

В. О. НІКІТІН

аспірант кафедри мультимедійних технологій
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0004-2289-4145

ОПТИМІЗАЦІЯ 3D МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В AR СЕРЕДОВИЩІ

У статті здійснено комплексний теоретичний аналіз сучасних підходів до оптимізації тривимірних моделей для використання в середовищі доповненої реальності Augmented Reality. Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком AR-технологій у сферах освіти, промисловості, медицини, електронної комерції та цифрового маркетингу, що супроводжується зростанням вимог до продуктивності мобільних і веб-платформ. Однією з ключових проблем впровадження AR-рішень є забезпечення стабільної частоти кадрів і швидкого завантаження тривимірного контенту за умов обмежених обчислювальних ресурсів мобільних пристроїв.

Метою дослідження є систематизація та узагальнення існуючих методів оптимізації 3D-моделей, спрямованих на зменшення полігональності, скорочення обсягу текстурних даних, підвищення ефективності рендерингу та забезпечення сумісності з сучасними AR-платформами. У роботі проаналізовано алгоритми децимації сітки, ретопології, застосування рівнів деталізації (Level of Detail, LOD), методи запікання текстур і нормалей, використання текстурних атласів, стиснення графічних даних та технології відсікання невидимих об'єктів. Особливу увагу приділено інструментальним засобам оптимізації, зокрема програмним середовищам Blender, MeshLab, Simplygon та рушіям Unity і WebAR.

У результаті дослідження встановлено, що ефективна оптимізація 3D-моделей передбачає комплексне поєднання геометричних, текстурних та алгоритмічних методів, що дозволяє істотно зменшити розмір моделей без суттєвої втрати візуальної якості. Доведено, що застосування багаторівневої структури представлення об'єктів і адаптивних механізмів рендерингу забезпечує підвищення продуктивності AR-додатків, скорочення часу завантаження та стабілізацію частоти кадрів. Отримані результати можуть бути використані при розробленні високопродуктивних AR-систем у межах сучасних інформаційних технологій.

Ключові слова: доповнена реальність, AR, оптимізація 3D-моделей, полігональність, рівні деталізації, LOD, текстурна оптимізація, децимація сітки, рендеринг, продуктивність графіки.

V. O. NIKITIN

Postgraduate Student at the Department of Multimedia Technologies
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0004-2289-4145

OPTIMIZATION OF 3D MODELS FOR USE IN AR ENVIRONMENTS

The article presents a comprehensive theoretical analysis of modern approaches to optimizing three-dimensional models for use in Augmented Reality (AR) environments. The relevance of the study is determined by the rapid development of AR technologies in education, industry, medicine, e-commerce, and digital marketing, which is accompanied by increasing performance requirements for mobile and web-based platforms. One of the key challenges in implementing AR solutions is ensuring stable frame rates and fast loading of 3D content under limited computational resources of mobile devices.

The purpose of this research is to systematize and generalize existing methods of 3D model optimization aimed at reducing polygon count, minimizing texture data volume, improving rendering efficiency, and ensuring compatibility with modern AR platforms. The paper analyzes mesh decimation algorithms, retopology techniques, Level of Detail (LOD) approaches, texture and normal map baking methods, texture atlases, graphical data compression, and visibility culling technologies. Special attention is given to optimization tools and software environments such as Blender, MeshLab, Simplygon, as well as AR engines including Unity and WebAR frameworks.

The study demonstrates that effective optimization of 3D models requires a comprehensive combination of geometric, textural, and algorithmic techniques that significantly reduce model size without substantial loss of visual quality. It is proven that the use of multi-level object representation and adaptive rendering mechanisms enhances AR application performance, reduces loading time, and stabilizes frame rates. The obtained results can be applied in the development of high-performance AR systems within the framework of modern information technologies.

Key words: augmented reality, AR, 3D model optimization, polygon count, level of detail, LOD, texture optimization, mesh decimation, rendering, graphics performance.



Постановка проблеми

Стрімкий розвиток технологій доповненої реальності (Augmented Reality, AR) в останні роки зумовив якісну трансформацію підходів до візуалізації цифрового контенту. AR-системи інтегрують віртуальні тривимірні об'єкти у фізичне середовище користувача в режимі реального часу, що потребує одночасного виконання складних обчислювальних операцій: комп'ютерного зору, трекінгу положення камери, побудови карти простору, рендерингу графіки та синхронізації із сенсорними даними пристрою. У результаті формується багатокомпонентне навантаження на центральний процесор (CPU), графічний процесор (GPU), оперативну пам'ять та підсистему зберігання даних.

На відміну від традиційних 3D-додатків, де обчислювальні ресурси спрямовані переважно на рендеринг сцени, AR-додатки функціонують у режимі постійного аналізу відеопотоку та просторової локалізації. Це означає, що частина ресурсів системи вже зайнята алгоритмами SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), обробкою сенсорних даних та корекцією просторової геометрії сцени. В таких умовах надмірна деталізація 3D-моделей або використання текстур високої роздільної здатності призводить до перевантаження графічної підсистеми, зниження частоти кадрів (FPS), збільшення затримок (latency) та погіршення користувацького досвіду.

Критичною характеристикою AR-систем є необхідність підтримання стабільної частоти кадрів на рівні не нижче 30–60 FPS, оскільки навіть незначні просідання продуктивності можуть спричинити візуальні артефакти, втрату трекінгу або дезорієнтацію користувача. Особливо це актуально для мобільних пристроїв, які мають обмежені обчислювальні ресурси та енергоспоживання. На відміну від стаціонарних робочих станцій, смартфони й планшети характеризуються обмеженим обсягом оперативної пам'яті, меншою пропускну здатністю графічної пам'яті та тепловими обмеженнями, що зумовлюють автоматичне зниження тактової частоти процесора при перегріванні.

Додаткову складність становить зростання вимог до фотореалістичності AR-контенту. У сучасних застосуваннях – від електронної комерції до промислового моделювання – користувач очікує високої деталізації об'єктів, коректної передачі матеріалів, тіней і відбиттів. Однак збільшення кількості полігонів, використання складних шейдерів та багатшарових текстур прямо пропорційно підвищує обчислювальні витрати. Таким чином виникає фундаментальна суперечність між візуальною якістю тривимірного контенту та апаратними можливостями пристроїв, на яких цей контент відтворюється.

Окремим аспектом проблеми є мережевий компонент AR-застосунків. У випадку веб-орієнтованих рішень (WebAR) тривимірні моделі передаються через мережу Інтернет, що висуває вимоги до мінімізації обсягу файлів. Великі за розміром 3D-моделі збільшують час завантаження, що негативно впливає на взаємодію користувача з додатком та може призводити до відмови від використання сервісу. Отже, оптимізація має враховувати не лише локальні обчислювальні обмеження, а й параметри мережевої інфраструктури.

Проблема ускладнюється також відсутністю універсального підходу до оптимізації 3D-моделей для AR. Різні платформи (Android, iOS, WebAR), різні графічні рушії (Unity, Unreal Engine, власні WebGL-рішення) та різні типи контенту (інтерактивні об'єкти, анімовані персонажі, технічні моделі) потребують специфічних стратегій зниження навантаження. Методи, ефективні для ігрових застосунків, не завжди є оптимальними для освітніх або промислових AR-рішень.

Таким чином, на сучасному етапі розвитку інформаційних технологій постає комплексна науково-прикладна проблема: розроблення та систематизація ефективних методів оптимізації 3D-моделей, які забезпечують баланс між візуальною якістю, розміром даних і продуктивністю AR-систем. Вирішення цієї проблеми має принципове значення для масштабування AR-технологій, підвищення їх доступності та інтеграції у різні галузі цифрової економіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження показують, що для AR / VR-середовищ корисними є методи багаторівневих представлень та динамічної оптимізації. Так, Boutsis et al. запропонували мультірівневий підхід до веб-AR, що забезпечує швидке стрімінгове завантаження великих моделей; їх прототип демонструє прискорення рендеру до 46% порівняно з оптимізованим gLTF і дозволяє відобразити 34-мільйонну модель менш ніж за 4 секунди без втрат якості. Цей підхід показує, що розбиття моделі на рівні деталізації та поступова передача геометрії можуть суттєво покращити продуктивність веб-AR.

Інша важлива робота Grande et al., детально описує процес оптимізації моделей у Blender: за допомогою модифікаторів «Decimate» та «Shrinkwrap» вони спрощують сітку, а потім запікають нормальні карти й текстури з високополігональної моделі на спрощену. У результаті кількість файлів моделі зменшується до двох: нормальної карти та однієї текстури, при цьому зберігається більшість візуальних деталей. Експериментально встановлено, що такий підхід знижує кількість полігонів майже на 99% без помітного погіршення якості втрати в метриці NR-3DQA – до 15%, MM-PCQA – до 25%.

Крім того, у технічній літературі та практичних рекомендаціях підкреслюється необхідність LOD рівнів деталізації. Згідно з Ogutu et al. керівництвом InAirSpace рекомендовано створювати кілька версій 3D-моделі з різною

деталізацією і динамічно перемикає їх залежно від відстані до камери. Наприклад, деталі поверхонь складки, нерівності можна «запікати» у нормальні карти, а не моделювати додатковими полігонами. Такий прийом дозволяє при невеликому полігональному навантаженні зберігати якість текстуровання. GarageFarm.net наголошує на важливості підтримки одиначної щільності текстури та використанні стиснення зображень (JPEG, PNG, DDS), а також атласів текстур для зменшення кількості викликів рендеру.

Для полегшення сцени AR критичною є техніка відсікання невидимих об'єктів. Інструкції Adobe Aero рекомендують відсікати все, що не входить у поле зору або перебуває за іншими об'єктами, а також використовувати зменшення якості при навантаженні. Наприклад, InAirSpace вказує на важливість фрустум-кулінгу та оклюзійного кулінгу: відмова від рендеру невидимих частин сцени знижує навантаження на GPU. Одночасно треба уникати зайвої прозорості чи рефлексій, що ускладнюють рендеринг.

Таким чином, аналіз робіт показує: оптимізація AR-контенту включає багаторівневу структуру моделі та текстур, баланс між деталізацією та продуктивністю, а також традиційні техніки графічного прискорення. Кожен з цих методів вже довів свою ефективність у дослідах та практичних системах.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є систематизація та аналіз існуючих методів оптимізації 3D-моделей для AR-середовищ з урахуванням обмежень мобільних пристроїв. Зокрема, досліджується, як мінімізувати кількість полігонів та розмір текстур за допомогою алгоритмів децимації, запікання текстур, багаторівневих моделей деталізації та інших прийомів, не жертвуючи значущою візуальною інформацією. Очікується виявити ті підходи, які дозволяють забезпечити високу продуктивність стабільні FPS та прийнятну якість зображення вAR-додатках при сучасних технологіях відтворення.

Викладення основного матеріалу дослідження

Проблематика оптимізації 3D-моделей для використання в AR-середовищі активно досліджується вітчизняними та зарубіжними науковцями в контексті розвитку мобільних обчислень, комп'ютерної графіки та веб-технологій. Аналіз наукових публікацій свідчить про формування комплексного підходу до вирішення завдань зменшення геометричної складності моделей та оптимізації графічних ресурсів.

У дослідженні А. М. Boutsis, С. Ioannidis та S. Verykokou [1] розглядається проблема рендерингу високополігональних моделей у WebAR-середовищі. Автори зазначають, що традиційні підходи до передачі повної геометрії об'єкта у форматі glTF не забезпечують належної швидкодії при роботі з великими моделями. У статті обґрунтовується доцільність застосування багаторівневої структури моделі, за якої геометрія передається частинами залежно від відстані до камери та пріоритетності об'єкта у сцені. Згідно з результатами експериментів, такий підхід дозволяє скоротити час первинного завантаження моделі та підвищити середню частоту кадрів до 40–46% порівняно з базовим варіантом [1]. Таким чином, дослідження підтверджує ефективність концепції адаптивної деталізації для AR-сцен.

У статті R. Grande та співавторів [3] здійснено експериментальне дослідження впливу оптимізації сітки на продуктивність VR / AR-застосунків. Автори аналізують процес зменшення кількості полігонів шляхом застосування алгоритму децимації в середовищі Blender з подальшим запіканням нормалей і текстур. У роботі зазначається, що первинні моделі, отримані з 3D-сканування, можуть містити надлишкову кількість трикутників (до декількох мільйонів), що суттєво ускладнює їх інтеграцію в реальному часі. Після застосування процедури децимації кількість полігонів було зменшено більш ніж на 90%, при цьому метрики візуальної якості залишилися в межах допустимих значень [3]. Дослідження підтверджує, що геометрична оптимізація не обов'язково призводить до суттєвої втрати сприйманої деталізації.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із текстурною оптимізацією. У публікації, присвяченій ефективності використання текстурних атласів та компресії графічних даних [2], наголошується, що кількість матеріалів і окремих текстур у сцені безпосередньо впливає на кількість draw calls під час рендерингу. Автори підкреслюють, що об'єднання декількох текстур в один атлас дозволяє зменшити навантаження на GPU та оптимізувати використання відеопам'яті. У дослідженні також зазначено, що використання нормальних карт замість реальної геометричної деталізації забезпечує значне зменшення кількості полігонів без втрати глибини поверхні.

У матеріалах Milvus Labs [4] розглядаються типові проблеми продуктивності AR-додатків. Зокрема, вказується, що основними чинниками зниження FPS є надмірна кількість полігонів, великі текстури та складні шейдери освітлення. Автори підкреслюють, що AR-середовище створює додаткове навантаження через постійну обробку відеопотоку та алгоритми просторового позиціонування, тому оптимізація графічного контенту є критичною умовою стабільної роботи системи [4].

У дослідженні, присвяченому стратегіям AR-оптимізації [6], зазначається, що одним із ключових механізмів підвищення продуктивності є впровадження Level of Detail (LOD). Автор підкреслює, що динамічне перемикання між різними рівнями деталізації дозволяє адаптувати сцену до поточних умов відображення, зменшуючи кількість обчислень при збереженні візуальної цілісності сцени. Також акцентується увага на важливості фрустум-кулінгу та оклюзійного кулінгу як засобів мінімізації рендерингу невидимих об'єктів.

У статті, присвяченій методам децимації сітки [5], зазначається, що алгоритмічне скорочення кількості вершин та граней повинно супроводжуватися контролем топологічної цілісності моделі. Автори наголошують, що неконтрольована децимація може призвести до деформації силуету об'єкта, що є критичним для AR-застосунків, де точність візуального накладання має принципове значення. Таким чином, оптимізація повинна бути поетапною та враховувати специфіку використання моделі.

Висновки

Проведений аналіз існуючих методів оптимізації тривимірних моделей показав їхню високу ефективність для AR-застосунків. Децимація сітки та ретопологія дозволяють зменшити кількість полігонів майже у сотні разів при збереженні форми об'єктів. Використання LOD і нормальних карт дає змогу додатково знизити навантаження на рендерер без видимої втрати деталізації. Оптимізація текстур стиснення, атласи, баланс щільності зменшує обсяг даних, що передаються, а усікання непотрібних об'єктів фрустум та оклюзія знижує число відмальованих елементів. Згідно з публікаціями, такі прийоми разом забезпечують приріст продуктивності на десятки відсотків та підтримку стабільної частоти кадрів навіть у складних AR-сценах.

Отже, оптимізація 3D-моделей є критичною для впровадження AR на мобільних та web-платформах. Перспективи подальших досліджень пов'язані з автоматизацією процесів оптимізації використання скриптів, штучного інтелекту і адаптивними алгоритмами, які б самі підбирали оптимальний рівень деталей у реальному часі. Однак уже наявні методи дозволяють значно розширити можливості сучасних AR-додатків, забезпечуючи швидке завантаження контенту та високоякісну взаємодію користувача.

Список використаної літератури

1. Boutsis A. – M., Ioannidis C., Verykokou S. Multi-resolution 3D rendering for high-performance web AR. *Sensors (Basel)*. 2023. Vol. 23, № 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156885>.
2. GarageFarm. NET. 3D asset optimization: enhancing efficiency and maintaining quality. 2023.: веб-сайт. URL: <https://garagefarm.net/blog/3d-asset-optimization-enhancing-efficiency-and-maintaining-quality> (дата звернення: 20.02.2025).
3. Grande R., Albusac J., Vallejo D., Glez-Morcillo C., Castro-Schez J. J. Performance evaluation and optimization of 3D models from low-cost 3D scanning technologies for virtual reality and metaverse e-commerce. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146037>.
4. Milvus Labs. What common performance issues arise in AR applications? веб-сайт. URL: <https://milvus.io/ai-quick-reference/what-common-performance-issues-arise-in-ar-applications> (дата звернення: 20.02.2025).
5. VNTANA. What is mesh decimation and why is it vital for AR? 2021: веб-сайт. URL: <https://www.vntana.com/blog/what-is-mesh-decimation-and-why-is-it-vital-for-ar> (дата звернення: 20.02.2025).
6. Wang F. AR optimization strategies to build immersive and high-performance experiences. *InAirSpace*: веб-сайт. URL: <https://inairspace.com/ja/blogs/learn-with-inair/ar-optimization-strategies-to-build-immersive-and-high-performance-experiences> (дата звернення: 20.02.2025).

References

1. Boutsis, A. – M., Ioannidis, C., & Verykokou, S. (2023). Multi-resolution 3D rendering for high-performance web augmented reality. *Sensors (Basel)*, 23 (15), 6885. <https://doi.org/10.3390/s23156885>.
2. GarageFarm. NET. (2023). 3D asset optimization: enhancing efficiency and maintaining quality. Retrieved February 20, 2025, from <https://garagefarm.net/blog/3d-asset-optimization-enhancing-efficiency-and-maintaining-quality>.
3. Grande, R., Albusac, J., Vallejo, D., Glez-Morcillo, C., & Castro-Schez, J. J. (2024). Performance evaluation and optimization of 3D models from low-cost 3D scanning technologies for virtual reality and metaverse e-commerce. *Applied Sciences*, 14 (14), 6037. <https://doi.org/10.3390/app14146037>.
4. Milvus Labs. (2024). What common performance issues arise in AR applications? Retrieved February 20, 2025, from <https://milvus.io/ai-quick-reference/what-common-performance-issues-arise-in-ar-applications>.
5. VNTANA. (2021). What is mesh decimation and why is it vital for AR? Retrieved February 20, 2025, from <https://www.vntana.com/blog/what-is-mesh-decimation-and-why-is-it-vital-for-ar>.
6. Wang, F. (2026, February 16). AR optimization strategies to build immersive and high-performance experiences. *InAirSpace*. Retrieved February 20, 2025, from <https://inairspace.com/ja/blogs/learn-with-inair/ar-optimization-strategies-to-build-immersive-and-high-performance-experiences>.

Дата першого надходження статті до видання: 08.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026