

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО ФОРМУВАННЯ ШОРСТКИХ ПОВЕРХОНЬ

Вступ

Сьогодні комп'ютерна графіка знаходить широке застосування від складних систем візуалізації різних комплексів (автомобільних, авіаційних, космічних, тощо) до графічних акселераторів, що використовуються в комп'ютерних іграх. В основі цих систем лежить полігональне подання об'єктів трьохмірних сцен з наступним перетворенням і скануванням в площині зображення. Бурхливий розвиток комп'ютерних технологій дає змогу сьогодні моделювати складні об'єкти із забезпеченням достатньо високого ступеня деталізації. Досить актуальним постає питання про ступінь реалізму в представленні тривимірних зображень. Передача зовнішніх особливостей графічних об'єктів без ускладнення обчислювального процесу є однією з основних задач комп'ютерної графіки.

Існує ряд підходів до отримання високореалістичних графічних сцен. Проте їх реалізація зазвичай потребує ускладнення триангуляційної мережі, що призводить до збільшення машинного часу та ресурсів при моделюванні об'єкта. Тому постає ряд задач при розробці підходів до отримання шорстких поверхонь, а саме: формування рельєфних об'єктів у реальному часі; зменшення обчислювальних витрат при формуванні тривимірних рельєфних об'єктів без втрати їх якості; підвищення реалістичності графічних сцен.

Актуальність дослідження високопродуктивних методів формування рельєфних графічних об'єктів обумовлена стрімким розвитком виробництва графічних акселераторів, в яких широко використовуються методи формування реалістичних зображень.

Головною задачею дослідження є аналіз сучасних методів формування рельєфних поверхонь із метою визначення основних підходів до підвищення продуктивності та якості формування тривимірних графічних об'єктів.

Класифікація методів формування шорстких поверхонь

Сьогодні існують різні підходи до формування шорсткості поверхні. Відомо, що для забезпечення більшої реалістичності зображення спочатку проводиться теселяція геометричних моделей, тобто розбиття на низькорівневі полігони, та здійснюються відповідні перетворення у вершинах цих полігонів. Освітленість об'єкта спочатку розраховується для вершин цих полігонів, а освітленість всіх інших точок полігону знаходиться шляхом інтерполяції. Звичайно вершинне освітлення значно простіше з обчислювальної точки зору, однак при низькополігональній геометрії виглядає не дуже реалістично, оскільки пікселі в середині трикутника не можуть бути яскравішими, ніж фрагменти біля вершин. Відповідно, області з різкою зміною освітлення, такі як відблиски і джерела світла, дуже близько розташовані до поверхні, фізично будуть неправильно відтворюватись, і особливо це буде помітно в динаміці. Частково цю проблему можна вирішити за рахунок збільшення геометричної складності моделі, її розбиттям на більшу кількість вершин і трикутників, але оптимальним варіантом буде попиксельне освітлення.

Серед підходів до формування шорсткості поверхонь виділяють такі, що враховують (Parallax mapping, View-dependent displacement mapping [1,2]) і такі, що не враховують позицію спостерігача. Звичайно, більш досконалими вважаються підходи, що враховують позицію спостерігача.

Також різні підходи можуть використовувати карти висот, карти нормалей та карти зміщень. Карта висот [3] описує висоту кожної окремо взятої точки текстури щодо певного умовно обраного початкового рівня. Карти нормалей є текстурами зі збереженими в них значеннями нормалей, що представлені в вигляді компонент кольору RGB (на відміну від 8-бітних чорно-білих карт висот, які використовуються в bump mapping). Карти нормалей на відміну від карт висот містять більш детальний опис поверхні і дозволяють представити більш складні форми. Карта зміщень - це чорно-біла текстура, значення в якій використовуються для визначення висоти кожної точки поверхні об'єкту (значення можуть представлятися як 8-бітовими так і 16-бітовими числами). Накладання карт зміщення можна вважати методом стиснення геометрії. Їх використання знижує об'єм пам'яті, потрібний для певної деталізації 3D моделі. Громіздкі геометричні дані замінюються простими двомірними текстурами зміщення (8-бітовими або 16-бітовими). Це знижує вимоги до об'єму пам'яті і пропускну здатності, необхідної для доставки геометричних даних до відеочіпа, а ці обмеження є одними з головних для сьогоденних систем.

В загальному випадку класифікацію методів формування рельєфних поверхонь зображено на рис. 1.

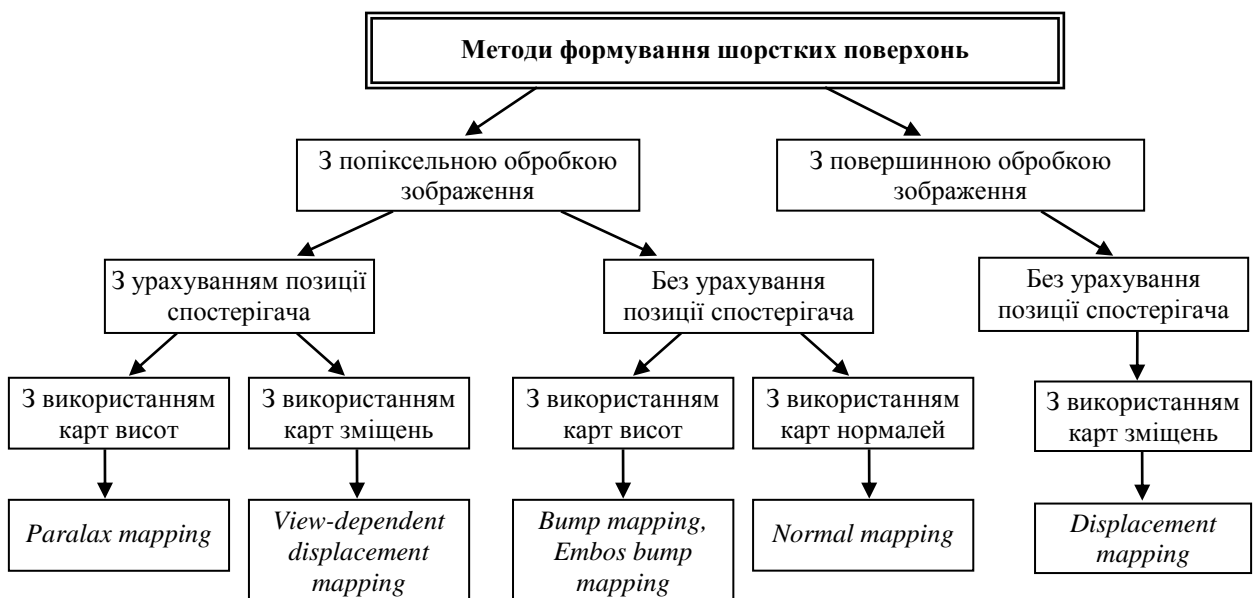


Рисунок 1 – Класифікація методів формування шорстких поверхонь

Аналіз методів формування шорстких поверхонь

Bump mapping – це техніка імітації нерівностей поверхні (або моделювання мікрорельєфу) на плоскій поверхні без зміни геометрії [3,4]. Для кожного пікселя поверхні виконується обчислення освітлення, використовуючи значення зі спеціальної карти висот. Зазвичай це 8-бітна чорно-біла текстура і значення кольору текстури не накладаються як звичайні текстури, а використовуються для опису шорсткості поверхні. Колір кожного пікселя визначає висоту відповідної точки рельєфу: більші значення означають більшу висоту над вихідною поверхнею, а менші, відповідно, меншу висоту.

Ступінь освітленості точки залежить від кута падіння променів світла. Чим менший кут між нормаллю і променем світла, тим більша освітленість в даній точці поверхні. Для нерівних поверхонь нормалі в кожній точці будуть різні. Звідси і принцип бампмепінгу – для моделювання нерівностей для різних точок полігона задаються нормалі до поверхні, які враховуються при обчисленні попіксельного освітлення (рис.2). Bump Mapping переломлює вектор нормалі N поверхні в точці P з вектором збурення,

який розрахований з наперед заданої карти висот. Якщо $P(u, v)$ відображає позицію на параметричній поверхні, вектор нормалі поверхні в цій точці може бути отриманий за формулою

$$N = P_u \times P_v. \quad (1)$$

де P_u і P_v часткові похідні P по параметричним напрямкам u і v відповідно.

Для того щоб отримати вектор нормалі збуреної поверхні, поверхня модифікується шляхом додавання функції $F(u,v)$ карти висот. Разом P і F визначають нове зміщення поверхні $P'(u,v)$ так як це показано на рис.2 і визначається за формулою

$$P'(u,v) = P(u,v) + F(u,v)n. \quad (2)$$

В результаті отримується більш натуральне зображення поверхні.



Рисунок 2 – Поверхня, збурена картою висот.

Вектор нормалі N' збуреної поверхні визначається за формулою

$$N' = P'_u \times P'_v \quad (3)$$

Потім, припускаючи, що значення функції $F(u,v)$ мале, нормаль збуреної поверхні може бути апроксимована

$$N' = N + F_u(n \times P_v) + F_v(P_u \times n). \quad (4)$$

Кінцевий крок – нормалізація N' , щоб мати можливість використати його для обчислення освітлення.

Бампмепінг дозволяє деталізувати такі природні поверхні, як стіни з цеглин, бруківка, галька чи пори на шкірі, що мають дрібні деталі поверхні, які надто мілкі, щоб відображати їх за допомогою геометричних мозаїчних представлень поверхні. Bump Mapping найбільш доцільно використовувати, коли джерело світла рухається відносно поверхні. До недоліків даного методу можна віднести той факт, що карти висот з різкими переходами можуть викликати візуальні дефекти, а також не дозволяє використовувати будь-яку модель освітлення.

Embos bump mapping використовує карту висот для одержання ефекту видавлювання у вигляді випуклостей на поверхні об'єкта, шляхом затінення й освітлення певних її ділянок (рис.3).



Рисунок 3 - Результат застосування *Embos bump mapping*

Існує безліч способів реалізації даного ефекту, але найпоширеніший з них реалізується на апаратному рівні у три етапи. Хоч цей метод легко реалізується, однак він не дозволяє безпосередньо працювати з такими речами, як відбиття світла від поверхні. Ефект видавлювання працює тільки у випадку застосування монохромного освітлення. В реальному часі можна реалізувати вплив на поверхню кольорового джерела світла, але для цього потрібно задіяти четвертий прохід, що значно уповільнює процес формування даного ефекту на моделюючій поверхні. Крім того, необхідно дуже чітко відслідковувати

величину зміщення негатива карти висот при виконанні другого етапу, оскільки незначні порушення в кінцевому підсумку негативно проявляються на отриманому результаті.

Normal mapping – це покращений різновид техніки бампмепінгу, розширена його версія. Нормалмепінг повністю замінює нормалі за допомогою вибірки значень зі спеціально підготовленої карти нормалей. Як і bump mapping, normal mapping також є не ресурсомістким методом для формування деталізованих поверхонь порівняно з низькою геометричною складністю. За допомогою даного підходу можна досягти значного збільшення ступеня деталізації низькополігональних моделей. Недоліком карт нормалей є те, що вони не сумісні для моделювання поверхонь з досить великими деталями, оскільки нормалмаппінг не додає полігони та не змінює форму об'єкта. Даний підхід лише створює видимість рельєфності на основі обчислення освітлення на піксельному рівні [5]. Тому, найбільш ефективний спосіб застосування нормалмаппінга полягає в тому, щоб зробити низькополігональну модель достатньо деталізованою зі збереженням основної форми об'єкта і використанням карти нормалей для формування деталізації на низькому рівні. Ще одним недоліком нормалмепінгу є збільшення розмірів текстур.

Displacement mapping – є методом додавання деталей до тривимірних об'єктів шляхом накладання карти зміщення. На відміну від бампмепінга та інших попіксельних методів, карти зміщень дозволяють отримати справжні складні об'єкти з вершин і полігонів, без обмежень, які характерні для піксельних методів. Цей метод змінює положення вершин трикутників, зміщуючи їх по нормалі на величину, яка береться з карти зміщення. Часто карти зміщення використовуються для створення земної поверхні з пагорбами і впадинами. Оскільки рельєф місцевості описується двовимірною картою зміщення, його відносно легко можна деформувати за необхідністю, оскільки це вимагає лише модифікації карти зміщення і рендерингу на її основі поверхні в наступному кадрі.

Створення ландшафту за допомогою накладання карт зміщення зображено на рис.4.

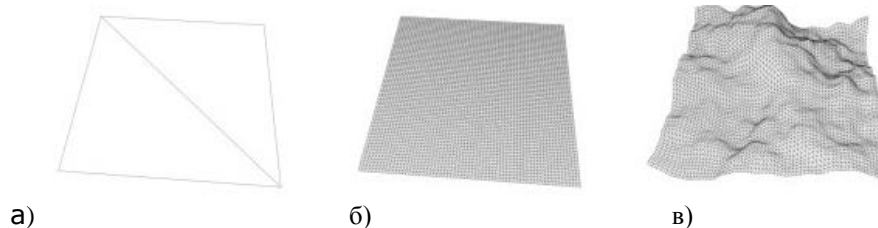


Рисунок 4 – Створення ландшафту в) шляхом теселяції низькополігонального об'єкта а) на велику кількість вершин та полігонів б) з подальшим зміщенням вершин по нормалі на значення, які зчитуються з карти зміщення.

Великою перевагою накладання карт зміщення є практично повне створення об'єкта, однак кількість трикутників, які створюються при теселяції, повинна бути достатньою для того, щоб передати всі деталі, які задаються картою зміщення. Друга перевага полягає в тому, що застосування карт зміщення перетворює складні полігональні тривимірні сітки в декілька двовимірних текстур, які легше обробляти.

Однак карти зміщення не доцільно застосовувати для гладких поверхонь, які не містять великої кількості тонких деталей; такі об'єкти як дерева або рослини, також важко представити картами зміщення. Є також проблеми зручності їх застосування, оскільки майже завжди вони вимагають спеціальних утиліт, адже дуже складно напряму створювати карти зміщення.

Іншим різновидом *Displacement mapping* є метод *View-dependent displacement mapping (VDM)* – підхід, який дозволяє моделювати рельєфність на поверхні, враховуючи значення зміщення вздовж напрямку спостереження. На відміну від традиційного зміщення [6], VDM дозволяє ефективно формувати однорідні тіні та силуети без збільшення складності поточної зовнішньої структури поверхні. VDM

базується на попиксельній обробці поверхні. Завдяки апаратному прискоренню дана технологія дозволяє у реальному часі формувати поверхні з реалістичним візуальним виглядом. Технологія VDM в якості вхідних даних отримує зразок текстури у вигляді карти зміщення і конвертує його в VDM формат. Карта зміщення описує відстань кожної точки умовної рельєфної поверхні від поточної вихідної поверхні вздовж напрямку спостереження, як показано на рис.3.

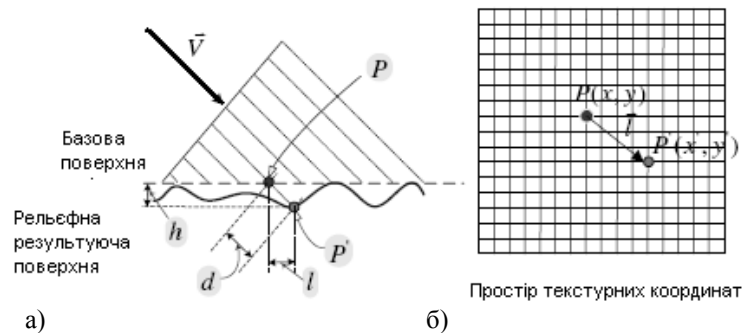


Рисунок 3 – Формування зміщення по відношенню до напрямку спостереження. а) геометрія зміщення б) зміщення в просторі текстурних координат.

Для даного напрямку спостереження $V = (\theta, \varphi)$, вираженого в сферичних координатах, кожна точка вихідної поверхні P з текстурними координатами (x, y) проектується в точку P' , яка належить рельєфній поверхні, з текстурними координатами (x', y') . Для різних точок спостереження P буде проектуватися в різні точки на результуючій поверхні. Таким чином значення зміщення d залежить від значень параметрів x, y, φ, θ . Хоча інші залежні параметри, такі як h та l можуть еквівалентно представляти значення зміщення, параметр d - менш визначається їх відхиленнями, що виникли б при напрямках спостереження, близьких до нормалі.

Враховуючи можливі викривлення поверхонь, інформацію зміщення, залежно від позиції спостереження, можна представити п'яти вимірною функціональною залежністю

$$d_{vdm}(x, y, \theta, \varphi, c) \quad (5)$$

де x, y – текстурні координати базової поверхні;

φ, θ - сферичні кути напрямку спостереження в локальній системі координат базової поверхні.

c - викривлення базової поверхні уздовж напрямку спостереження.

Після обчислення VDM-функції для заданої структури рельєфної поверхні, значення, отримані в результаті обчислення, проектується на нову поверхню. Таким нанесенням отримують поверхню, параметри якої представлено в текстурних координатах.

Для того, щоб виконати рендеринг новоствореної карти висот та поточної поверхні, в першу чергу обчислюються нормалі поверхні з карти висот. Кожна нормаль та два ортогональні напрямки текстури визначають локальну систему координат, в якій виражені напрямки джерела світла та напрямки спостереження.

Параметри кожного пікселя на результуючій поверхні включають текстурні координати $T = (x, y)$, напрям освітлення $L = (\theta_L, \varphi_L)$, напрям спостереження $V = (\theta_V, \varphi_V)$ та локальне викривлення поверхні c_V, c_L в напрямку V та L відповідно. Від двох головних напрямів викривлення C_{max}, C_{min} і їх відповідних значень c_{max}, c_{min} викривлення в напрямку вектора спостереження V можна обчислити таким чином:

$$c_V = \frac{c_{max} (V \cdot C_{max})^2 + c_{min} (V \cdot C_{min})^2}{1 - (V \cdot N)^2} \quad (6)$$

Результати моделювання представлені на рис. 4.

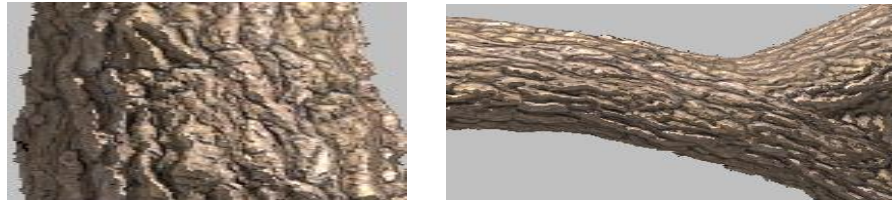


Рисунок 4 – Результати, отримані при використанні технології *view-dependent displacement mapping*

Важливою перевагою даного підходу являється те, що візуальні ефекти досягаються без збільшення складності основної зовнішньої структури поверхні. VDM дозволяє отримати достатньо реалістичні сцени, використовуючи як низько полігональні, так і високополігональні структури поверхонь. Дана технологія дозволяє формувати реалістичні візуальні ефекти на складно структурованих об'єктах та не обмежується можливостями сучасних апаратних засобів та характеризується достатньо високим показником фреймової згортки за рахунок попіксельного алгоритму.

Parallax mapping [1] - це потужна альтернатива техніці бампмаппінг і нормалмаппінг, яка дає змогу сформувати ще більше уявлення про деталі поверхні, більш натуралістичне відображення 3D поверхонь без великих втрат продуктивності. Це техніка схожа одночасно на накладання карт зміщення і нормалмаппінг. Parallax mapping модифікує накладання текстури, змінюючи текстурні координати так, що поверхня під різними кутами виглядає опуклою, хоча в реальності вона залишається плоскою і не змінюється. Ідея методу полягає в тому, щоб повертати текстурні координати тієї точки, де видовий вектор перетинає поверхню. Координати текстури, які використовуються для індексування даних текстур поверхні (колір, яскравість тощо), модифікуються відповідно до висоти поточної точки. Як показано на рис. 5, оригінальні координати текстури (u, v) замінюють на (u', v') , які розраховуються з напрямку вектора погляду $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ і значення висоти $h(u, v)$, які зчитуються з текстури в точці (u, v) за припущення, що карта висот є постійним значенням $h(u, v)$ будь-де в околі точки (u, v) . Використовуючи тотожність

$$(u' - u, v' - v) : h = (V_x, V_y) : V_z, \quad (7)$$

координати модифікованої текстури знаходяться:

$$(u', v') = (u, v) + h(u, v) \cdot \left(\frac{V_x}{V_z}, \frac{V_y}{V_z} \right). \quad (8)$$

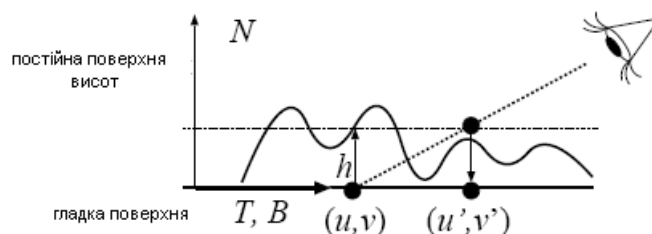


Рисунок 5 – Паралакс-меппінг

Даний метод є ефективним для поверхонь з висотами, що плавно змінюються, без прорахунку перетинів і великих значень зміщення. Після того, як обчислена нова текстурна координата, вона використовується в подальшому для отримання інших текстурних шарів: базової текстури, карти нормалей і т.п. Такий метод паралаксмаппінга на сучасних відеочіпах є достатньо ефективним, як і звичайне

накладання текстур, а його результатом є реалістичніше відображення поверхні, в порівнянні з простим нормалмаппінгом. Порівняння отриманого результату шляхом використання методу normal mapping та parallax mapping приведено на рис.6.

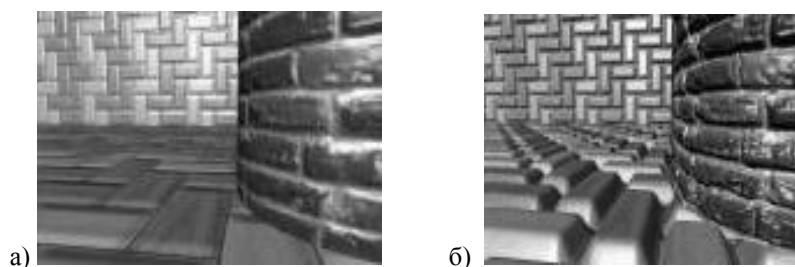


Рисунок 6 - Зображення результату отриманого методом а) normal mapping та б) parallax mapping

Використання звичайного паралаксмаппінга обмежене картами висот з невеликою різницею значень, оскільки різкі нерівності обробляються алгоритмом некоректно, з'являються різні артефакти, розмитість текстур і т.п.. В зв'язку з цим було розроблено декілька модифікованих методів для поліпшення техніки паралаксмаппінга.

Паралакс-маппінг характеризується не дуже великими обчислювальними витратами. Завдяки простоті впровадження, він може бути використаний в поєднанні з іншими видами маппінгу. Нові координати текстури можуть бути використані для індексування текстурних карт кольору поверхні, карт нормалей для бамп-маппінгу і обчислення векторів відбитого світла, карт яскравості для обчислення відбиваючої здатності, і можливо будь-який інший стандартний тип даних текстури, який може використовувати програмний додаток.

Висновки

Здійснивши аналіз основних підходів до формування шорстких поверхонь, було виявлено, що їх можна класифікувати за такими ознаками, як поверхинна чи попиксельна обробка зображення; враховують чи не враховують методи позицію спостерігача; які карти використовують – карту висот, карту нормалей чи карту зміщення. На сьогодні найбільшого поширення набувають такі методи як parallax mapping та *view-dependent displacement mapping*, оскільки вони характеризуються невеликими обчислювальними витратами, дають реалістичніші зображення в порівнянні з іншими методами та враховують позицію спостерігача, чого не можуть забезпечити інші методи формування шорстких поверхонь.

Література

1. BRAWLEY, Z., AND TATARCHUK, N. 2004. Parallax Occlusion Mapping: Self-Shadowing, Perspective-Correct Bump Mapping Using Reverse Height Map Tracing. In *Advanced Rendering with DirectX and OpenGL*, Engel, W., Ed., Charles River Media, pp. 135-154.
2. OLIVEIRA, M. M., BISHOP, G., AND MCALLISTER, D. 2000. Relief texture mapping. *Computer Graphics (SIGGRAPH '00 Proceedings)*, 359.368.
3. Kilgard J. A practical and robust bump-mapping technique for today's // In *GDC 2000: Advanced OpenGL Game Development*. - July 2000.
4. BLINN, J. F. 1978. Simulation of wrinkled surfaces. *Computer Graphics (SIGGRAPH '78 Proceedings)* 12, 3, 286.292.
5. C. Wynn, Implementing Bump-Mapping using Register Combiners, Newton-Raphson fast combiner normalization technique, 2001.
6. PATTERSON, J. W., HOGGAR, S. G., AND LOGIE, J. R. 1991. Inverse displacement mapping. *Computer Graphics Forum* 10, 2, 129.139.