

Історія розвитку та сучасний стан 3D моделювання

Деркач Анна Сергіївна¹

Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна

E-mail: a.s.derkach@npu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5276-8165>

У статті докладно розглядається історія розвитку та сучасний стан тривимірного моделювання, як ключової галузі в інформаційному та технологічному просторах. Передовсім подано коротку історичну оглядову добірку, що відстежує еволюцію тривимірного моделювання від його зародження до сучасних досягнень. Також відзначено, як перші спроби створення тривимірних моделей відбувалися в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, але з часом змогли вибудувати масштабні та складні віртуальні об'єкти завдяки зростанню потужності комп'ютерів та розвитку програмних засобів. У роботі також здійснено детальний аналіз і систематизацію періодів розвитку тривимірного моделювання. Розглядаються ключові фази, такі як ранні дослідження та практичне застосування у таких галузях, таких як анімація, архітектура та багато інших. Розроблено хронологічну схему історії розвитку 3D моделювання, що передбачає етапи від початку комп'ютерної графіки в 1960-х роках до сучасного застосування у різних сферах, зокрема, в дизайні, економіці, медицині та інженерії. Важливо зрозуміти, як ці етапи взаємодіяли та впливали один на одного, створюючи фундамент для сучасного стану галузі 3D моделювання. Значна увага приділяється сучасним тенденціям у галузі тривимірних технологій, таким як використання штучного інтелекту, віртуальна та доповнена реальність. У статті простежується зміна парадигми 3D моделювання від його початку до сьогодні, а також висвітлено потенціал цієї галузі для майбутнього розвитку технологій і креативності. Знання етапів розвитку 3D моделювання будуть важливими для вчителів інформатики, методистів, студентів, керівників гуртків із тривимірного моделювання щодо розуміння змісту і особливостей сучасного стану розвитку 3D моделювання.

Ключові слова: 3D моделювання, 3D графіка, історія, розвиток, 3D технології.

Вступ. Сучасні технології внесли кардинальні зміни практично в усі галузі діяльності людини, що дало змогу суттєво спростити та автоматизувати ті чи ті процеси, знизити витрати та підвищити ефективність роботи. Сьогодні комп'ютерні технології, такі як тривимірне моделювання стали невід'ємним складником нашого життя. 3D моделі можна зустріти практично будь-де: на вуличних плакатах, у крамницях, на упаковках товарів, у фільмах і мультфільмах. Популярність цієї технології неухильно зростає, оскільки якісно зроблена модель, презентація або відеоролик роблять кожну рекламу більш привабливою, допомагають спроектувати зовнішній вигляд будь-якого товару та створити якісний проєкт. 3D-моделювання є однією із галузей у сучасному світі, яка найбільш швидко розвивається та яка знаходить застосування в різних сферах життєдіяльності людини, включаючи архітектуру, інтерактивний дизайн, кіноіндустрію, промислове виробництво тощо.

Історія розвитку 3D-моделювання є складником більш ширшого історичного контексту, вивчення якого допомагає зрозуміти вплив соціокультурних, технологічних та економічних чинників на розвиток 3D-моделювання. Аналізуючи різні етапи розвитку 3D моделювання, можна зрозуміти, як технології змінювались із часом, які технічні досягнення було зроблено, та як вони вплинули на сучасний стан галузі. Вивчення історії розвитку дозволяє зрозуміти, як 3D моделювання виникло, які виклики стояли перед ним у різні періоди та як 3D моделювання просувалося вперед. Це допомагає зрозуміти, які перспективи та можливості можуть з'явитися у майбутньому. Розвиток 3D моделювання не тільки технічно важливий, але й має культурні та соціальні напрацювання. Вивчення цих аспектів допомагає зрозуміти, як технологія впливає на сприйняття мистецтва, розваг та інші аспекти культурного життя, а дослідження сучасного стану дозволить виявити актуальні тенденції, які формують напрями розвитку 3D моделювання в майбутньому, такі як використання штучного інтелекту, віртуальної реальності та інше.

За останні десятиліття 3D-моделювання зазнало значних технологічних змін. Удосконалюються алгоритми моделювання, методи рендерингу, системи фізичного моделювання, текстурування та

¹ аспірант кафедри інформаційних технологій і програмування Українського державного університету імені Михайла Драгоманова

освітлення. Технології віртуальної та доповненої реальності також активно впроваджуються у 3D-моделювання, що відкриває нові можливості для інтерактивності та покращення. Використання нових матеріалів та технік моделювання дозволяє досягти високого рівня деталізації та візуального реалізму. Розуміння історії розвитку 3D-моделювання та ознайомлення з його сучасним станом є надзвичайно важливими для всіх, хто цікавиться цією галуззю.

Українські та зарубіжні науковці досліджують використання 3D-моделювання в різних сферах людської діяльності. Зокрема, вчені (О.В. Андрійчук, В.О. Бондаренко, Т.І. Братчикова, А.І. Грабченко, В.Л. Доброскок, М.М. Ожга, К.П. Осадча, А.А. Петришина, О.В. Струтинська, Н.Ю. Чемерис, D. Assante, S. Bhaduri, J. Brine, M.D. Dickey, B. Regina, T. Sumner) розглядають методи роботи, проблематику та сучасний стан 3D моделювання. Натомість в поданих вище наукових дослідженнях лише частково розглядаються питання історії 3D моделювання.

Зокрема, такі вчені як М.Ф. Пічугін, І.О. Канкін, В.В. Воротніков (Пічугін, 2013) розглядають історію розвитку комп'ютерної графіки у XX столітті через призму розвитку технічних засобів та дисплеїв і лише опосередковано описують історію розвитку 3D моделювання. У дослідженні Струтинської О.В. (Струтинська, 2018) подано аналіз стану (2018 рік) і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друку. Докладно розглядається апаратне та програмне забезпечення, яке використовується для операційного функціонування цих технологій, описуються технологічні етапи тривимірного друкування, а також надається характеристика сфер використання цих інновацій.

Мета та завдання дослідження: аналіз та систематизація історичного розвитку та сучасного стану 3D моделювання, оскільки знання про те, які технології, методи та інструменти використовувались у минулому, допоможуть зрозуміти сучасні тенденції та напрями розвитку 3D моделювання. Для досягнення поставленої в роботі мети було проведено аналіз навчально-методичної, наукової та спеціальної літератури з проблеми дослідження, узагальнено власний педагогічний досвід навчання тривимірного моделювання в школі.

Матеріали та методи дослідження: науковий огляд, аналіз та систематизація історичних даних та сучасних тенденцій.

Результати дослідження. Історія розвитку 3D-моделювання започаткована задовго до того, як з'явилися персональні комп'ютери. Означений напрям можна прослідкувати в математичних концепціях, які і є основою 3D візуалізації. Навіть у Евкліда, відомого як «батька геометрії», що жив у III столітті до нашої ери, вже виникли деякі ключові ідеї. У 1600-х роках Рене Декарт зробив значний внесок у цю галузь, розробивши основи аналітичної геометрії, відомої також як координатна геометрія. Це дозволило точно вимірювати відстані та визначати місцезнаходження. У середині XVIII століття англійський математик Джеймс Джозеф Сильвестр винайшов матричну математику, яка застосовується у сучасній комп'ютерній графіці, де можна враховувати відблиски та викривлення світла.

Перші значні досягнення у сфері 3D-моделювання відбулися під час появи перших комерційно доступних систем автоматизованого проєктування (САПР) у 1960-х роках. Тоді Вільям Феттер (William Fetter) вперше використав формули для перетворення 3D координат на 2D координати як основу для візуалізації. За його програмою можна було малювати 3D об'єкти з ліній (Fetter, 1962). Паралельно з цим, аспірант Массачусетського університету Іван Сазерленд (Ivan Sutherland) виявив, що він може малювати об'єкти однієї форми на екранах комп'ютерів. У 1963 році американський вчений створив першу 3D-програму – Sketchpad, яка могла створювати прості 3D-об'єкти за допомогою полігональної сітки – ребер, вершин і граней. Sketchpad за допомогою світлового пера дозволяв малювати на дисплеї векторні фігури, зберігати їх, використовувати прості шаблони. Ключовим моментом було використання концепції «батько-нащадок»: об'єкти можна було багаторазово копіювати, змінюючи кожен з ескізів на свій смак, якщо вносилися правки в початковий об'єкт, відповідним чином перебудовувалися його дублікати. Ще одним важливим винаходом «Sketchpad» були інструменти автоматичного малювання геометричних фігур: було достатньо вказати розташування і розміри (Sutherland, 1963).

Захистивши дисертацію (Sutherland, 1963), Іван Сазерленд і доктор Девід Еванс відкривають в університеті міста Юти першу кафедру комп'ютерної графіки. У 1968 році вони заснували компанію "Evans & Sutherland", першу – у сфері 3D-графіки. Їхнє підприємство було спочатку зорієнтоване на виробництво апаратного забезпечення для роботи з розробленими системами, але вони швидко розпочали і розроблення програмного забезпечення. Успіх компанії надихнув інших на створення власних підприємств та розвиток технологій 3D моделювання.

Учені (Р.А. Гольдштейн та Р. Нагель) у 1971 році вперше реалізували метод трасування променів із використанням логічних операцій для формування тривимірних зображень. Уже в 1972 році Фредерік Парке (Frederic Parke) змодельовав уперше людське обличчя та описав методи представлення, анімації та збирання даних, які використовувалися для створення «реалістичних» згенерованих комп'ютером напівтонових анімаційних послідовностей змінного виразу людського обличчя. Було визначено, що для моделювання поверхні обличчя багатокутною оболонкою, яка містить орієнтовно 250 багатокутників, визначених орієнтовно 400 вершинами, достатньо для досягнення реалістичного вигляду змодельованого обличчя (Parke, 1972).

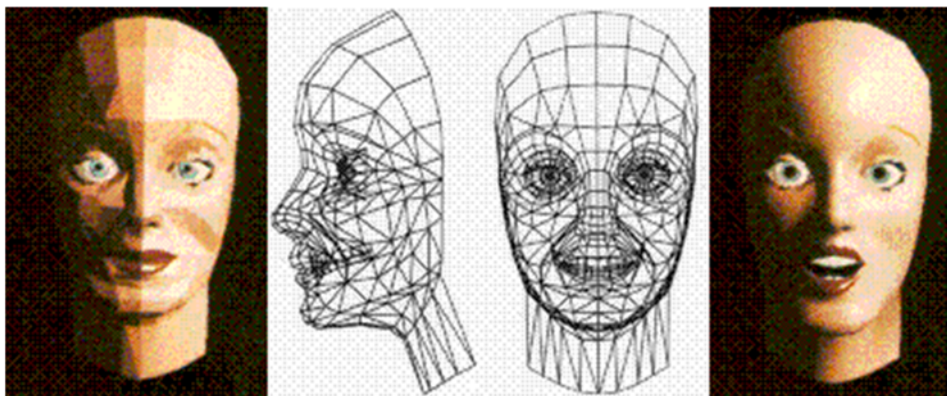


Рис. 1. Перше змодельоване людське обличчя

Пізніше, в університеті Юти Анрі Гуро та Буй Тіон Фонг вивчали методи затінення, які спрощували оброблення шляхом оптимізації алгоритмів візуалізації, і забезпечували кращу візуалізацію світла, відбиття та затінення. А вже в 1972 році Буй Фонг, Роберт Макдермотт, Джеймс Кларк і Рафаель Ром, використовуючи комп'ютерну графіку та під керівництвом Айвена Сазерленда, створили тривимірне зображення, яке вперше в історії докладно відтворювало фізичний оригінал – "Фольксваген-жук" (Volkswagen Beetle) (SCUU, 1972).

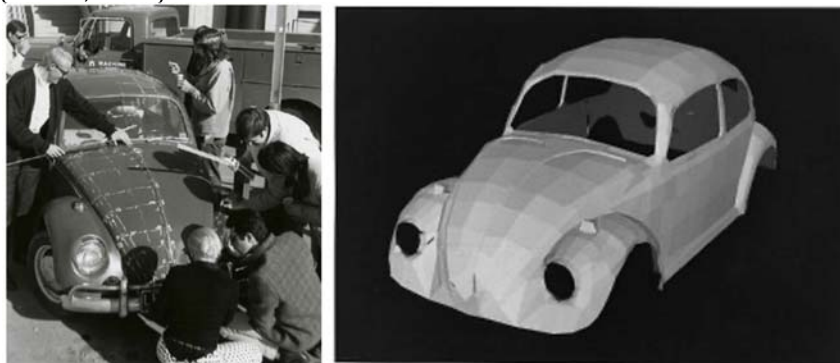


Рис. 2. Перше в історії тривимірне зображення, що точно відтворює оригінал

У 1974 році Едвін Кетмелл опублікував кандидатську дисертацію «Алгоритм моделювання підрозділень для створення вигнутих поверхонь на екрані комп'ютера», де він розглянув такі основні аспекти, як накладання текстур, бікубічні фрагменти і Z-буфер. Під терміном «Z-буферізація» розуміють метод видалення схованих поверхонь, що додає об'ємність та реалістичність об'єктам. Кожен піксель на екрані має не лише координати за оссю абсцис і ординат, але й значення за віссю аплікату, що відображає відстань від елемента до переднього плану. У разі перекриття пікселів двох об'єктів, відображається лише той, який, згідно з картою глибини, розташований найближче (Пальчевський, 2016). Особливу увагу у 1975 році привернув чайник Юта, який став символом тривимірної комп'ютерної графіки після того, як Мартін Ньюелл використав його для перевірки своїх графічних досліджень. Чайник став ідеальним тестовим об'єктом завдяки своїй структурі та різноманітності поверхонь, які він мав, а також здатності відбивати світло та створювати тінь на собі. Ньюелл поділився деталями про чайник зі своїми колегами-дослідниками, які відразу ж почали використовувати цей символічний об'єкт у своїх роботах.



Рис. 3. Чайник Юта

У 1978 році Джеймс Блінн запропонував метод реалістичного зображення мікрорельєфів. Пізніше цей підхід був вдосконалений, створенням так званої «карти оточення», яка враховує не лише властивості поверхонь, але й середовище, в якому вони знаходяться (Пальчевський, 2016). Впродовж означеного періоду дослідники та науковці розробили алгоритми, використання яких дають змогу відтворювати фізичні закони та явища у тривимірній графіці. Зокрема, були враховані такі явища, як дзеркальність та прозорість об'єктів, розсіювання та поглинання променів світла, а також заломлення світла при проходженні крізь прозорі матеріали (Пальчевський, 2016). Ці фізичні явища є основою для створення реалістичних зображень за допомогою редакторів тривимірної графіки.

Поява перших персональних комп'ютерів призвела до широкого поширення використання САПР не тільки у сфері аерокосмічної та автомобільної промисловості, але також у комерційних інженерних підприємствах. У цей період повноцінне 3D-моделювання розвивалось і стало ключовим напрямом у розробленні програмного забезпечення. Тривимірні графіка та моделювання після 1980 року постійно вдосконалювалися, а саме: було винайдено 3D комп'ютерну графіку, яка відображала б кольорові зображення на екрані, було продемонстровано перші тривимірні кінозображення, відбувся перехід до фотореалістичної анімації, що привело до створення комп'ютерних анімаційних повнометражних фільмів. У 1994 році було винайдено рухомі зображення, які стають розмитими і можуть імітувати людей і тварин, що поклато початок 3D анімації, а вже у 1995 році вийшла перша повнометражна 3D анімація Pixar «Історія іграшок».



Рис. 4. Фрагмент з "Історія іграшок"

Упродовж наступного десятиліття розвиток 3D моделювання відбувався більш інтенсивно. Це пов'язано як і з появою нового програмного забезпечення та збільшення обчислювальної потужності комп'ютерів, так і з появою 3D принтерів. У 2002 році за допомогою програмного засобу Blender Віллем-Пол ван Овербрюгген створив талісман Сюзанна (Suzanne) – 3D модель голови шимпанзе за мотивами орангутанга із фільму «Джей і мовчазний Боб завдають удару у відповідь». Модель була з малою кількістю полігонів (лише 500 граней) Suzanne включена в Blender і часто використовується як швидкий і простий спосіб перевірити матеріали, анімацію, текстури та налаштування освітлення. Його так само легко додати до сцени, як і примітиви, такі як куб чи площина.

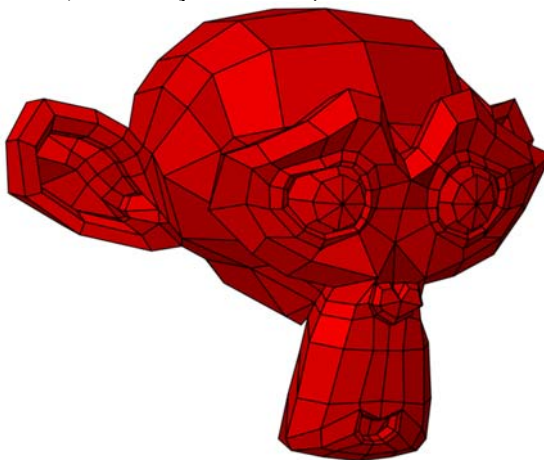


Рис. 5. 3D модель Suzanne

У 2010 році Френк Майнль за допомогою ПЗ Crytek створив 3D модель атриуму з колонами палацу Сонза у Дубровнику, що використовується для демонстрації методів глобального освітлення.



Рис. 6. 3D модель атриуму

3D-моделювання в цей період стало невід'ємним складником багатьох галузей, таких як архітектура, інтер'єрний дизайн, виробництво відеоігор, анімація, медицина, наукові дослідження та інші. Це призвело до появи спеціалізованих інструментів та технік, використання яких дає змогу створювати більш реалістичні та деталізовані 3D-моделі для конкретних потреб. Розвиток 3D моделювання на цьому етапі характеризується особливо великим переліком виробів практичного застосування, які були створені за допомогою 3D моделювання: від кісток до бетону, від скелету людини до будинку. Зокрема, було створено робочу нирку, надруковану на 3D принтері, випущено перший 3D фільм Діснея – «Красуня і чудовисько», який зробив переворот у світі кіноіндустрії, було вперше змодельовано та надруковано протез ноги, а вже у 2010 році було вперше надруковано тривимірний автомобіль, корпус якого був повністю надрукований на 3D-принтері.

У 2012 році Кінан Крейн в Каліфорнійському технологічному інституті розробив 3D модель мультяшної корови, що мала в собі 2930 вершин та 5856 трикутників, а у 2015 році було спеціально розроблено 3D модель човна (3D Benchy) для тестування точності та можливостей 3D-принтерів.



Рис. 7. 3D Benchy

Узагальнивши основні періоди розвитку та становлення 3D моделювання, ми розробили графічну ілюстрацію, що відображає детальний послідовний хід етапів історичного розвитку тривимірного моделювання. Дана схема надає вичерпний огляд ключових кроків та перехресть в еволюції цієї технології від її виникнення до сучасності. Розглядаються різні аспекти, такі як технічний прогрес, інновації у методології, вплив на різні галузі та суспільство загалом. Ця наочна інформаційна модель надає можливість краще оцінити хронологічний порядок досягнень і подій у сфері 3D моделювання.

Сучасні технології дають змогу створювати дуже реалістичні 3D-моделі, із високою деталізацією, текстурами та освітленням. Рендеринг, тобто процес створення зображень із 3D-моделі, також став більш швидким і реалістичним. Сьогодні, 3D моделювання використовується у багатьох галузях та індустріях. Наведемо деякі з них:

- **Комп'ютерна графіка і відеоігри:** 3D моделювання використовується для створення віртуальних об'єктів, персонажів, світлів та спеціальних ефектів у комп'ютерних іграх і відеоіграх.

- **Архітектура та візуалізація:** 3D моделювання допомагає архітекторам та дизайнерам створювати візуалізації будівель, інтер'єрів та зовнішнього середовища. Це дає змогу передбачати, як виглядатиме будівля чи проект до їх фактичної реалізації.

- **Промисловий дизайн:** 3D моделювання використовується для розробки нових продуктів та деталей, їх візуалізації, а також для виробництва прототипів.

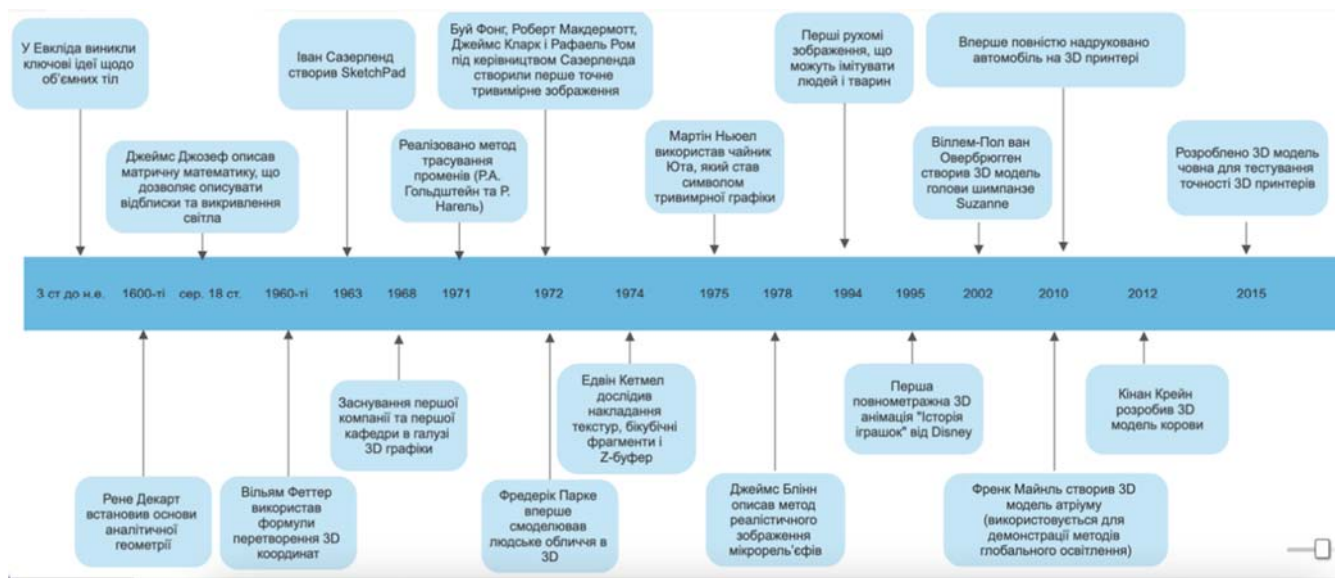


Рис. 8. Історія розвитку 3D моделювання

- **Медицина:** 3D моделювання застосовується для створення точних моделей органів тіла, що допомагає лікарям планувати операції, вивчати хвороби та проводити дослідження.
- **Кіно та відеопродукція:** 3D моделювання використовується для створення комп'ютерних графічних ефектів (CGI) у фільмах, рекламних роликах та інших відеопродуктах.
- **Інтерактивне навчання та симуляція:** 3D моделювання використовується для створення віртуальних середовищ, які дають змогу людям навчатися, тренуватися або виконувати симуляції в безпечних умовах, наприклад, в авіаційній індустрії, медичній сфері, військових тренування тощо.
- **Археологія та культурна спадщина:** 3D моделювання допомагає відтворити археологічні об'єкти, історичні пам'ятки та культурну спадщину, що дають змогу дослідникам і публіці побачити та вивчити їх у віртуальному середовищі (Струтинська, 2018).

Також варто зазначити, що в останні роки з'явилися нові технології та тенденції у сфері 3D-моделювання. Одна з них – це генерація 3D-моделей за допомогою штучного інтелекту. Алгоритми машинного навчання та нейромережі можуть аналізувати великі обсяги даних та автоматично створювати складні 3D-моделі, що значно спрощує і прискорює процес їх створення. Крім того, 3D-моделювання також знайшло застосування в сфері віртуальної торгівлі (e-commerce), де 3D-моделі товарів можуть бути показані споживачам для більш детального огляду перед покупкою.

Висновки. Як можемо бачити, історія розвитку 3D моделювання свідчить про значний прогрес у цій галузі в останні десятиліття. Від початкових примітивних методів до сучасних комп'ютерних програм та технологій, використання 3D моделювання дає змогу створювати складні, реалістичні та деталізовані моделі. Сучасний стан розвитку 3D моделювання характеризується постійними зрушеннями в напрямку покращення якості моделей, швидкості рендерингу та масової доступності програмного забезпечення для тривимірного моделювання. З'являються нові методи та алгоритми, які дають змогу реалістично відтворювати матеріали, освітлення та фізичну взаємодію об'єктів. Вплив 3D моделювання на різні галузі, такі як архітектура, медицина, ігрова індустрія, кіно та дизайн, є надзвичайно великим, адже дозволяє проектувати та створювати складні об'єкти, віртуальні середовища та інтерактивні симуляції, що відкриває безліч можливостей для творчості та інновацій.

Перспективи подальших досліджень у галузі 3D моделювання включають розвиток більш ефективних та точних алгоритмів рендерингу, покращення взаємодії з моделями за допомогою віртуальної та доповненої реальності, розширення можливостей створення анімації та фізичних симуляцій. Використання нейромереж та алгоритмів глибинного навчання може сприяти автоматизації процесу моделювання, зменшенню зусиль та покращенню точності створення моделей. Розширення можливостей інтерактивного взаємодії з 3D моделями у віртуальних середовищах може мати значний вплив на сфери навчання, дизайну, медицини тощо.

Література

- Пальчевський Б.О., Валецький Б.П., Вараніцький Т.Л. Системи 3D моделювання : навч. посіб. Луцьк, 2016. 175 с.
- Пічугін М. Ф., Канкін І.О., Воротніков В.В. Комп'ютерна графіка: навч. посіб. Київ: «Центр учбової літератури», 2013. 346 с.

Струтинська О. В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання*. Київ, 2018. Вип. 20 (27). С. 88-94.

Fetter W. The Art Machine. *The Journal of Commercial Art & Design*. Vol. 4, No.2, Feb. 1962, p. 36.

Parke F. I. Computer generated animation of faces. *Proceedings of the ACM annual conference*. Vol. 1. 1972. n. pag.

School of Computing at the University of Utah. Mapping Sutherland's Volkswagen [Електронний ресурс] / School of Computing at the University of Utah // Computer History Museum. Режим доступу до ресурсу: <https://www.computerhistory.org/revolution/computer-graphics-music-and-art/15/206/560>.

Sutherland I. E. Sketchpad, a man-machine graphical communication system []: submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering. January, 1963. 176 p.

History of the development and current state of the 3D modelling

Derkach Anna²

National Pedagogical Dragomanov University, Kyiv, Ukraine

The article provides a detailed examination of the history and current state of the 3D modelling as a key field in the information and technology domain. Firstly, a brief historical overview is presented, tracing the evolution of the 3D modelling from its inception to the modern achievements. It is also noted how initial attempts at creating the 3D models were constrained by limited computing resources but eventually evolved into creating complex virtual objects, thanks to the growth of computer power and software development.

The work additionally conducts a detailed analysis and categorization of the developmental periods in the 3D modelling. The key phases, such as early research and practical applications in the fields like animation and architecture, are explored. A chronological scheme of the history of the 3D modelling is developed, encompassing stages from the emergence of computer graphics in the 1960s to its contemporary applications across various domains, including design, economics, medicine, and engineering.

The understanding how these stages interact and influence each other, forming the foundation for the current state of the 3D modelling, is essential. The article also places significant emphasis on contemporary trends in the 3D technology, such as the use of artificial intelligence, virtual and augmented reality. Overall, it traces the paradigm shift in the 3D modelling from its inception to the present and highlights the potential of this field for future technological advancements and creativity. The knowledge of the developmental stages of the 3D modelling is valuable for computer science educators, curriculum developers, students, and leaders of the 3D modelling clubs to comprehend the content and characteristics of the current state of the 3D modelling.

Keywords: 3D modelling, 3D graphics, history, development, 3D technologies.

References

Fetter, W. (1962). The Art Machine. *The Journal of Commercial Art & Design*, 4(2), 36.

Palchevskiy, B.O., Valetskiy, B.P., & Varanitskiy, T.L. (2016). Systemy 3D modelivannia [3D modeling systems]. Lutsk [in Ukrainian].

Parke, F.I. (1972). Computer generated animation of faces. *Proceedings of the ACM annual conference*. Vols. 1.

Pichuhin, M.F., Kankin, I.O., & Vorotnikov, V.V. (2013). *Kompiuterna hrafika [Computer graphics]*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

School of Computing at the University of Utah. (n.d.). Mapping Sutherland's Volkswagen. Computer History Museum. Retrieved October 2, 2023. URL: <https://www.computerhistory.org/revolution/computer-graphics-music-and-art/15/206/560>.

Strutynska, O.V. (2018). Suchasnyi stan i perspektyvy rozvytku tekhnolohii tryvymirnoho modelivannia ta drukuvannia [Current state and prospects for the development of three-dimensional modeling and printing technologies]. *Naukovyi chasopys Natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni M. P. Drahomanova. Ser. 2 : Kompiuterno-orientovani systemy navchannia – Scientific journal of the National Pedagogical University named after M. P. Drahomanov. Series 2: Computer-oriented learning systems*. Kyiv. Issue 20 (27), pp. 88-94 [in Ukrainian].

² Graduate Student of the Department of Information Technologies and Programming at the National Pedagogical Dragomanov University

Sutherland, I.E. (1963). Sketchpad, a man-machine graphical communication system: submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. *Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering.*

Accepted: November 01, 2023

