

Компьютерная графика

Лекция 21

Рельефное текстурирование

Я.М.Демяненко
demyanam@gmail.com

Южный федеральный университет
Институт математики, механики и компьютерных наук

2025

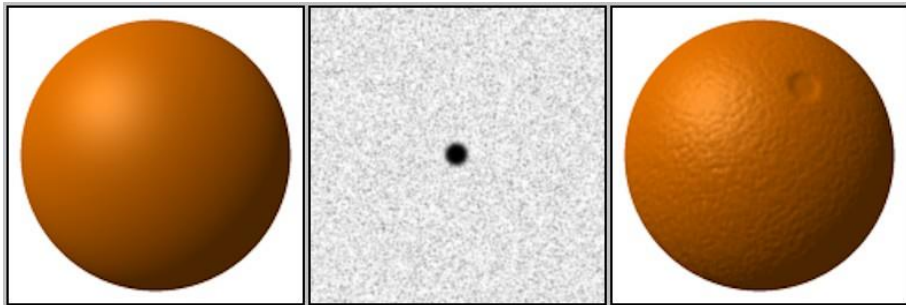
Содержание

- 1 Рельефное текстурирование — что это?
- 2 Виды рельефного текстурирования
 - Bump mapping
 - Normal mapping
 - Displacement mapping
 - Parallax mapping
 - Parallax occlusion mapping

Содержание

- 1 Рельефное текстурирование — что это?
- 2 Виды рельефного текстурирования
 - Bump mapping
 - Normal mapping
 - Displacement mapping
 - Parallax mapping
 - Parallax occlusion mapping

Что это?



Википедия

- Рельефное текстурирование — метод в компьютерной графике для придания более реалистичного и насыщенного вида поверхности объектов

В чем отличие от обычного текстурирования?

В чем отличие от обычного текстурирования?

- Рельефное текстурирование отражает реальное положение источника света в сцене и даже изменение его местоположения

Содержание

1 Рельефное текстурирование — что это?

2 Виды рельефного текстурирования

- Bump mapping
- Normal mapping
- Displacement mapping
- Parallax mapping
- Parallax occlusion mapping

Немного из истории



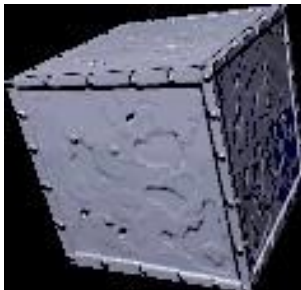
- Бамппаппинг был разработан Блинном (Blinn) еще в 1978 году

Jim Blinn

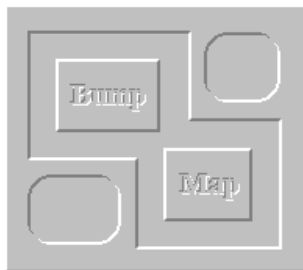


- Born: 1949
- Alma mater: University of Utah; University of Michigan
- Awards: Macarthur fellowship (1991); NASA Exceptional Service Medal
- Fields: Computer science
- Institutions: NASA's Jet Propulsion Laboratory; Microsoft Research

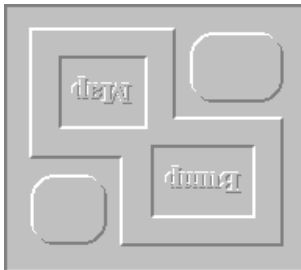
Как это?



Как действует?



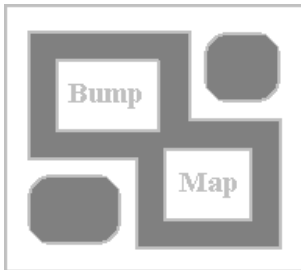
А если так?



Что такое рельефная карта?

- Рельефная карта (текстура) — это обычная текстура, только в отличие от первой, несущей информацию о цвете определенных участков, рельефная карта несет информацию о неровностях

Карта высот



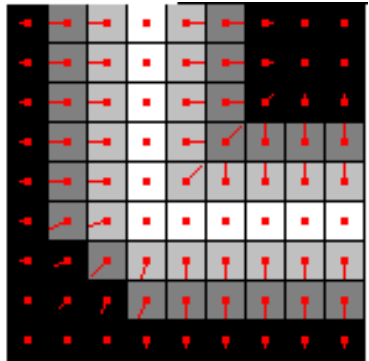
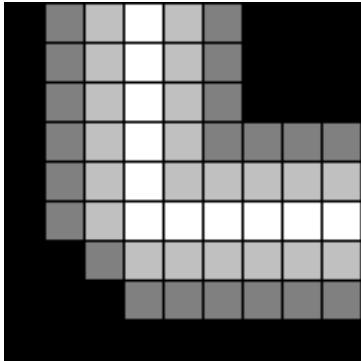
Что имитировать?

- Можно неровности и шероховатости
 - дерево
 - камень
 - шелушащуюся краску
 - и т.д.
- Нельзя крупные впадины и возвышенности

Что нужно?

- Преобразовать информацию о высоте неровностей на карте высот в информацию о величине подстройки вектора нормали

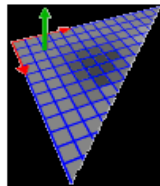
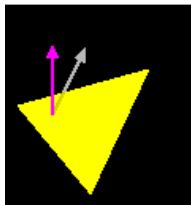
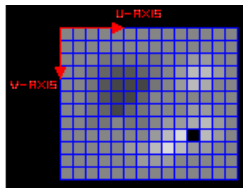
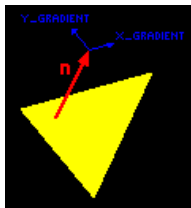
Как реализовать?



$$x_gradient = pixel(x-1, y) - pixel(x+1, y)$$

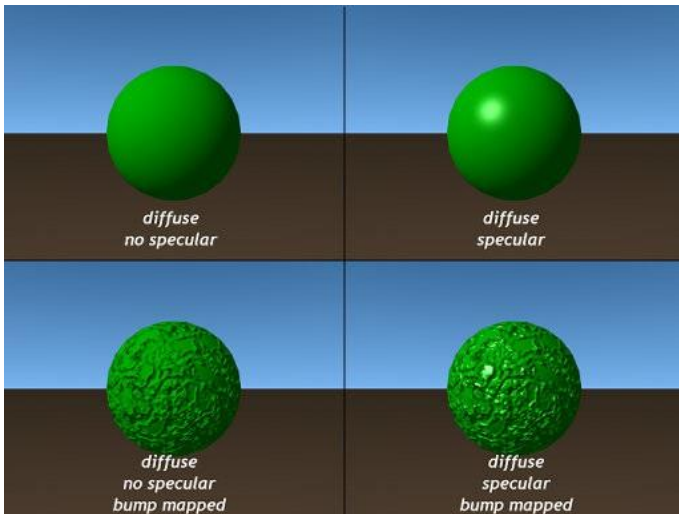
$$y_gradient = pixel(x, y-1) - pixel(x, y+1)$$

А дальше?



$$\text{New_Normal} = \text{Normal} + (U * x_gradient) + (V * y_gradient)$$

Bump mapping



Bump mapping в играх

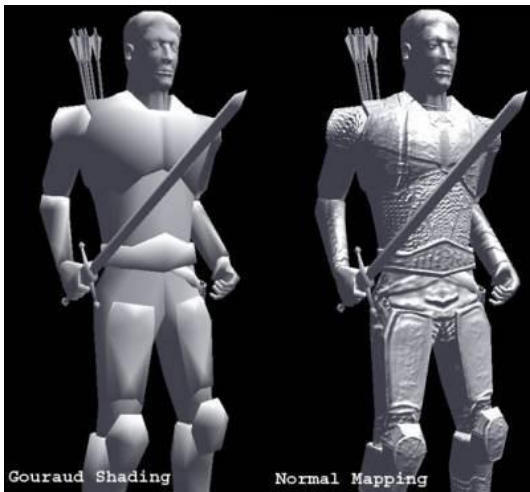


- первый рендеринг — без бампмаппинга
- второй — бампмаппинг без бликовой составляющей

Карта нормалей (normal map)

- Это дальнейшее развитие технологии бамп (bump)
- Иногда карты нормалей называют «3-х точечная бамп-карта» (Dot3 bump mapping)

Normal Mapping



Немного из истории

- Впервые идея о том, что можно «брать» детали с высокополигональной модели и переносить на низкополигональную, была предложена на SIGGRAPH в 1996 во время доклада "Использование сглаженных поверхностей для добавления плотности полигональной сетке" авторов Кришнамурати и Левой
- SIGGRAPH (The Special Interest Group for Computer Graphics)
- Тогда речь шла об использовании для Displacement Mapping
- Предлагалось использовать созданные на основе NURBS карты смещения (displacement maps) для увеличения детализации низкополигональной поверхности
- Реализация появилась гораздо позже

И ещё из истории

- В 1998 году опять на SIGGRAPH были представлены 2 доклада о перенесении деталей в виде карт нормалей от высокополигональных моделей в низкополигональные
- Один из них: «Appearance Preserving Simplification». Авторы: Jonathan Cohen, Marc Olano, Dinesh Manocha
- www.graphicon.ru/oldgr/library/siggraph/98/papers/cohen/cohen.pdf

Из статьи Appearance Preserving Simplification



Figure 1: Bumpy Torus Model. *Left*: 44,252 triangles full resolution mesh. *Middle and Right*: 5,531 triangles, 0.25 mm maximum image deviation. *Middle*: per-vertex normals. *Right*: normal maps

Appearance Preserving Simplification



249,924 triangles 62,480 triangles 7,809 triangles 975 triangles
0.05 mm max image deviation 0.25 mm max image deviation 1.3 mm max image deviation 6.6 mm max image deviation

Figure 12: Close-up of several levels of detail of the armadillo model. *Top*: normal maps *Bottom*: per-vertex normals

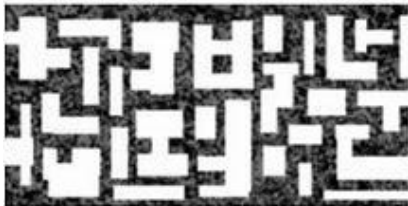
Общее: bump и normal -mapping

- Увеличивает визуальную детализацию 3d-модели без добавления дополнительных полигонов
- Карта рассчитывается для каждого пикселя текстуры

Различия: bump и normal -mapping

- Бамп рассчитывается на основе текстуры с одним каналом (grayscale — оттенки серого)
- Карты нормалей используют многоканальную RGB-текстуру, поэтому метод дает большую точность, чем Bump mapping

Bump map и Normal Map

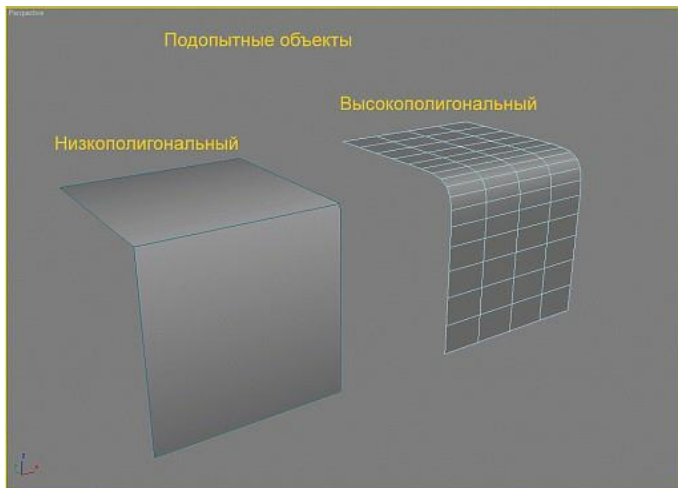


Bump Map

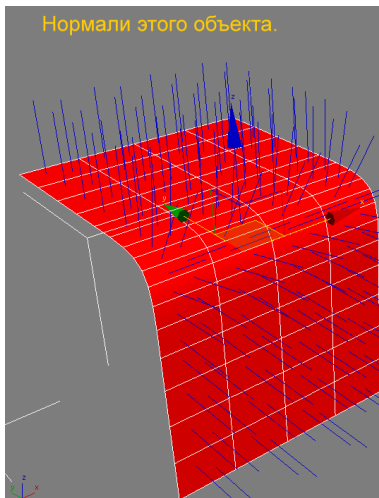


Normal Map

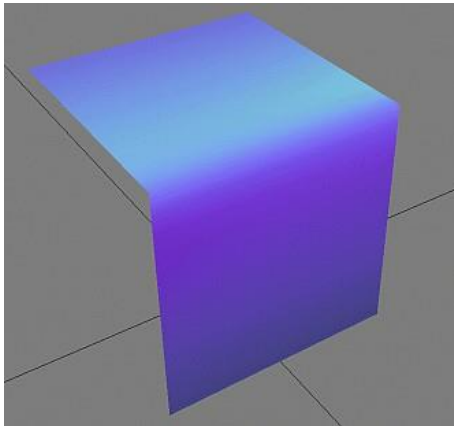
Объекты



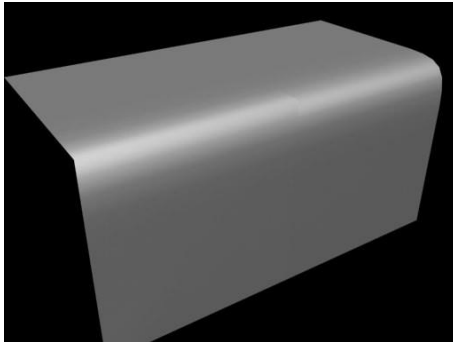
Нормали высокополигонального объекта



Карта нормалей как текстура



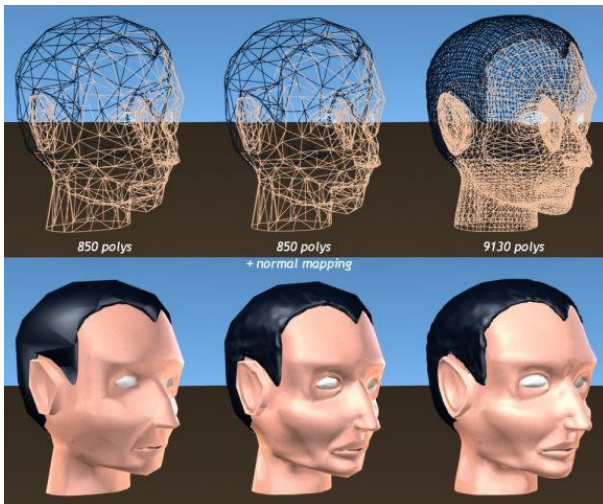
Результат



Где Normal Mapping?



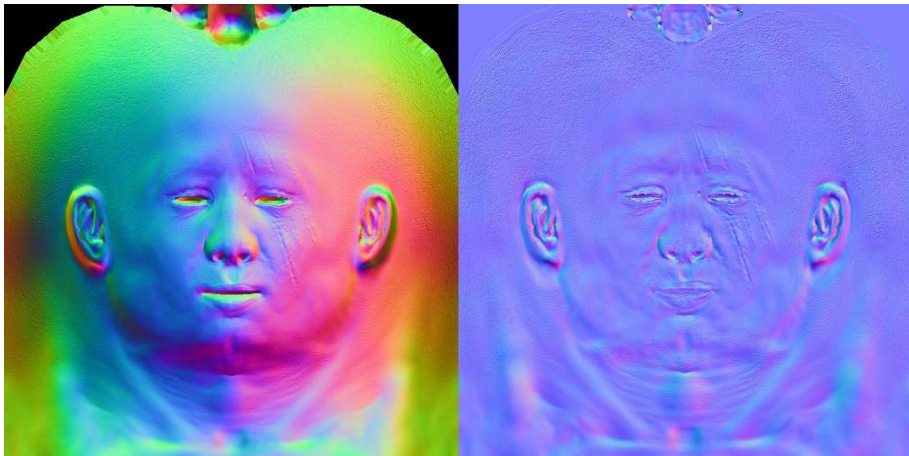
Normal Mapping: количество полигонов



Два вида карт нормалей

- В объектном пространстве (object-space): общей системе координат
- В касательном пространстве (tangent-space): локальной системе координат

Где какая?



Где какая используется и почему?

- Используется для не деформирующихся объектов, таких как стены, двери и т.п.
- Применяется для возможности деформировать объекты, например, персонажей

Общая и локальная система координат



Алгоритм для вершинного шейдера

- На вход идет:
- - позиция камеры в локальной системе координат модели
- - позиция источника света в локальной системе координат модели

Алгоритм для вершинного шейдера

- Вычислить вектор источника света
- Нормализировать его
- Трансформировать вектор источника света в пространство касательных
- Вычислить вектор камеры
- Нормализировать его
- Просчитать H вектор (модель освещения Блинна; H — half-angle vector)
- Трансформировать H вектор в пространство касательных

Алгоритм для вершинного шейдера

- На выход идет:
- - вектор источника света в пространстве касательных
- - N вектор в пространстве касательных

Алгоритм для фрагментного шейдера

- На вход идет:
- - вектор источника света в пространстве касательных
- - Н вектор в пространстве касательных
- - Color — цвет

Алгоритм для фрагментного шейдера

- Нормализовать вектор источника света и N вектор в пространстве касательных
- Прочитать нормаль из `normal` текстуры и нормировать
- Посчитать скалярное произведение вектора нормали из `normal` текстуры и вектора источника света в пространстве касательных
- Просчитать скалярное произведение вектора нормали из `normal` текстуры и N вектора в пространстве касательных
- Просчитать цвет

Применение нормалмаппинга

- Сделать низкополигональную модель достаточно детализированной для того, чтобы сохранялась основная форма объекта, и использовать карты нормалей для добавления более мелких деталей.

Применение бампмаппинга

- Можно использовать дополнительно и bump map для очень мелких деталей, которые даже в высокополигональной модели не смоделировать (поры кожи, другие мелкие углубления)

Игры

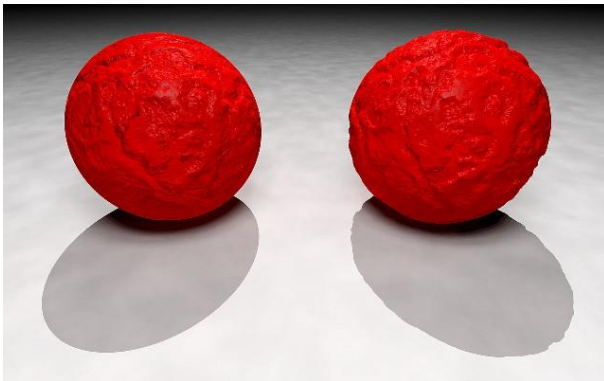
Far Cry, Doom 3, Half-Life 2, Call of Duty 2, F.E.A.R., Quake 4



Displacement mapping

- Изменяет **геометрию** поверхности по заданной карте высот, обычно передающейся в вершинный шейдер через текстуру
- Освещение считается обычным способом (пиксельный шейдер может быть практически любым), но требует высокую детализацию модели

Bump mapping и Displacement mapping



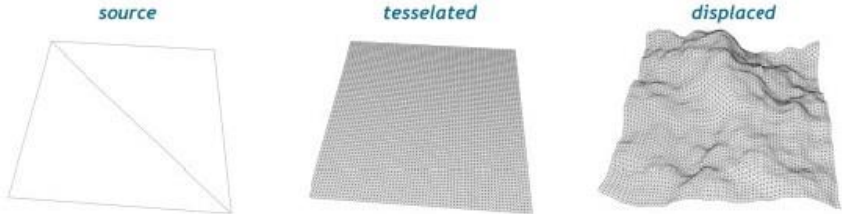
Displacement mapping

- Метод изменяет положение вершин треугольников, сдвигая их по нормали на величину, исходя из значений в картах смещения
- Карта смещения (displacement map) — это обычно полутоновая текстура, и значения в ней используются для определения высоты каждой точки поверхности объекта (значения могут храниться как 8-битные или 16-битные числа), схоже с bumpmap.

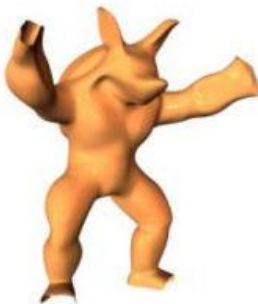
Создание ландшафта

Часто карты смещения используются (в этом случае они называются и картами высот) для создания земной поверхности с холмами и впадинами.

Исходными были 4 вершины и 2 полигона, в итоге получился полноценный кусок ландшафта



Сложный 3D объект



Немного истории

- Наложение карт смещения впервые получило поддержку в DirectX 9.0

Сжатие геометрии

- Наложение карт смещения можно по существу считать методом сжатия геометрии
- Использование карт смещения снижает объем памяти, требуемый для определенной детализации 3D модели
- Громоздкие геометрические данные замещаются простыми двумерными текстурами смещения, обычно 8-битными или 16-битными
- Это снижает требования к объему памяти и пропускной способности, необходимой для доставки геометрических данных к видеочипу

Преимущества

- Позволяет использовать намного более сложные геометрически 3D модели
- Позволяет ускорить анимацию моделей
- Улучшить внешний вид модели, применив более сложные комплексные алгоритмы и техники, вроде имитации тканей (cloth simulation)

Ограничения

- Гладкие объекты, не содержащие большого количества тонких деталей, будут лучше представлены в виде стандартных полигональных сеток или иных поверхностей более высокого уровня, вроде кривых Безье
- Очень сложные модели, такие как деревья или растения, также нелегко представить картами смещения
- Почти всегда требует специализированных утилит, ведь очень сложно напрямую создавать карты смещения (если речь не идет о простых объектах, вроде ландшафта)

Немного истории

- Parallax mapping был представлен Томомити Канэко (англ. Tomomichi Kaneko) в 2001 году

www.researchgate.net/publication/228583097_Detailed_shape_representation_with_parallax_mapping

Немного истории

- В 2004 году Welsh продемонстрировал применение параллаксаппинга на программируемых видеочипах
- Parallax mapping полностью выполняется на графических процессорах видеокарты как пиксельный шейдер

Другие названия

- Parallax Mapping
- Offset Mapping
- Virtual Displacement Mapping
- Per-Pixel Displacement Mapping

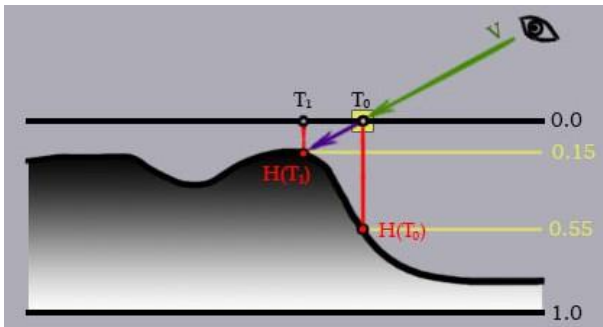
Parallax mapping

Скриншот из демонстрационного бенчмарка графического движка Irrlicht Engine



- Parallax mapping осуществляется смещением текстурных координат так, чтобы поверхность казалась объёмной

Parallax mapping



Идея метода состоит в том, чтобы возвращать текстурные координаты той точки, где видовой вектор пересекает поверхность

Это требует просчета лучей (рейтрейсинг) для карты высот

Parallax mapping и аппроксимация

- Если карта высот не имеет слишком сильно изменяющихся значений («гладкая» или «плавная»), то можно обойтись аппроксимацией без использования рейтрейсинга
- «Parallax mapping» условно можно назвать «2.5D»

Displacement mapping и Parallax mapping

- Главное отличие parallax mapping от displacement mapping в том, что в нём все расчеты попиксельные, а не поповерхностные

Normal mapping и Parallax mapping

- Parallax mapping похож одновременно на наложение карт смещения и нормалмаппинг, это нечто среднее между ними
- Данная технология также использует карты нормалей
- В отличие от normal mapping, она реализует не только освещение с учётом рельефа, но и сдвигает координаты диффузной текстуры
- Этим достигается наиболее полный эффект рельефа, особенно при взгляде на поверхность под углом

Parallax mapping и normal mapping

- Parallax mapping отличается от normal mapping всего тремя инструкциями пиксельного шейдера: две математические инструкции и одна дополнительная выборка из текстуры
- После того, как вычислена новая текстурная координата, она используется дальше для чтения других текстурных слоев: базовой текстуры, карты нормалей и т. п

Применение в играх



Применение в играх



Недостатки Parallax mapping

- Но использование обычного параллаксаппинга ограничено картами высот с небольшой разницей значений.
- "Крутые" неровности обрабатываются алгоритмом некорректно, появляются различные артефакты, "плавание" текстур и пр.

Модификации Parallax mapping

- Несколько исследователей (Yerex, Donnelly, Tatarchuk, Policarpo) описали новые методы, улучшающие начальный алгоритм.
- Почти все идеи основаны на трассировке лучей в пиксельном шейдере для определения пересечений деталей поверхностей друг другом.
- Модифицированные методики получили несколько разных названий: Parallax Mapping with Occlusion, Parallax Mapping with Distance Functions, Parallax Occlusion Mapping.

Parallax occlusion mapping (сокращённо POM)

- Усовершенствованный вариант техники «parallax mapping»
- Позволяет корректно выполнять определение перспективы и самозатенение в реальном времени

Немного истории

- Первая работа, посвященная данной методике, появилась в 2004 году на «ShaderX3», её авторами были Зоя Броули (англ. Zoe Brawley) и Наталия Татарчук, затем на мероприятии SIGGRAPH 2005
- Техника «Parallax occlusion mapping» использовалась компанией ATI для презентации возможностей третьей версии шейдерной модели в новейшей на то время видеокарте Radeon X1800
- Первым игровым движком, в котором использовался Parallax occlusion mapping, стал CryEngine 2 от немецкого разработчика Crytek, который впервые использовался в компьютерной ПК-игре Crysis 2007 года выпуска

Из доклада Наталии Татарчук

Parallax Occlusion Mapping vs. Actual Geometry



An 1,100 polygon object rendered with
parallax occlusion mapping



A 1.5 million polygon object
rendered with diffuse lighting

Из доклада Наталии Татарчук

Parallax Occlusion Mapping vs. Actual Geometry



An 1,100 polygon object rendered with
parallax occlusion mapping (wireframe)



A 1.5 million polygon object
rendered with diffuse lighting
(wireframe)

Из доклада Наталии Татарчук

Parallax Occlusion Mapping vs. Actual Geometry



- 1100 polygons with parallax occlusion mapping (8 to 50 samples used)
- **Memory:** 79K vertex buffer
6K index buffer
13Mb texture (3Dc)
(2048 x 2048 maps)

Total: < 14 Mb

Frame Rate:

- **255 fps** on ATI
Radeon hardware
- **235 fps** with skinning



- 1,500,000 polygons with diffuse lighting
- **Memory:** 31Mb vertex buffer
14Mb index buffer

Total: 45 Mb

Frame Rate:

- **32 fps** on ATI Radeon
hardware

Parallax occlusion mapping

Реализация алгоритма Parallax occlusion mapping в бенчмарке 3DMark Vantage 2008 года. Данное изображение построено при помощи двух полигонов (треугольников), расположенных на одной плоскости



Parallax occlusion mapping



Недостатки

- Невысокая детализация силуэтов и граней
- Видеокарта должна обеспечивать надлежащий уровень скорости исполнения операций ветвления в пиксельном шейдере
- Отсутствие геометрически правильных силуэтов (краев объекта)

Parallax occlusion mapping

- Используется в некоторых компьютерных играх, например, S.T.A.L.K.E.R, Crysis, Metro 2033 и ArmA 2
- Также эта технология используется в популярном бенчмарке 3DMark Vantage

Сравнение

