

О. Н. Романюк, д-р техн. наук, проф.; В. П. Майданюк, канд. техн. наук, доц.;
О. О. Новосельцев

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ РЕЛЬЄФНОГО ТЕКСТУРУВАННЯ ДЛЯ ВИСОКОРЕАЛІСТИЧНОГО РЕНДЕРИНГУ

У статті наведено аналіз і систематизацію методів рельєфного накладання текстур, які відіграють важливу роль у створенні реалістичних зображень у системах комп'ютерної графіки. Рельєфне текстурування розглядається як ефективна альтернатива збільшенню кількості полігонів, що дозволяє формувати ілюзію мікрорельєфу поверхні з високим ступенем деталізації без значного ускладнення геометрії об'єкта. Завдяки використанню карт нормалей, карт висот, шумових функцій та процедурної генерації текстур, досягається баланс між візуальною точністю та швидкодією графічного відтворення. Один із напрямків особливостей є широке використання шейдерних програм і апаратного прискорення для обчислення освітлення, глибини, тіней та структури поверхні в режимі реального часу.

Запропоновано класифікацію методів рельєфного текстурування, яка ґрунтується на характері впливу на геометрію моделі. Визначено три основні категорії: імітаційні методи (впливають лише на вигляд поверхні без зміни її форми), геометричні методи (змінюють координати вершин або додають додаткові елементи до сітки), та комбіновані або адаптивні методи (поєднують обидва підходи залежно від умов візуалізації). До імітаційних методів віднесено нормал мепінг, текстурування за картою висот, паралаксне накладання з самозатінненням і метод з проникненням променя. До геометричних – зміщення вершин, тесселяція, мікрополігональне подрібнення та об'ємне текстурування. Комбіновані методи передбачають динамічне перемикання технік залежно від відстані до камери (технологія зміни рівня деталізації), обчислювального навантаження та складності сцени.

Наведено таблиці порівняння швидкодії, реалістичності та сумісності з графічними рушіями для кожної групи методів.

Проведені дослідження можуть бути використані для вибору, комбінування та оптимізації методів рельєфного текстурування при побудові інтерактивних тривимірних середовищ, створенні симуляторів, візуалізаційних панелей та цифрового мистецтва. Запропонована класифікація дозволяє адаптувати методи відповідно до вимог обчислювального середовища та завдань користувача, а також є відправною точкою для подальших досліджень у напрямі розробки нових гібридних алгоритмів. Це перспективи для побудови ефективних рендерингових систем нового покоління, орієнтованих на реалістичність, швидкодію та інтеграцію з іншими інформаційно-візуальними технологіями.

Ключові слова: рендеринг, рельєфне текстурування, імітаційні методи, геометричні методи, displacement mapping, паралаксне зміщення, воксельне текстурування.

Вступ

Рельєфне текстурування [1 – 12] – це метод у комп'ютерній графіці, який дає змогу створювати ілюзію об'ємної поверхні без необхідності збільшувати кількість полігонів у моделі. Замість складного геометричного моделювання дрібних деталей використовуються спеціальні карти (нормалей, висот або інші), що змінюють вигляд поверхні під час освітлення та огляду. Завдяки цьому поверхня здається більш реалістичною та детальною.

У найпростішому випадку ефект досягається за допомогою карти нормалей, яка визначає, як змінюється напрям відбиття світла у кожній точці. У складніших варіантах застосовуються карти висот та алгоритми паралаксу [1, 10, 12], які створюють відчуття

глибини при зміні кута огляду. Для максимальної точності використовуються методи зміщення вершин та тесселяції, які реально змінюють геометрію поверхні.

Основні переваги рельєфного текстуровання [10] полягають у тому, що воно забезпечує високу якість зображення при відносно невеликих обчислювальних витратах. По-перше, воно значно знижує потребу у великій кількості полігонів, адже деталізація переноситься у текстури. По-друге, дозволяє змінювати рівень деталізації залежно від відстані до об'єкта: на далеких планах використовуються прості карти, а на близьких – більш складні методи. По-третє, рельєфне текстуровання забезпечує фотореалістичність, особливо у поєднанні з фізично достовірним освітленням, що важливо для ігор, віртуальної реальності та кіно.

Класифікація методів рельєфного текстуровання є необхідною передумовою для ефективного вибору, впровадження та оптимізації графічних рішень у різноманітних галузях – від комп'ютерних ігор і кіно до наукової візуалізації та віртуальної реальності.

Наявність чітко структурованої класифікації дозволяє систематизувати знання, розрізняти можливості різних методів, співвідносити їх із вимогами конкретних проєктів і приймати обґрунтовані рішення. Класифікація сприяє розумінню технічних особливостей методів. Вона дозволяє чітко розділити підходи за принципами дії: оптичні, геометричні та гібридні. Це допомагає розробникам і дизайнерам краще орієнтуватися в тому, які методи працюють на рівні пікселя, а які змінюють вершини, що впливає на вибір відповідного інструменту в залежності від цілей (реалістичність, продуктивність, сумісність з VR/AR).

Крім того, класифікація необхідна для порівняльного аналізу ефективності методів. Завдяки їй можна об'єктивно оцінити переваги та недоліки кожного підходу: які методи найкраще підходять для відображення мікротекстур, які забезпечують реальну геометричну зміну, а які є компромісом між продуктивністю та якістю. Це особливо важливо під час створення великих візуалізаційних проєктів, де від грамотного вибору методу залежить швидкість рендерингу та рівень деталізації.

Класифікація є основою для майбутнього вдосконалення технологій. Розуміння того, які методи існують, їхні обмеження та способи комбінування, відкриває можливості для створення нових гібридних алгоритмів, які поєднують переваги різних підходів.

Таким чином, класифікація методів рельєфного текстуровання є не лише теоретичним інструментом, а й практично значущим механізмом, який дозволяє оптимізувати графічні рішення, підвищити якість візуалізації, полегшити навчання і сприяти інноваціям у сфері комп'ютерної графіки.

Мета статті – систематизація, узагальнення та критичний аналіз наявних методів рельєфного текстуровання в комп'ютерній графіці з метою формування цілісної класифікації та визначення їх переваг, недоліків і сфер застосування.

Аналіз літературних джерел

Рельєфне текстуровання [1 – 12] – це один із напрямів сучасної комп'ютерної графіки, який дозволяє моделювати складну мікроструктуру поверхонь без значного збільшення кількості полігонів. Воно відіграє важливу роль у 3D-моделюванні, ігровій індустрії, науковій візуалізації та кінематографі.

У науковій літературі особливу увагу приділено методам текстуровання та питанням підвищення продуктивності та практичної реалізації. Завдяки використанню різних підходів, рельєфне текстуровання перетворилося з експериментальної технології на стандартний інструмент більшості сучасних рушіїв. Це робить його одним із ключових факторів розвитку реалістичної графіки у віртуальних середовищах.

У [1] запропоновано алгоритм *parallax occlusion mapping* у реальному часі з урахуванням динамічного освітлення, який поєднує високу якість відображення з ефективністю. Подібні підходи дозволяють досягти значної деталізації без критичного навантаження на GPU. Розвиток методів тесселяції для карт висот, спрямованих на оптимізацію формування

деталей поверхні, розглянуто в [2]. Автори підкреслюють, що оптимізовані схеми поділу геометрії забезпечують компроміс між візуальною якістю та швидкодією.

Проблеми продуктивності та рівнів деталізації аналізуються в [3], де представлено динамічний вибір рівня деталізації з GPU-culling для відтворення складних теренів. Це безпосередньо стосується displacement mapping, адже правильне керування LOD дозволяє мінімізувати надмірні витрати ресурсів. Інший напрям, пов'язаний із формуванням текстур у реальному часі, представлено в [4], де досліджено застосування процедурних шумових функцій (Perlin, Worley) на GPU для генерації складних текстурних структур. Такі методи ефективні для створення реалістичних матеріалів без зберігання великих текстурних карт.

Розширення можливостей рельєфного текстуровування в гібридних рендерингових системах розглянуто в [5]. Зокрема, автори описують використання sparse voxel octrees у поєднанні з трасуванням променів, що забезпечує якісну візуалізацію складних поверхонь у реальному часі. Нові підходи до displacement mapping представлено в [6], де запропоновано метод проєктного відображення для редагованих поверхонь у трасованих середовищах. Це відкриває можливості для інтерактивної роботи з моделями, зокрема у CAD-системах та інженерних додатках. Додаткові оптимізації рендерингу описано в [7], де застосовується адаптивний семплінг текстур і міпмапінг, що дозволяє підвищити продуктивність без втрат у якості.

У [8] розглянуто особливості рельєфного текстуровування для моделей високої деталізації, де основний акцент зроблено на досягненні максимально фотореалістичного ефекту. Автори підкреслюють, що застосування карт нормалей і карт висот дозволяє значно зменшити кількість полігонів у сцені, при цьому зберігаючи візуальну складність поверхні. Особливу увагу приділено тому, що при використанні рельєфного текстуровування навіть прості моделі можуть виглядати як високополігональні, що робить методи незамінними у створенні віртуальних середовищ та ігрових рушіїв нового покоління.

У [9] наведено докладний аналіз сучасного програмного забезпечення для текстуровування, включно з інструментами для створення карт нормалей, карт висот і процедурних текстур. Розглядаються можливості популярних систем, зокрема Substance Designer, xNormal та Blender, у контексті їхньої придатності для генерації матеріалів різної складності. Автори також звертають увагу на алгоритмічні переваги автоматичної генерації текстур, що дозволяє спростити робочий процес дизайнерів і підвищити ефективність розробки великих проєктів.

Практичні GPU-реалізації рельєфного текстуровування детально описано в [10]. Тут зроблено акцент на оптимізації шейдерних програм, які забезпечують баланс між швидкодією та якістю відображення. У роботі наголошено на важливості застосування тесселяції та паралаксного зміщення, які, завдяки обчислювальним можливостям сучасних графічних процесорів, можуть виконуватися в реальному часі навіть у складних візуальних сценах. Окремо зазначено, що правильно налаштовані шейдери дозволяють досягти значного виграшу продуктивності без істотної втрати візуальної правдоподібності.

У [11] досліджено генерацію процедурних текстур для рендерингу. Автори акцентують увагу на тому, що процедурні алгоритми дають змогу формувати нескінченні варіації матеріалів без потреби у великих обсягах збережених даних. Це особливо важливо для інтерактивних додатків, де пам'ять і пропускну здатність відеокарт мають обмеження.

У [12] автори аналізують застосування паралаксного текстуровування для підвищення реалістичності тривимірних зображень. Робота демонструє практичні приклади використання цього методу у візуалізації різних об'єктів — від архітектурних сцен до моделей природного середовища. Показано, що паралаксне текстуровування забезпечує більш виразне сприйняття глибини та деталей порівняно з простим використанням карт нормалей. Дослідження також підтверджує ефективність цього методу у випадках, коли важливо поєднати візуальну якість і продуктивність, наприклад у навчальних симуляціях або інтерактивних візуалізаційних системах.

Класифікація методів рельєфного текстуровання

На відміну від традиційного текстуровання, рельєфне текстуровання додає глибину, змінюючи або реальну геометрію об'єкта, або вигляд його поверхні залежно від освітлення, огляду чи зміни нормалей. Класифікація таких методів поділяється на три основні групи: імітаційні, геометричні та гібридні. Кожна з них має свої підвиди, переваги, обмеження та сферу застосування.

На рис. 1 наведено класифікацію методів рельєфного текстуровання, яку побудовано за характером впливу на геометрію поверхні та способом симуляції рельєфу. Основна ознака, за якою розділені методи, це ступінь імітації або реальної зміни геометрії об'єкта. Визначено три такі класи:

1. Імітаційне текстуровання – методи, які не змінюють реальну геометрію, а лише впливають на візуальне сприйняття (наприклад, карти нормалей, карти висот, паралакс).
2. Геометричне текстуровання – методи, які модифікують вершини або полігони об'єкта (наприклад, зміщення вершин, тесселяція, мікрополігони, вокселі).
3. Гібридне текстуровання – комбіновані методи, які адаптують техніку залежно від відстані до камери, складності сцени або обчислювальних можливостей.



Рис. 1. Класифікація методів рельєфного текстуровання

Імітаційні методи, або методи без зміни геометрії, базуються на зміні візуального ефекту поверхні за допомогою текстур, що модифікують поведінку світла. Найбільш поширеним методом є використання карти нормалей, де кожен піксель зберігає напрям нормалі, завдяки чому формується ефект шорсткої або опуклої поверхні без зміщення самої сітки [1]. Карти висот – інший популярний метод, де яскравість пікселя відповідає його “висоті”, що впливає на вигляд під час освітлення. Особливо важливим у сучасній графіці є паралакс-ефект, що змінює положення текстури залежно від кута огляду. Паралакс із самозатіненням ще більше наближує вигляд до реального, моделюючи затемнення та перекриття виступів [2].

Імітаційні методи рельєфного текстуровання займають важливе місце у комп'ютерній графіці завдяки своїй ефективності та невеликому обчислювальному навантаженню. На

відміну від геометричних методів, які змінюють саму структуру 3D-моделі, імітаційні підходи працюють виключно з візуальними характеристиками поверхні. Їх головна мета – створити переконливе враження опуклостей, заглиблень та мікрорельєфу без зміни геометрії об'єкта. Це особливо корисно в комп'ютерних іграх, мобільних додатках і візуалізаційних системах реального часу, де кожен полігон або вершина мають значення для продуктивності.

Карта нормалей є найпоширенішим методом візуального рельєфного текстуровання. Вона замінює напрям нормалей кожного пікселя на поверхні об'єкта, що впливає на обчислення освітлення під час рендерингу. Така карта, як правило, є трьохканальним зображенням, у якому значення кольору кодують напрям вектора нормалі у локальних або глобальних координатах.

Мапи нормалей (рис. 2) широко застосовуються для покращення візуальної деталізації 3D-моделей без збільшення кількості полігонів, однак їх використання має низку обмежень. Насамперед, такий метод не змінює фізичну геометрію об'єкта – він лише створює ілюзію об'ємності поверхні за рахунок зміни орієнтації нормалей. Це означає, що силуети, тіні й оклюзії залишаються незмінними, а ефект реалізму може втрачатися за зміни ракурсу чи освітлення. У випадках, коли необхідна реальна зміна форми або глибокі рельєфні деталі, мап нормалей недостатньо, і варто звернутись до більш складних технік.

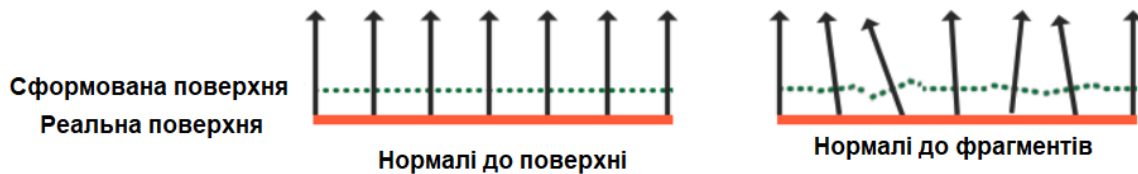


Рис. 2. Карти нормалей

Щоб отримати якісний результат, зазвичай потрібна високополігональна модель, з якої запікається текстура нормалей для low-poly версії. Цей процес вимагає спеціального програмного забезпечення й досвіду роботи з 3D-графікою. До того ж, редагування таких мап вручну є складним, адже інформація про напрямки нормалей зберігається у вигляді кольорів RGB, що важко інтерпретувати без відповідних інструментів.

Карти нормалей [11] споживають додаткові ресурси, оскільки зберігаються як окремі текстури з трьома кольоровими каналами. Це збільшує навантаження на відеопам'ять і пропускну здатність, що особливо критично для реального часу або мобільних пристроїв. У таких випадках може знадобитися оптимізація розміру текстур або компресія без втрати якості.

Карти нормалей зазвичай орієнтовані в дотичному просторі, що прив'язаний до локальної орієнтації моделі та її UV-розгортки. Це означає, що за зміни UV-координат або застосуванні тієї самої мапи до інших об'єктів можуть виникнути візуальні артефакти, зсуви напрямку освітлення або неправильне відображення поверхні. Такі ситуації потребують уважного налаштування UV-карт і обережного повторного використання текстур.

Незважаючи на перелічені недоліки, мапи нормалей залишаються надзвичайно ефективним інструментом для створення візуально насичених 3D-сцен у реальному часі. Вони дозволяють досягти переконливої деталізації за мінімальних витрат ресурсів, забезпечуючи збалансоване співвідношення між продуктивністю та якістю зображення.

Саме тому цей метод широко використовується в комп'ютерних іграх, візуалізації в браузерях, VR/AR і мобільних застосунках, де критично важлива оптимізація.

Карти висот (рис. 3) – це градації сірого, де світліші ділянки вважаються вищими, а темніші – нижчими. У класичному методі bump mapping ця карта використовується для розрахунку похідної (градієнта), яка змінює напрям нормалі у точці поверхні. На відміну від карти нормалей, bump mapping обчислює нові нормалі динамічно під час рендерингу.

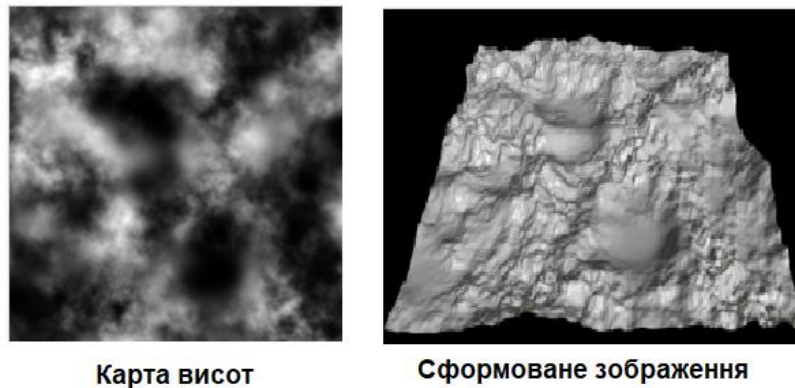


Рис. 3. Карти висот і сформоване зображення

Метод простий у реалізації, проте має обмеження: неможливо створити перекривання частин текстури або чітке самозатінення, і він працює лише на візуальному рівні. Незважаючи на це, карти висот залишаються ефективними в багатьох випадках, особливо у парі з іншими методами.

Паралаксне текстурування (Parallax Mapping) (рис. 4) створює враження глибини, моделюючи зміщення текстури залежно від кута огляду. Його суть полягає в тому, що за зміни положення камери координати вибірки текстури змінюються так, щоб симулювати глибину вглиб поверхні. Це дозволяє отримати переконливі ефекти зсуву деталей на поверхні (наприклад, тріщини, щілини, гравірування тощо).

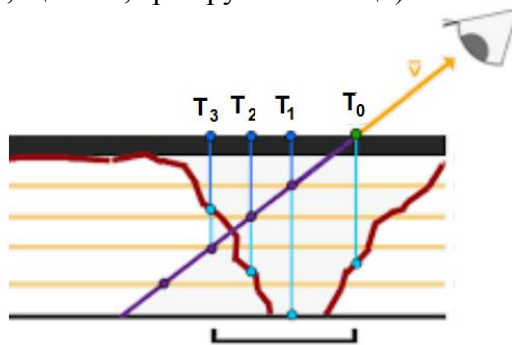


Рис. 4. Визначення текстурних координат для паралаксного текстурування

Простий паралакс – реалізує базове зміщення текстури на основі карти висот. Недоліком є те, що виступаючі деталі завжди виглядають “врізаними” у поверхню. Паралакс із самозатіненням додає ефект затінення від виступів на поверхні, що значно покращує реалістичність. Глибоке паралаксне текстурування складніший метод, який імітує проходження променя через об’ємний шар висот. У цьому випадку виконується крокове зчитування значень глибини з карти висот уздовж променя, щоб знайти точку перетину з уявною поверхнею.

Метод рельєфного текстурування з проникненням променя (relief mapping with ray intersection) ґрунтується на імітації глибини поверхні за допомогою карти висот, що зберігає інформацію про мікрорельєф. Під час рендерингу кожен піксель розглядається як початкова точка для віртуального променя, який прямує в напрямку погляду спостерігача. Цей промінь покроково просувається всередину текстурованої поверхні, поки не перетне віртуальний рельєф, заданий висотами у карті. Знайдена точка перетину використовується для корекції координат текстури, що забезпечує точну імітацію глибини та самозатінення. Застосування лінійної інтерполяції між останніми кроками дозволяє отримати плавні переходи і уникнути артефактів. Цей метод забезпечує високий рівень фотореалізму навіть на плоских поверхнях і може відтворювати складні візерунки, тріщини та западини. Однак для його реалізації

потрібні додаткові обчислення, що впливають на продуктивність у реальному часі. Метод є розширенням *steep parallax mapping* і широко застосовується в комп'ютерній графіці, де важлива деталізація без ускладнення геометрії моделі.

Семантичне й процедурне текстурування полягає у тому, що текстура рельєфу не зберігається як файл, а генерується під час рендерингу на основі формальних правил або псевдовипадкових алгоритмів (шум Перліна (рис. 5), шум Ворлея тощо) [4].

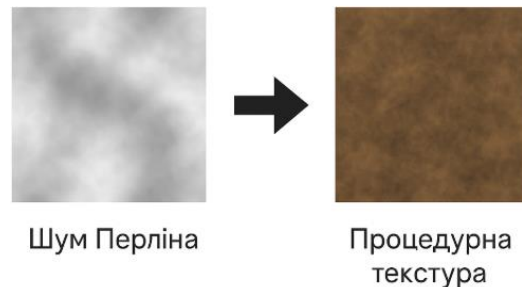


Рис. 5. Використання шуму Перліна для формування процедури текстури

Семантичне текстурування особливо ефективне, коли потрібна нескінченна або масштабована поверхня (наприклад, ландшафт, кора, гірська порода), що не повторюється. Процедурні карти нормалей або висот можуть бути інтегровані у шейдер і використовуватися так само, як і стандартні карти, але без потреби в збереженні великих файлів.

Імітаційні методи рельєфного текстурування мають низку суттєвих переваг: висока продуктивність: не потребують зміни геометрії, що дозволяє використовувати їх у мобільних додатках, іграх, VR/AR; низьке навантаження на GPU: особливо у випадках карт нормалей і висот, які легко обробляються у фрагментному шейдері; гнучкість: дозволяють швидко змінювати вигляд поверхні, не змінюючи саму модель; сумісність із фізично коректним освітленням інтегруються у сучасні рушії та рендерери, підтримують тіні, навколишнє освітлення, віддзеркалення тощо.

Імітаційні методи не створюють справжньої геометрії, а отже не можуть дати переконливу глибину на силуетах об'єктів, або при дуже близькому розгляді. Для таких випадків доцільно комбінувати їх з геометричними або гібридними підходами.

Геометричні методи змінюють реальну структуру поверхні. Один із найпростіших способів – зміщення вершин згідно карти висот, що особливо ефективне за достатньої щільності сітки. Більш досконалий метод – тесселяція, яка дозволяє динамічно розбивати поверхню на дрібні елементи та застосовувати мікродеформації на кожному з них. Це дає змогу відображати детальні поверхні навіть із обмеженим початковим полігональним представленням [3]. Мікрополігональне текстурування застосовується у високоякісному кінематографічному рендерингу, де потрібен надвисокий рівень реалістичності. Об'ємне рельєфне текстурування за допомогою вокселів дозволяє представляти складні матеріали, наприклад, камінь, лід чи тканину.

Геометричні методи рельєфного текстурування — це група технологій у комп'ютерній графіці, які передбачають фактичну зміну геометрії поверхні об'єкта з метою відтворення складного рельєфу, мікродеталей, тріщин, виступів і заглиблень. На відміну від імітаційних методів, що змінюють лише вигляд поверхні без втручання в її структуру, геометричні методи створюють реальну тривимірну форму, яка впливає на затінення, силует, контакт із іншими об'єктами та навіть на фізичні взаємодії (зіткнення, ковзання тощо). Завдяки цьому такі методи забезпечують найвищий рівень візуального реалізму, особливо при близькому огляді або під кутом.

Одним із базових способів є зміщення вершин (*displacement mapping*) (рис. 6), коли спеціальна текстура (карта висот) визначає, наскільки кожна вершина моделі має бути

зміщена вздовж нормалі. В результаті форма об'єкта змінюється відповідно до деталей, закодованих у карті. Такий підхід дозволяє отримати реальний рельєф, що особливо важливо для об'єктів, які розташовані близько до камери або мають складну мікроструктуру. Проте ефективне використання displacement mapping вимагає щільної сітки або попередньої тесселяції.

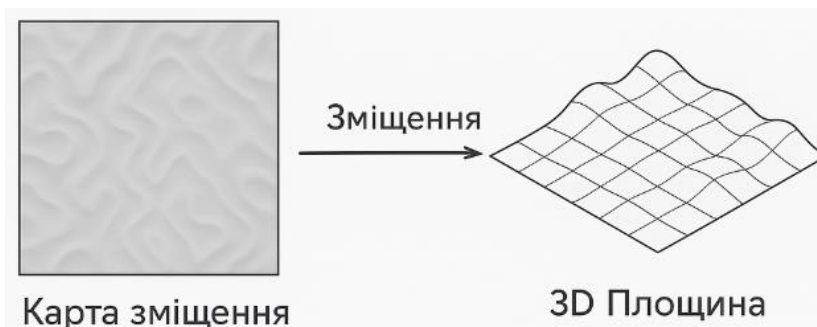


Рис. 6. Принцип зміщення вершин

Рис. 6 демонструє принцип displacement mapping, за яким поверхня 3D-об'єкта деформується відповідно до значень карти зміщення. Ліворуч зображено карту зміщення у відтінках сірого, де світлі ділянки вказують на підняття поверхні, а темні – на заглиблення. Стрілка зі словом "Зміщення" вказує на процес перенесення висотної інформації з карти на геометрію об'єкта. Праворуч показано результат – 3D площина, сітка якої стала хвилястою через застосування карти. Цей метод дозволяє точно передавати рельєфні деталі, змінюючи саму геометрію об'єкта, на відміну від інших методів текстуровання.

Для зменшення надлишкового навантаження під час моделювання деталізованих об'єктів, застосовується тесселяція — метод динамічного поділу полігональної сітки на дрібніші елементи в процесі рендерингу. Сучасні графічні API (DirectX, Vulkan, OpenGL) підтримують апаратну тесселяцію, що дозволяє підвищити щільність сітки лише в тих зонах, де це необхідно. На практиці тесселяція поєднується з displacement-текстурованням, щоб надати моделі складного рельєфу без перевантаження всієї сцени великою кількістю полігонів. Рівень деталізації можна змінювати залежно від відстані до камери, що дозволяє зберігати високу продуктивність.

Більш досконалий метод – це мікрополігональне текстуровання [8], яке застосовується переважно в кіноіндустрії або при фотореалістичному рендерингу. В цьому випадку поверхня об'єкта розбивається на множину наддрібних полігонів — менших за розмір пікселя на екрані. Це дозволяє досягти неперевершеної точності передачі деталей, включаючи найменші нерівності. Мікрополігони здебільшого використовуються в офлайн-рендерах (Pixar RenderMan, V-Ray, Arnold), оскільки вимагають значних обчислювальних ресурсів і не придатні для рендерингу в реальному часі.

Іншою важливою технологією є об'ємне текстуровання або воксельна геометрія. На рис. 7 наведено приклад об'ємного текстуровання.



Рис. 7. Приклад об'ємного текстуровання

Поверхня має хвилеподібний рельєф із плавними переходами висоти, що створює ефект

глибини. Світло, яке падає під кутом, утворює характерні тіні, посилюючи візуальне враження об'єму.

Об'ємне текстурювання забезпечує деталізацію без необхідності збільшувати кількість полігонів. Такий підхід часто використовується в іграх, візуалізації архітектури та візуальних симуляціях. Зображення ілюструє принцип рельєфного відображення мікроструктури матеріалу за допомогою технологій parallax mapping або displacement mapping.

Воксели — це об'ємні "піксели", які формують тривимірну сітку простору. Кожен воксель містить інформацію про свою позицію, щільність, колір тощо. Таке представлення дозволяє формувати дуже складні, нерегулярні об'єкти — наприклад, мох, скелі, вулканічну породу чи тканини.

Воксельні методи особливо ефективні при руйнуванні об'єктів або їх зміні в реальному часі. Проте вони потребують ефективних структур даних (наприклад, Sparse Voxel Octree), і їх підтримка не є стандартною у більшості ігрових рушіїв.

Гібридні методи поєднують імітаційні й геометричні підходи. Прикладом є динамічне текстурювання з перемиканням рівнів деталізації (LOD) (рис. 8), при якому на відстані використовується карта нормалей, а при наближенні — тесселяція або displacement. Таке поєднання дозволяє оптимізувати ресурси системи та зберігати якість візуалізації [4].

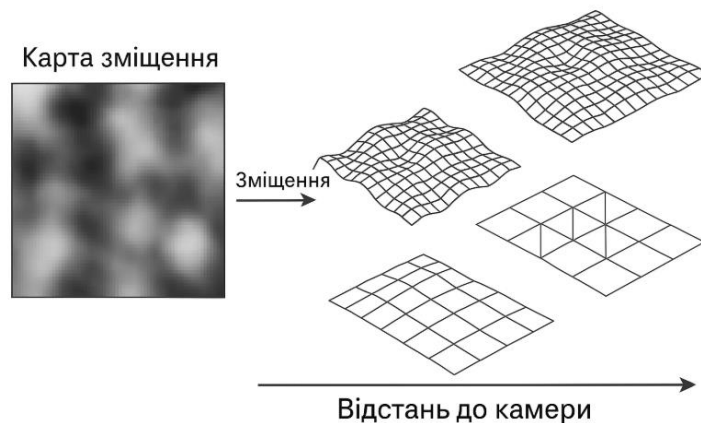


Рис. 8. Принцип динамічного рівня деталізації

Рис. 8 ілюструє принцип динамічного рівня деталізації (Dynamic LOD) у рельєфному текстурюванні. Ліворуч зображено карту зміщення, яка задає висотні значення для геометрії. Стрілка «Зміщення» вказує на процес, за якого ці значення перетворюються на деформацію сітки. Праворуч розташовані три сітки з різною щільністю: найближча до глядача — найдеталізованіша, з високою кількістю полігонів. Зі збільшенням відстані до камери рівень деталізації зменшується, щоб знизити навантаження на графічний процесор. Це дозволяє досягти балансу між візуальною якістю та продуктивністю. Такий підхід широко застосовується в ігровій графіці, візуалізації ландшафтів і складних поверхонь.

Іншим напрямом є застосування рельєфного текстурювання у поєднанні з трасуванням променів, що дозволяє враховувати складні оптичні ефекти, включаючи рефлексії, заломлення, самозатінення.

Окремо виділяються процедурні методи, в яких текстура рельєфу створюється алгоритмічно на основі випадкових або функціональних процесів. Це дає можливість динамічно генерувати поверхні без збереження великих обсягів текстурної інформації [5].

Застосування кожного з методів залежить від цілей. У комп'ютерних іграх імітаційні методи дозволяють зменшити навантаження на графічні процесори. У кіноіндустрії, де важлива абсолютна точність, застосовують мікрополігональні або воксельні підходи. У віртуальній реальності геометричне displacement критично важливе для збереження відчуття

глибини.

У таблиці 1 наведено результати порівняння методів рельєфного текстуровання.

Таблиця 1

Результати порівняння методів рельєфного текстуровання

Метод	Тип	Вплив на геометрію	Реалізм	Продуктивність	Сфера використання
Normal Mapping	Імітаційний	Немає	Середній	Висока	Ігри, мобільна графіка, VR
Bump Mapping (карти висот)	Імітаційний	Немає	Низький	Дуже висока	Системи реального часу, освітлення
Parallax Mapping	Імітаційний	Немає	Високий	Середня	Ігри, інтерфейси, 3D-візуалізація
Parallax Occlusion Mapping	Імітаційний	Немає	Дуже високий	Низька–середня	Ігри з середньою сценою, візерунки
Relief Mapping	Імітаційний	Немає	Фотореалізм	Низька	Фотореалістичні сцени, рендер у реальному часі
Displacement Mapping	Геометричний	Повна зміна	Фотореалізм	Низька	Кіно, VR, сцени з близькими об'єктами
Tessellation + Displacement	Геометричний	Динамічна зміна	Високий	Середня	Ігри (Unreal, Vulkan), архітектура, візуалізація
Мікрополігональне	Геометричний	Надточна зміна	Максимальний	Дуже низька	Кінематограф, офлайн рендеринг (RenderMan)
Воксельне текстуровання	Геометричний	Об'ємна зміна	Дуже високий	Низька	Симуляції, складні поверхні, руйнування
Dynamic LOD + Normal/Displ.	Гібридний	(зміна за потреби)	Високий	Висока	Ігри, VR/AR, сцени з динамічною камерою
Ray tracing + Relief	Гібридний	Оптичні ефекти	Максимальний	Залежить від системи	Рендеринг з трасуванням променів, фільми
Комбіновані шейдери	Гібридний	за умовами	Високий	Гнучка	Універсальні рушії (Unity, Unreal, CryEngine)

Таким чином, рельєфне текстуровання сьогодні охоплює широкий спектр методів – від простих карт нормалей до складних гібридних шейдерів з трасуванням променів. Знання їх класифікації дозволяє розробникам графічних систем обирати оптимальні рішення для конкретних цілей: продуктивності, якості зображення, реалізму або сумісності з платформами.

Висновки

У результаті аналізу методів рельєфного текстуровання встановлено, що вони поділяються на імітаційні, геометричні та гібридні, залежно від ступеня впливу на геометрію поверхні. Імітаційні методи, зокрема карти нормалей і паралакс-шейдинг, дозволяють досягти реалістичного вигляду без модифікації самої геометрії об'єкта, що сприяє економії обчислювальних ресурсів. Геометричні методи, такі як тесселяція, мікрополігональні сітки або воксельне текстуровання, забезпечують вищу точність, оскільки змінюють реальну структуру поверхні. Особливу роль відіграють гібридні підходи, які поєднують обидві стратегії та адаптивно керують деталізацією залежно від відстані до камери.

Таким чином, комплексне використання різних типів рельєфного текстуровання відкриває широкі можливості для досягнення реалістичності зображення при оптимальному

балансі між якістю та продуктивністю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhao H., Fan L., Zhang H. A real-time parallax occlusion mapping algorithm with dynamic lighting. *Computers & Graphics*. 2021. Vol. 94. P. 20–29.
2. Kiselov M., Mitov I. Optimized Tessellation Techniques for Height-Based Surface Detail. *Graphical Models*. 2022. Vol. 118. P. 101144.
3. Lee S., Kim J. Dynamic Level of Detail with GPU Culling for Terrain Rendering. *Journal of Visualization and Computer Animation*. 2024. Vol. 35, № 1. P. 89–102.
4. Chen Y., Zhou X., Wang D. Efficient Procedural Texture Generation using Perlin and Worley Noise on GPU. *Journal of Real-Time Image Processing*. 2022. Vol. 18. P. 245–258.
5. Müller J., Lang P., Krüger T. Sparse Voxel Octrees for Real-Time Rendering in Hybrid Ray Tracing Pipelines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2023. Vol. 29, № 5. P. 2104–2116.
6. Rama C. Hoetzlein. Projective Displacement Mapping for Ray Traced Editable Surfaces. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.02011>.
7. Park C., Lee E. Real-Time Rendering Optimization via Adaptive Texture Sampling and Mipmapping. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 88799–88811.
8. Романюк О. Н., Новосельцев О. О., Романюк С. О. Особливості текстуровання високої деталізації. *Креативний простір: електрон. наук. журн.*, Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2025. № 23. P. 53–55.
9. Романюк О. Н., Захарчук М. Д., Новосельцев О. О. Аналіз програмного забезпечення для текстуровання. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)*, м. Вінниця, 15–16 черв. 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/24715/20430>.
10. Романюк О. Н., Новосельцев О. О. Реалізації рельєфного текстуровання в GPU. *Перспективи розвитку сучасної науки та освіти: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Львів, 19–20 січ. 2025. Львів: Львівський науковий форум, 2025. P. 52–55.
11. Романюк О. Н., Новосельцев О. О. Формування процедурних текстур для рендерингу. *Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології: тези доп. Всеукр. наук.-техн. інтернет-конф.*, Дніпро, 26 берез. 2025. ДВНЗ «ПДТУ». P. 103–105.
12. Використанням паралаксного текстуровання для підвищення реалістичності формування тривимірних зображень / О. Н. Романюк та ін. *Зб. наук. пр. IV Міжнар. наук.-практ. конф.*, Запоріжжя–Мелітополь, 20 трав. 2025. МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2025. Вип. 14. P. 543–550.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2025.

Стаття пройшла рецензування 15.09.2025.

Романюк Олександр Никифорович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, e-mail: rom8591@gmail.com.

Майданюк Володимир Павлович – канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення.

Новосельцев Олександр Олександрович – аспірант кафедри програмного забезпечення. Вінницький національний технічний університет.