. – Autodesk Inc., 2022. 850 p.
14. NVIDIA Corporation. NVIDIA RIVA 128 Technical Manual. – NVIDIA, 1997. 250 p.
15. Baraff, D., & Witkin, A. Large steps in cloth simulation // Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1998. – P. 43-54.
16. Landau, D. James Cameron's Avatar: A Cinematic History. – Movie Making Press, 2010. 350 p.
17. Beardsley, T., & Kessler, G. Motion Capture for Animation. – CRC Press, 2021. 320 p.
18. Blender Documentation. – Blender Foundation, 2023. 450 p.
19. Chaos Group. V-Ray User Guide. – Chaos Group, 2023. 500 p.
20. Shirley, P., & Marschner, S. Fundamentals of Computer Graphics. – A K Peters/CRC Press, 2017. 742 p.
21. Unreal Engine Documentation. – Epic Games, 2023. 800 p.
22. Zhang, X., & Li, P. AI in 3D Modeling: Techniques and Applications // International Journal of Computer Science. – 2022. – Vol. 22(4). – P. 150-165.
23. Чепурко І. М., та Власенко, О. В. Основи тривимірного моделювання приміщень // Архітектурні технології. – 2021. – № 4. – С. 45-52.
24. Piegl, L., & Tiller, W. The NURBS Book. – Springer Science & Business Media, 2012. 646 p.
25. Михайлов, Д. В. Булеві операції в тривимірному моделюванні // Інформаційні технології та системи. – 2022. – № 2. – С. 30-35.

26. Architectural Modeling Standards Manual. – Architectural Institute, 2022. 300 p.
27. Jensen, H. W. Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping. – A K Peters/CRC Press, 2001. 352 p.
28. Blender Manual. – Blender Foundation, 2023. 450 p.
29. Autodesk 3ds Max Animation Guide. – Autodesk Inc., 2023. 620 p.
30. SketchUp User Guide. – Trimble Inc., 2023. 300 p.
31. Романенко С. В. Полігональне моделювання в архітектурних програмах // Будівельна інженерія. – 2022. – № 5. – С. 15-22.
32. Smith, R., & Johnson, T. Advanced Polygonal Modeling Techniques. – TechBook Press, 2021. 500 p.
33. Murdock, K. L. 3ds Max Modeling for Games: Insider's Guide to Game Character, Vehicle, and Environment Modeling. – Cengage Learning, 2020. 900 p.
34. Rogers, D. F. Procedural Elements for Computer Graphics. – McGraw-Hill, 2022. 800 p.
35. Piegl, L., & Tiller, W. The NURBS Book. – Springer Science & Business Media, 2012. 646 p.
36. Krishnamurthy, V., & Levoy, M. Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes // Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 2023. – P. 313-324.
37. Milenkovic, V., & Li, S. Polygonal Reduction Techniques in Large-Scale Models // Journal of Computer Graphics Techniques. – 2023. – Vol. 12(3). – P. 45-61.
38. Chen, D. Z., & Cheng, R. Y. Retopology Techniques in 3D Modeling // Computer-Aided Design Journal. – 2022. – Vol. 14(4). – P. 29-45.
39. Zorin, D., & Schroder, P. Texturing Techniques for Real-Time Rendering. – Morgan Kaufmann, 2022. 420 p.
40. Pharr, M., Jakob, W., & Humphreys, G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. – Morgan Kaufmann, 2023. 1200 p.