

ОПТИМІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЇ 3D-МОДЕЛІ ПЕРСОНАЖА ТИПУ MESH З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ІНСТРУМЕНТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕЛЕМЕНТІВ ШІ

Воскобійник І. А., Співак С. М.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, м. Києва

ВСТУП

Актуальність і постановка проблеми. Сучасна індустрія комп'ютерної графіки, зокрема ігрова та кіноіндустрія, активно використовує тривимірне моделювання для створення персонажів та віртуальних середовищ. Однією з ключових задач у цьому процесі є побудова якісної топології 3D-моделей, що безпосередньо впливає на можливість їх подальшої анімації, текстурвання та рендерингу. Особливо складними є моделі типу mesh (розглянемо на прикладі створення робота), які поєднують в собі як жорсткі механічні форми, так і складні рухомі з'єднання. Неправильна топологія може призводити до артефактів під час згладжування або деформації при анімації.

Метою даної роботи є створення 3D-моделі персонажа типу mesh з використанням полігонального моделювання, аналіз підходів до оптимізації топології та дослідження можливостей інструментів штучного інтелекту як допоміжного засобу у виробничому процесі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання оптимізації топології 3D-моделей розглядається у роботах, присвячених як технічним аспектам комп'ютерної графіки, так і практичним методичкам художнього виробництва. Дослідники виділяють декілька ключових напрямків: алгоритмічну ретопологію, subdivision-моделювання та використання штучного інтелекту для генерації та спрощення геометрії.

Питання оптимізації топології 3D-моделей персонажів тісно пов'язане з розвитком subdivision-поверхонь та алгоритмів ретопології. Основні принципи побудови якісної полігональної сітки та оптимізації топології детально описані Votsch et al. [1], що робить цю роботу базовою для сучасних підходів до ретопології. Класична робота E. Catmull та J. Clark заклала математичні основи Catmull–Clark subdivision, що й досі є стандартом для побудови гладких поверхонь на довільних полігональних сітках, особливо за умови переважання чотирикутних полігонів (quad-topology) [2]. Подальші дослідження зосереджені на покращенні якості поверхні поблизу екстраординарних вершин та інтерполяції сіток довільної топології [3], що є критично важливим для коректної деформації в зонах суглобів при анімації персонажів. Сучасні роботи у галузі subdivision-поверхонь спрямовані також на підвищення ефективності обчислень та реального часу рендерингу. Наприклад, запропонована структура даних Edge-Friend забезпечує швидке та детерміноване

застосування Catmull–Clark subdivision до quad-сіток, що дозволяє обробляти мільйони полігонів у режимі реального часу та підтримує анімацію й інтерполяцію атрибутів [4]. Це підтверджує, що вимога до чистої quad-топології залишається базовою передумовою для сучасних пайплайнів рендерингу та ригінгу.

Останніми роками з'явилися AI-системи автоматичної ретопології – зокрема, Instant Meshes та RetopoFlow – що дозволяють перетворювати dense sculpted mesh у придатну для анімації низькополігональну модель без ручної роботи. Алгоритмічні підходи до автоматичного ремешингу та ретопології використовують поля напрямків (cross-field) та функції енергії для побудови сітки з контрольованою щільністю та орієнтацією ребер [1]. У практичних гайдах з AI-ретопології підкреслюється, що машинне навчання дозволяє суттєво скоротити час перетворення high-poly скульптів у придатні для реального часу quad-сітки, однак якість edge flow у зонах суглобів усе ще потребує ручного доопрацювання технічних художників [5]. Таким чином, дослідження показують, що автоматизовані системи поки що не забезпечують рівня якості топології суглобів, необхідного для виробничих проєктів.

У сфері генерації 3D-форм на основі штучного інтелекту активно розвиваються сервіси, що створюють базові 3D-моделі за текстовими або візуальними промптами. Зокрема, платформи на кшталт TripoSG, Meshy, Kaedim демонструють можливість швидкого отримання високодеталізованих об'ємних форм, які можуть слугувати «volumetric guides» для подальшої професійної ретопології [6; 7]. При цьому в спеціалізованих матеріалах наголошується, що для кінематографічних крупних планів суворі quad-топологія та контрольована структура ребрових петель залишаються «незамінним стандартом» для уникнення артефактів subdivision та забезпечення передбачуваної деформації при ригінгу [6]. Тому, незважаючи на вражаючі результати при генерації простих об'єктів, для складних персонажів із чіткими вимогами до топології ці інструменти залишаються переважно допоміжними.

Підсумовуючи, вище сказане, можемо стверджувати, що сучасні дослідження та індустріальні практики підтверджують:

- Catmull–Clark subdivision і quad-topology залишаються теоретичною та практичною основою для побудови анімаційно-придатних 3D-моделей персонажів [2–4];
- алгоритмічна та AI-ретопологія значно прискорюють підготовку сіток, але не гарантують достатньої якості топології суглобів без ручного втручання [1; 5];
- AI-генерація 3D-форм є найбільш ефективною на стадії пошуку силуету та блокінгу, тоді як фінальна топологія для ригінгу й анімації все ще потребує ручного полігонального моделювання [6; 7].

Методи та засоби дослідження. Для полігонального моделювання та контролю топології використано Autodesk Maya, що забезпечує повний набір інструментів для ретопології та subdivision-моделювання [8]. Autodesk Maya – галузевий стандарт у виробництві персонажів для відеоігор та кіно, що забезпечує повний набір інструментів полігонального моделювання, зручну систему роботи з топологією та інтеграцію з інструментами ретопології та анімації.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Моделювання будь-якого 3D-об'єкту виконується у кілька послідовних етапів. На першому етапі – блокінг (рис.1) – визначено загальні пропорції та силует персонажа за допомогою базових геометричних примітивів: куб, циліндр, сфера. Блокінг виконується навмисно грубо і не є фінальною геометрією – його мета полягає у перевірці композиції та співвідношення частин тіла ще до початку детальної роботи.

На другому етапі виконувалась деталізація геометрії. Основними інструментами стали Extrude для витягування граней і формування виступів та заглиблень, Bevel для скошування ребер і формування переходів між площинами, Loop cut для додавання додаткових ребрових петель у зонах суглобів. Для забезпечення симетрії застосовувався інструмент дзеркального відображення (Mirror), що дозволило вдвічі скоротити обсяг ручної роботи.

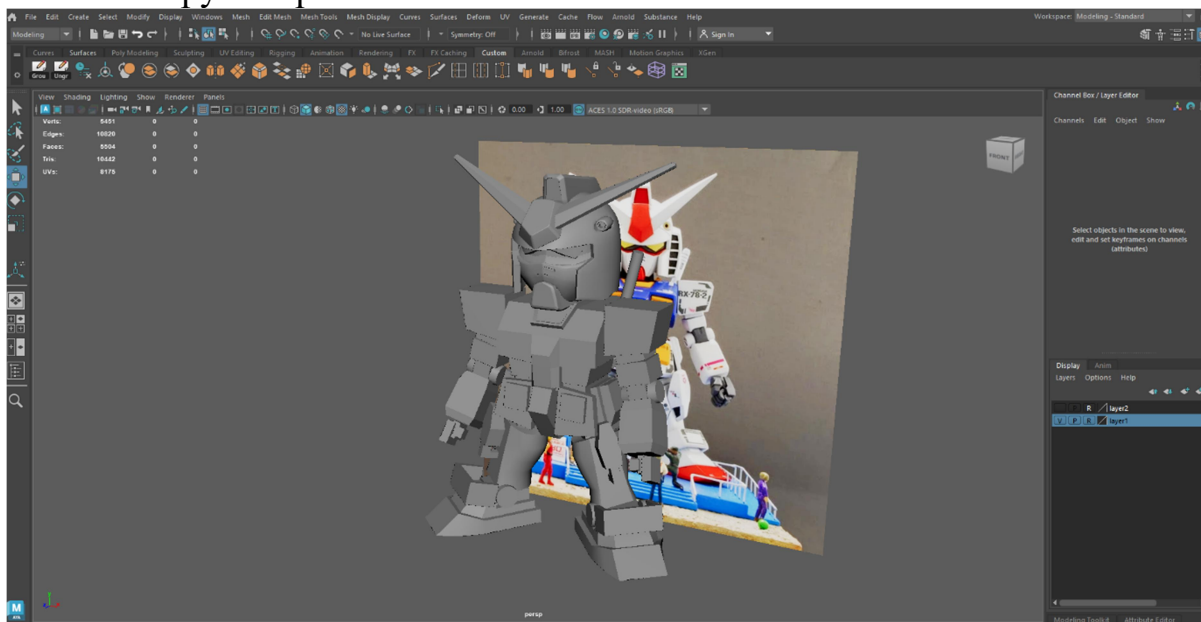


Рис.1. Блокінг персонажа (початковий етап)

Основну увагу було приділено топологічній структурі суглобів (рис. 2): колінних, ліктьових і плечових. Суглоби є найкритичнішим зонами моделі з точки зору анімації, оскільки саме тут геометрія зазнає найбільшої деформації при русі. Для кожного суглоба формувалась базова циліндрична форма з подальшою адаптацією під референс. Кількість

ребрових петель у зонах суглобів підбиралась таким чином, щоб при згинанні не виникало небажаних складок і деформацій.

Якість поверхні контролювалась у режимі Smooth shading із відображенням Smooth Preview, що дозволяло в режимі реального часу бачити результат Subdivision без фактичного збільшення кількості полігонів. Цей інструмент виявляв проблемні ділянки – трикутники, n-gons, вершини з некоректним числом ребер – що дозволяло своєчасно виправляти топологію.

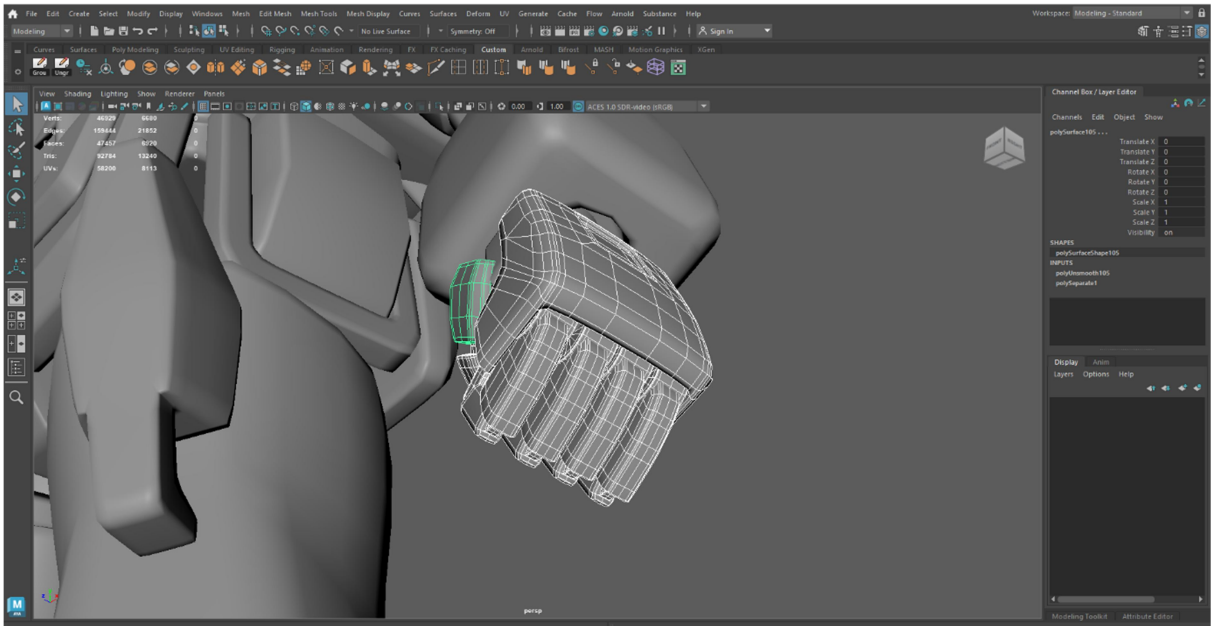


Рис. 2. Топологія моделі (wireframe). Деталізація суглобів

Окремим етапом стало моделювання голови персонажа (рис. 3). Голова є найважливішим елементом для впізнаваності і загального читання силуету, тому тут вимоги до точності форм і чистоти топології були найвищим.

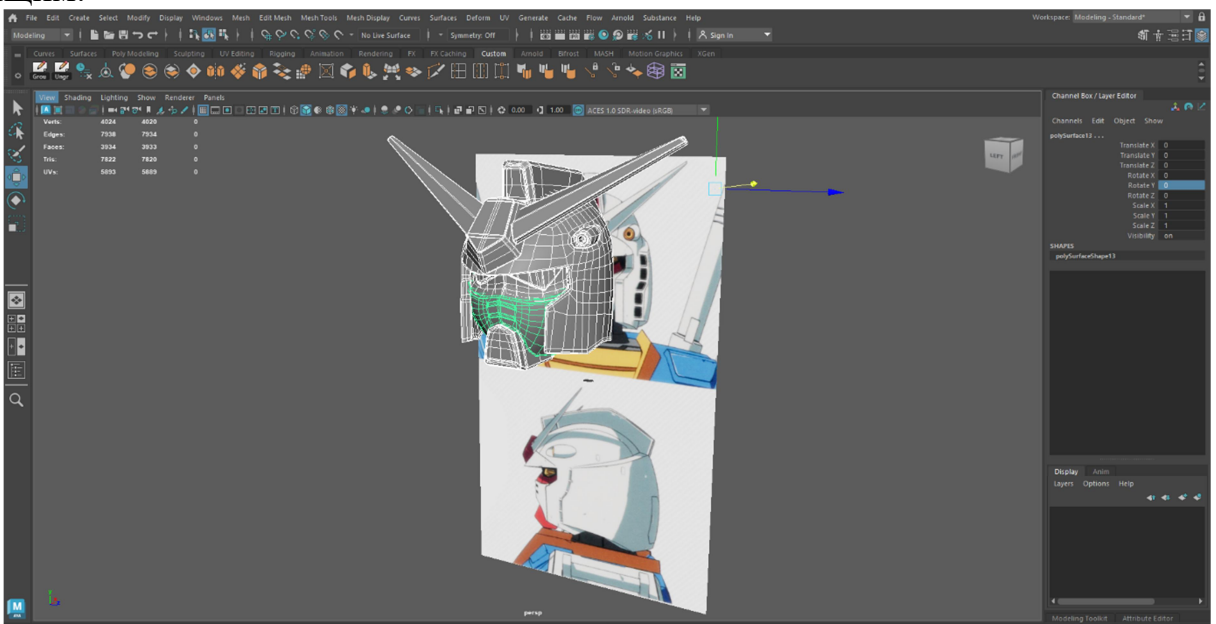


Рис.3. Деталізація голови персонажа

У рамках дослідження було проаналізовано можливості сучасних AI-інструментів як допоміжного засобу у процесі моделювання mesh-персонажа. Розглянуто два основні напрямки застосування: автоматична ретопологія готової геометрії та генерація базових 3D-форм.

Автоматична ретопологія. Вбудований інструмент Remesh у Maya, а також зовнішні рішення на зразок Instand Meshes були протестовані на деталізованих ділянках моделі. Алгоритми автоматичної ретопології показали задовільні результати на рівних поверхнях корпусних панелей – там, де геометрія рівномірна і не вимагає спеціальної організації потоків ребер. Проте у зонах суглобів алгоритми не змогли забезпечити необхідну організацію ребрових петель. Автоматично згенерована топологія колінного суглоба, наприклад, не враховувала вісь згинання і напрямок деформації, що призводило до некоректної поведінки геометрії при симуляції руху. виправлення таких ділянок вручну займало більше часу, ніж їх первинне моделювання з нуля.

AI-генерація базових форм. Сервіси генерації 3D-форм на основі нейронних мереж – зокрема Meshy та TripoSG – дозволяють отримати базову геометрію за текстовим або зображувальним промптом. У рамках дослідження було згенеровано кілька варіантів базових форм для окермих елементів броні mesh-персонажа. Результати генерації виявились корисними на стадії пошуку форм і ескізування – як візуальний референс або відправна точка для подальшого ручного моделювання. Безпосереднє використання згенерованої геометрії у виробничому пайплайні виявилось неможливим через нерегулярну топологію, наявність n-gon і трикутників, а також загальну непридатність до Subdivision і ригінгу.

Таким чином, AI-інструменти виявились найефективнішими у ролі генераторів ідей і референсів, а не як пряма заміна ручного моделювання. Найпродуктивніший сценарій – використання AI для швидкого отримання загального вигляду елемента, після чого художник відтворює цю форму вручну з коректною топологією.

У результаті виконання роботи було створено повноцінну 3D-модель персонажа типу mesh, що відповідає обраному референсу та має коректну топологію структуру, придатну для подальшого використання у виробничому пайплайні. Розроблена модель (рис. 4) характеризується таким показниками:

- правильно організована топологія з переважним використанням чотирикутних полігонів (quads) у всіх ключових зонах;
- відсутність видимих артефактів при застосування Subdivision (Smooth Preview, рівень 2);
- коректна організація ребрових петель у зонах суглобів, що забезпечує природну деформацію при анімації;
- зображення впізнаваного силуету персонажа відповідно до референсу;

– логічна побудова внутрішніх технічних деталей і механічних елементів.

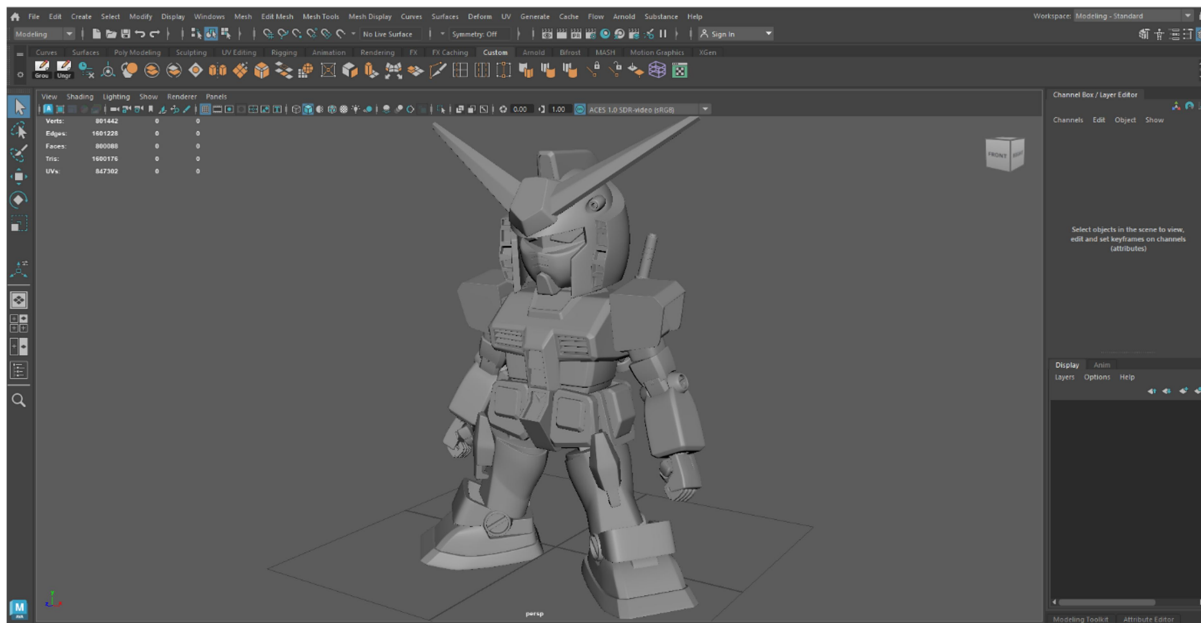


Рис.4. Загальний вигляд завершеної 3D-моделі персонажа

Порівняльний аналіз ручного та AI-асистованого підходів показав, що ручне полігональне моделювання залишається єдиним методом, що гарантує реальну цінність на стадіях пошуку форм, ескізування і як допоміжний референс – що суттєво скорочує час на підготовчі етапи.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз ручного та AI-асистованого підходів до моделювання

Критерій	Ручне моделювання	AI-інструменти
Якість топології суглобів	Висока (повний контроль)	Низька (вимагає доопрацювання)
Швидкість	Низька	Висока
Контроль результату	Повний	Обмежений
Придатність до анімації	Висока	Потребує виправлень
Ефективність для блокінгу	Середня	Висока
Потреба у досвіді	Висока	Низька

ВИСНОВКИ

У ході дослідження підтверджено, що правильна топологічна структура є визначальним фактором якості 3D-моделі персонажа типу mesh. Недотримання принципів quad-topology і некоректна організація ребрових петель у зонах суглобів безпосередньо призводять до проблеми при подальшому згладжуванні та анімації, які неможливо виправити без суттєвого перероблення геометрії.

Дослідження показало, що AI-інструментарій не є заміною ручного моделювання в задачах, де якість топології є критичною. Натомість вони ефективно функціонують як допоміжний засіб на підготовчих етапах – генерації референсів, пошук форм, прикорений блокінг. Комбінований підхід, при якому AI використовується на ранніх стадіях, а ручне моделювання – для фінального геометрії, виявився найбільш ефективним з точки зору балансу між швидкістю та якістю результату.

Отримані результати підтверджують актуальність подальшого розвитку AI-інструментів у напрямку покращення якості автоматичної ретопології суглобних зон, що відкрило б можливість для їх повноцінного використання у виробничих пайплайнах. Водночас отримала модель є повністю придатною до використання у подальших етапах пайплайну: UV-розгортці, текстурованні, ригінгу та анімації.

ДЖЕРЕЛА

1. Botsch M., Kobbelt L., Pauly M., Alliez P., Lévy B. Polygon Mesh Processing. Boca Raton: CRC Press, 2010. 250 p.
2. Catmull E., Clark J. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. Computer-Aided Design. 1978. Vol. 10, No. 6. P. 350–355.
3. Zorin D., Schröder P. Subdivision for modeling and animation. SIGGRAPH Course Notes. 2000. 54 p. <https://graphics.stanford.edu/courses/cs348a-21-winter/Papers/zorin-subdivision00.pdf>
4. Kuth B., Oberberger M., Chajdas M., Meyer Q. Edge-Friend: Fast and deterministic Catmull–Clark subdivision surfaces // Computer Graphics Forum. 2023. Vol. 42, no. 8. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.14863> URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/cgf.14863>
5. Tripo Team. AI Retopology Workflows: Automating 3D Asset Optimization. URL: <https://www.tripo3d.ai/tutorials/retopology-ai-tutorials-automate-workflows> (дата звернення: 29.04.2026).
6. Tripo AI. AI Quad Topology Workflow for Cinematic Close-Ups. 2026. URL: <https://www.tripo3d.ai/media-production/ai-quad-topology-workflow-cinematic-close-ups> (дата звернення: 29.04.2026).
7. Meshy AI. Meshy 3D Generation Platform. URL: <https://www.meshy.ai> (дата звернення: 29.04.2026).

8. Autodesk Maya Documentation. URL: <https://help.autodesk.com/view/MAYAUL/2027/ENU/> (дата звернення: 29.04.2026).

9. Abramov, V., Astafieva, M., Boiko, M., Bodnenko, D., Bushma, A., Vember, V., Hlushak, O., Zhyltsov, O., Ilich, L., Kobets, N., Kovaliuk, T., Kuchakovska, H., Lytvyn, O., Lytvyn, P., Mashkina, I., Morze, N., Nosenko, T., Proshkin, V., Radchenko, S., & Yaskevych, V. (2021). Theoretical and practical aspects of the use of mathematical methods and information technology in education and science. <https://doi.org/10.28925/9720213284km>