

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ РЕЛЬЄФНОГО ТЕКСТУРУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведено класифікацію основних методів рельєфного текстуровання у системах тривимірної комп'ютерної графіки. Проаналізовано принципи їх роботи, переваги й недоліки з точки зору фотореалістичності та обчислювальної складності..

Ключові слова: тривимірна комп'ютерна графіка, рельєфне текстуровання, bump mapping, normal mapping, parallax mapping, parallax occlusion mapping, фотореалістичність.

Abstract

The main methods of relief texturing in three-dimensional computer graphics systems are classified. Their principles of operation, advantages, and disadvantages in terms of photorealism and computational complexity are analyzed.

Keywords: three-dimensional computer graphics, relief texturing, bump mapping, normal mapping, parallax mapping, parallax occlusion mapping, photorealism.

Вступ

Сучасний розвиток комп'ютерних технологій супроводжується стрімким поширенням засобів комп'ютерної візуалізації, які забезпечують ефективну взаємодію людини з цифровими системами через графічні інтерфейси. Одним із найважливіших напрямів цієї галузі є тривимірна комп'ютерна графіка, що забезпечує візуальне відтворення складних геометричних форм, фізичних властивостей матеріалів і взаємодії світла з поверхнями, що робить її незамінною в інженерії, архітектурі, ігровій індустрії, віртуальній реальності, дизайні та науковому моделюванні. Реалістичність зображення визначається точністю моделювання освітлення, відбиття, тіней і мікроструктури поверхні. Саме текстуровання – передача дрібних деталей поверхні без збільшення кількості полігонів – залишається однією з найактуальніших проблем сучасної комп'ютерної графіки [1].

На сьогодні комп'ютерні системи візуалізації характеризуються постійним зростанням вимог до якості графічного відтворення об'єктів та сцен, що обумовлює актуальність розробки нових методів підвищення реалістичності. Одним із найбільш ефективних способів підвищення реалістичності без надмірного ускладнення геометрії є рельєфне текстуровання, яке забезпечує імітацію мікрорельєфу поверхні шляхом використання карт висот, нормалей і відстаней.

Мета дослідження: є систематизація та порівняльний аналіз сучасних методів рельєфного текстуровання, спрямований на визначення їхніх принципів роботи, особливостей використання та ефективності з точки зору фотореалістичності й обчислювальної складності.

Особливості рельєфного текстуровання

Рельєфне текстуровання – [2] це сукупність методів, які дозволяють створювати ілюзію складного мікрорельєфу на поверхнях без необхідності збільшення геометричної складності моделі. На відміну від класичного текстуровання, яке лише накладає колір або фактуру на поверхню, рельєфне текстуровання модифікує геометричні властивості відображення, враховуючи вплив нормалей поверхні, напрям спостереження та джерела світла. Завдяки цьому досягається ефект глибини, опуклості чи заглиблення, що підвищує достовірність сприйняття тривимірної сцени. Використовується для створення ефекту об'ємності та детальності на поверхнях 3D-об'єктів.

Рельєфне текстуровання є одним із найважливіших напрямів розвитку технологій комп'ютерної графіки, що дозволяє створювати ілюзію складного мікрорельєфу на поверхнях тривимірних об'єктів без збільшення кількості полігонів. На відміну від класичного текстуровання, яке визначає лише колір поверхні за допомогою двовимірного зображення – текстури, рельєфне текстуровання модифікує геометричну інтерпретацію поверхні шляхом зміни нормалей, координат текселів або візуальної

паралакси між точкою спостереження та точками на поверхні. Цей підхід дозволяє симулювати дрібні нерівності, вибоїни, опуклості та інші мікродеталі без необхідності фізичного їх моделювання.

У загальному вигляді процес рельєфного текстурювання ґрунтується на використанні текстурних карт, які зберігають додаткову інформацію про структуру поверхні. Основними типами таких карт є карта висот, карта нормалей та карта відстаней. Карта висот містить скалярні значення, що описують відносну висоту кожної точки поверхні, тоді як карта нормалей визначає орієнтацію локальних нормалей, закодованих у трьох каналах (RGB), які відповідають компонентам вектора нормалі N_x, N_y, N_z . Карта відстаней може відображати зміщення текстурних координат, що імітує зміну глибини при русі спостерігача. На рисунку 1 наведено порівняльне зображення плоскої поверхні без текстурювання та тієї ж поверхні після застосування рельєфного текстурювання.



Рисунок 1 – Порівняння базової моделі без рельєфу та з рельєфним текстурюванням

Процес рельєфного текстурювання передбачає послідовне застосування кількох рівнів обробки поверхні. На початковому етапі формується карта висот, що визначає відносні зміни висоти в кожній точці текстури. Далі, на основі похідних від карти висот, обчислюється карта нормалей, яка зберігає напрямки нормалей в кожному текселі (текстурному елементі) [3]. На завершальному етапі застосовується освітлювальна модель, яка використовує ці нормалі для корекції інтенсивності відбитого світла, створюючи ефект глибини та нерівностей на гладкій поверхні.

Ключовою перевагою рельєфного текстурювання є можливість суттєвого підвищення рівня фотореалістичності без збільшення кількості полігонів, що особливо важливо для систем реального часу. Водночас цей метод має певні обмеження, зокрема зниження точності при екстремальних кутах спостереження, появу спотворень текстур та артефактів під час інтерполяції нормалей.

Порівняння методів рельєфного текстурювання

У найзагальнішому вигляді методи рельєфного текстурювання можна класифікувати за рівнем складності моделі рельєфу та типом даних, що використовуються для його опису. До основних методів належать bump mapping, normal mapping, displacement mapping, parallax mapping та parallax occlusion mapping. Кожен із них має власний підхід до моделювання поверхневої неоднорідності та забезпечує різний баланс між візуальною якістю та продуктивністю обчислень.

Найпростішим і базовим методом рельєфного текстурювання є bump mapping, запропонований Джеймсом Блінном (Blinn) у 1978 році. Цей метод не змінює геометрію поверхні, а лише модифікує її нормалі для створення ілюзії дрібних нерівностей. У bump mapping нормаль N на поверхні обчислюється як похідна від карти висот $h(u, v)$ у напрямках текстурних координат u і v :

$$N' = N + \frac{\partial h}{\partial u} T + \frac{\partial h}{\partial v} B,$$

де T і B – вектори тангенціального та бінормального напрямків поверхні. Модифікована нормаль N' використовується у моделі освітлення для розрахунку локальної яскравості пікселя. Таким чином, відбувається симуляція мікрорельєфу без геометричних змін об'єкта.

Перевагою bump mapping є його висока швидкодія та простота реалізації, що робить його придатним для систем реального часу, зокрема у відеоіграх і візуалізаційних програмах. Проте основним недоліком цього методу є відсутність ефекту паралаксу: при зміні кута спостереження мікрорельєф не

змінює свого вигляду, через що зображення виглядає плоским. Крім того, цей метод не формує коректних тіней і самозатінення, що обмежує його реалістичність.

На рисунку 2 показано приклад реалізації bump mapping на плоскій поверхні: незважаючи на ілюзію рельєфності при фронтальному огляді, при зміні кута спостереження відсутнє помітне зміщення деталей, що підтверджує обмеження цього методу.



Рисунок 2 – Приклад рельєфного текстуровання методом bump mapping

Наступним етапом еволюції технологій рельєфного текстуровання після bump mapping став метод normal mapping, який забезпечив значно вищу точність передачі мікрорельєфу та освітлення. Основна ідея normal mapping полягає у збереженні у текстурі не скалярних значень висот, як у bump mapping, а векторних нормалей у просторі текстурних координат. Таким чином, для кожного текселя задається власний напрямок нормалі, що дозволяє набагато точніше моделювати взаємодію світла з поверхнею.

У нормалізованому вигляді нормалі кодуються у вигляді RGB-зображення, де компоненти R,G,B відповідають координатам нормалі (x, y, z) у діапазоні $[0,1]$. У процесі рендерингу ці значення декодуються в діапазон $[-1,1]$ та використовуються в освітлювальній моделі. Це дозволяє імітувати навіть складні дрібні деталі — тріщини, складки, нерівності металу чи тканини, не змінюючи геометрію об'єкта

З технічної точки зору, normal mapping працює за формулою перерахунку освітлення для кожного фрагмента (пікселя):

$$I = k_d(N_t \cdot L_t) + k_s(R_t \cdot V_t)^n,$$

де N_t – нормаль з карти нормалей, L_t – напрямок на джерело світла, R_t – відбитий вектор, V_t – напрямок на спостерігача, k_d та k_s – коефіцієнти дифузного та дзеркального відбиття відповідно, n – показник блиску.

Перевагою normal mapping є значне підвищення фотореалістичності сцени порівняно з bump mapping. Метод дозволяє враховувати зміну орієнтації мікроповерхонь, що створює більш реалістичне розсіювання світла. Це особливо помітно при динамічному освітленні або зміні положення джерела світла, коли нормалі з карти забезпечують правильне відтворення відблисків і тіней.

Крім того, normal mapping є сумісним із геометричними методами деталізації, такими як tessellation або displacement mapping, що дозволяє комбінувати різні рівні деталізації у складних сценах. Зокрема, у сучасних графічних рушіях normal mapping часто використовується спільно з ambient occlusion maps, які моделюють ефект затінення у порожнинах поверхні, підсилюючи сприйняття глибини.

Попри свої переваги, метод має низку обмежень. По-перше, normal mapping не змінює силует об'єкта, тобто краї залишаються геометрично гладкими, що обмежує реалістичність у профільному ракурсі. По-друге, при надмірній деформації моделі або неправильному розрахунку TBN-матриці можуть з'являтися візуальні артефакти у вигляді «перевернутих» відблисків або нерівномірного освітлення. Також для точного відтворення складних поверхонь потрібні карти нормалей високої роздільності, що збільшує вимоги до пам'яті GPU.

Для ілюстрації цього ефекту розглянемо порівняння між bump mapping та normal mapping при освітленні поверхні точковим джерелом (рисунки 3).

У bump mapping спотворення освітлення залежать лише від похідних карти висот, тоді як у normal mapping нормалі визначають напрямок розсіювання світла у кожній точці незалежно від топології текстури, забезпечуючи більш реалістичну тінізацію.

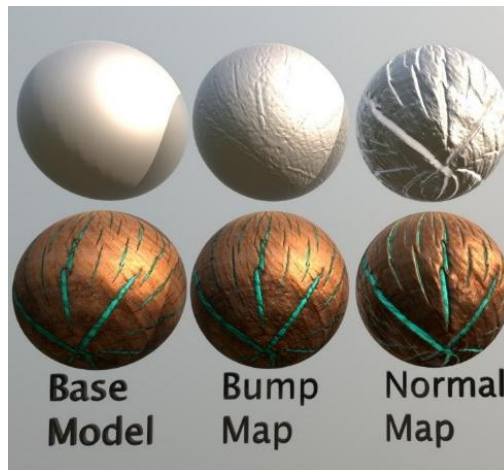


Рисунок 3 – Порівняння bump mapping та normal mapping при зміні кута освітлення

Подальший розвиток рельєфного текстурювання пов'язаний із появою parallax mapping [4], який став логічним продовженням normal mapping. Його головна відмінність полягає у врахуванні паралаксного ефекту – зміщення видимих точок поверхні залежно від кута огляду спостерігача. Якщо bump mapping і normal mapping лише змінюють орієнтацію нормалей, то parallax mapping додає ще й зсув текстурних координат, що створює ілюзію реальної глибини поверхні. Таким чином, при русі камери рельєф виглядає так, ніби пікселі зміщуються відносно спостерігача, що значно підвищує достовірність зображення (рисунок 4).

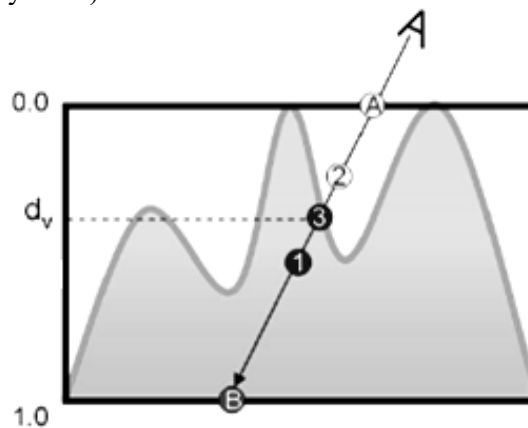


Рисунок 4 – Трасування видового вектора для визначення зміщення текстурних координат

З технічної точки зору, алгоритм parallax mapping базується на використанні карти висот (height map) для зміни координат текселів у просторі текстури. Для кожного фрагмента обчислюється нове положення текстурної координати T_1 за формулою:

$$T_1 = T_0 + h \cdot \frac{V_{xy}}{V_z},$$

де T_1 – текстурні координати; T_0 – текстурні координати без урахування рельєфу поверхні; h – висота поверхні в точці; V – видовий вектор.

Одним із вдосконалених варіантів цього підходу є parallax occlusion mapping (POM), який додатково враховує самозатінення (self-shadowing) і оклюзію точок поверхні, розташованих на різній висоті. Для цього виконується покрокове трасування променя у текстурному просторі з перевіркою перетину з картою висот.

Такий підхід забезпечує виняткову фотореалістичність навіть при екстремальних кутах спостереження, але суттєво збільшує обчислювальні витрати. Результати проведеного аналізу зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів рельєфного текстуровання

Метод	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Рівень фотореалістичності	Обчислювальна складність
Bump Mapping	Використання градієнтів карти висот для модифікації нормалей	Простота реалізації, мінімальні ресурси	Відсутність ефекту паралаксу, плоский силует	Низький	Низька
Normal Mapping	Використання карти нормалей для моделювання мікрорельєфу	Висока якість освітлення, реалістичні відблиски	Не змінює силует, можливі артефакти при деформаціях	Середній	Середня
Parallax Mapping	Корекція текстурних координат з урахуванням карти висот і кута спостереження	Висока глибина, реалістичність при русі камери	Високе навантаження, артефакти при малих кутах	Високий	Висока
Parallax Occlusion Mapping (POM)	Трасування променя у карті висот із самозатінненням	Максимальна реалістичність, точна геометрія рельєфу	Висока складність, значне споживання ресурсів	Дуже високий	Дуже висока

Висновок

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що найдоцільнішим напрямом подальшого розвитку фотореалістичності зображень є модифікація методу parallax mapping, оскільки він забезпечує оптимальне співвідношення між фотореалістичністю та обчислювальною складністю. На відміну від bump і normal mapping, цей метод відтворює глибину поверхні з урахуванням паралаксу, а при використанні адаптивного корегування кількості ітерацій може бути ефективно застосований у реальному часі.

Таким чином, доцільно вдосконалити parallax mapping шляхом побудови адаптивної математичної моделі, яка враховуватиме взаємозв'язок між вектором нормалі, напрямом спостерігача та джерелом світла, що дозволить досягти максимальної реалістичності при мінімальних обчислювальних витратах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романюк О. Н., Захарчук М. Д. Метод процедурного текстуровання // Збірник тез наукових доповідей учасників Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні дослідження та перспективи розвитку науки і техніки у XXI столітті», Рівне, 19 жовтня 2023 р. Рівне, 2023. Ч. 3. С. 175-178.
2. Романюк О. Н., Захарчук М. Д., Новосельцев О. О., Котлик С. В. Використання рельєфного текстуровання в комп'ютерних іграх // Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації-2025», Одеса, 25-26 вересня 2025 р. Одеса, 2025. С. 454-456.
3. Романюк О. Н., Захарчук М. Д., Чехмиструк Р. Ю., Романюк О. В., Коробейнікова Т. І. Визначення векторів нормалей у довільній точці трикутника. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми сучасної науки та освіти», м. Львів, 20-21 січня 2022 р. Львів : Львівський науковий форум, 2022. Ч. 1. С. 64-67.
4. Романюк О. Н., Станіславенко Є. Г., Новосельцев О. О., Захарчук М. Д. Використання Parallax Mapping для формування зображень // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація-2024», Одеса, 31 жовтня-1 листопада 2024 р. Одеса, 2024. С. 843-846.

Романюк Олександр Никифорович – професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: romanyuk@vntu.edu.ua.

Захарчук Максим Дмитрович – студент групи 2ПІ-24м, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, mz764233@gmail.com.

Oleksandr Romanyuk – professor, head of the software department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: romanyuk@vntu.edu.ua.

Maksym Zakharchuk – student of the group 2PI-24m, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, faculty of information technology and computer engineering, mz764233@gmail.com.