

Построение карт смещений для произвольных полигональных моделей с использованием программируемой графической аппаратуры

И.О. Тисевич, А.В. Игнатенко

Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа
Московский государственный университет, Москва, Россия
ilya.t@mail.ru, ignatenko@graphics.cs.msu.ru

Аннотация

Карты смещения (displacement maps) – это текстуры специального формата, которые при наложении на трехмерную модель для каждой точки полигональной поверхности задают ее смещение от плоскости полигона, что позволяет повысить детализованность объекта без усложнения геометрической модели. В работе предлагается алгоритм построения карты смещений для упрощенной геометрической модели объекта по исходной высокодетализированной модели. Разработанный алгоритм позволяет получать карту смещений для двух произвольных моделей, не накладывая существенных ограничений на их структуру.

Ключевые слова: карта смещений, уровень детализации, упрощение модели, рельефное текстурирование, relief mapping, displacement map, level-of-detail, GPU algorithms.

1. ВВЕДЕНИЕ

Карты смещения используются при создании и визуализации высококачественных полигональных моделей для добавления мелких деталей, например, деталей рельефа кожи моделей живых существ, фактуры материала объектов. Часто карты смещения применяются для упрощенной (низкополигональной) модели с целью реконструкции исходной высокополигональной модели. Это позволяет многократно уменьшить объем хранимых или передаваемых данных и упрощает сам процесс моделирования, поскольку сложные операции с трехмерной моделью можно заменить более простыми операциями с изображениями.

Как правило, карта смещения представлена в виде изображения, которое отображается на упрощенную геометрию как текстура. При этом яркость каждого текселя задает смещение от поверхности полигона, на который отображен данный участок карты смещения. Традиционно карты смещений использовались при неинтерактивной визуализации с помощью трассировки лучей.

С развитием аппаратных ускорителей графики появились новые возможности использования карт смещения. Такие алгоритмы как Steep Parallax Mapping [1] и Relief Mapping [2] позволяют интерактивно визуализировать низкополигональную модель с использованием карт смещения таким образом, что синтезированное изображение упрощенной модели практически неотличимо от изображения исходной. Этот метод позволяет значительно повысить видимую детализацию трехмерных моделей во время интерактивного синтеза без увеличения сложности геометрии.

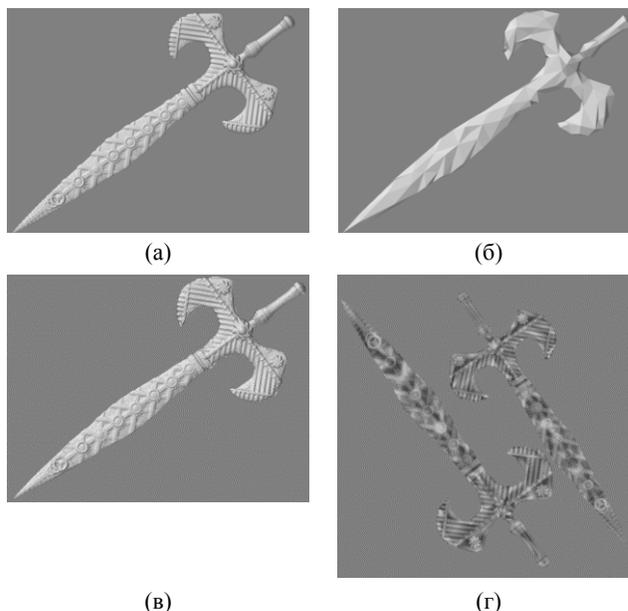


Рис. 1. Пример работы алгоритма, модель «Sword». (а) исходная модель, 141312 полигонов (б) упрощенная модель, 438 полигонов (в) восстановленная с помощью построенной карты смещений модель (г) построенная карта смещений, 512x512.

Однако на данный момент лишь некоторые популярные программные продукты (например, [3,4]) предоставляют возможность построения карт смещений по двум (исходной и упрощенной) моделям. При этом на сами модели накладываются жесткие ограничения: множество вершин упрощенной модели должно представлять собой подмножество вершин исходной модели, что сильно ограничивает возможности применения качественных алгоритмов упрощения.

Предлагаемый алгоритм позволяет получать карты смещений для произвольных пар моделей. Это позволяет использовать упрощенную модель, полученную из исходной при помощи алгоритмов упрощения и оптимизации модели, которые входят в состав большинства популярных пакетов трехмерного моделирования (рис. 1).

Данный алгоритм позволяет за время, сопоставимое со временем работы существующих алгоритмов, получать карты смещения, не предъявляя к исходным моделям жестких требований. Высокая скорость работы достигается за счет использования возможностей программируемых графических ускорителей в процессе построения карты смещений.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ

2.1 Требования к входным данным

Требования, предъявляемые к моделям, включают:

- Однозначное соответствие любых областей текстуры, “покрытых” текстурной разметкой упрощенной модели, соответствующим участкам полигонов этой модели (рис. 2). При невыполнении требования можно произвести так называемую развертку (unwrapping) модели, то есть устранение искажений и перекрытий текстурных координат. Для этого существуют специализированные программные продукты, например [6].
- Однозначное соответствие элементов проекции областей высокополигональной модели на полигоны упрощенной модели. На практике это требование практически всегда выполнено.

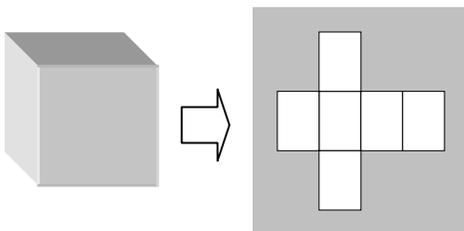


Рис. 2. Модель куба и его возможное отображение в текстуру, требуемое для работы алгоритма.

2.2 Алгоритм построения карты смещений

Суть алгоритма заключается в проецировании на каждый полигон упрощенной модели соответствующей области высокополигональной модели и преобразования полученных данных в текстуру (карту смещения) с учетом текстурных координат, заранее присвоенных каждой из вершин упрощенной модели.

Будем считать, что упрощенная модель представлена в виде единого множества полигонов, имеющих общее текстурное пространство (разделяющих одну текстуру).

Алгоритм работает в следующей последовательности:

1. Построение дерева отсечения (см. п. 2.3).
2. Для каждого треугольника i упрощенной модели:
 - a. Вычисление матрицы M_p^i проекции треугольника на его образ в текстуре (карте смещений).
 - b. Вычисление частей высокополигональной модели, которые при помощи матрицы M_p^i проецируются на образ треугольника i в текстуре. Для этого используется дерево отсечений, построенное ранее.
 - c. Визуализация полученных на предыдущем шаге треугольников высокополигональной модели с помощью матрицы проекции

M_p^i и сохранение в карте смещений нормализованных значений буфера глубины в области образа треугольника i .

Матрица M_p^i задаёт такое преобразование, что пространственные координаты вершин текущего треугольника низкополигональной модели преобразуются в экранные координаты, совпадающие с координатами треугольника на текстуре, соответствующего данному полигону.

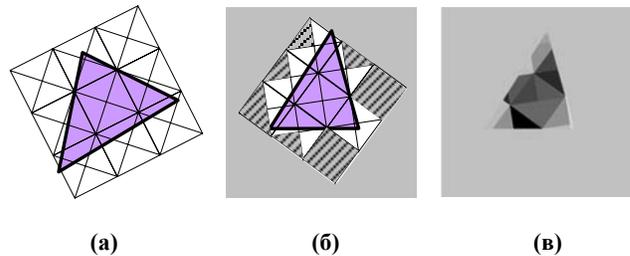


Рис. 3. Процесс построения карты смещений: (а) треугольник упрощенной модели (закрашен) и треугольники исходной модели. (б) образ треугольника в текстуре и проекция треугольников исходной модели; заштрихованы треугольники, отсеченные деревом отсечений (в) результирующая карта смещений после растеризации.

Определение области высокополигональной модели, проецируемой на образ треугольника низкополигональной модели и построение соответствующей области карты смещений – это наиболее затратные с точки зрения алгоритмической сложности этапы. Поэтому генерация карты смещений было реализовано с использованием программируемой графической аппаратуры (на языке Cg с применением вершинных и пиксельных программ версии 2.0), что позволило ускорить время генерации карты смещений в несколько раз, по сравнению с аналогичным алгоритмом, реализованным на CPU.

2.3 Дерево отсечений

На данный момент графические ускорители не позволяют эффективно отсекалть невидимые или ненужные треугольники. Поэтому при расчёте смещения для каждого из треугольников низкополигональной модели приходится заново просматривать всю высокополигональную модель и производить отсечение в пиксельной программе. Это приводит к лишним операциям на графическом процессоре и заметному снижению производительности (особенно для сложных моделей).

Для решения этой проблемы был разработан алгоритм построения и использования дерева отсечений, который значительно сужает множество треугольников, требующих проецирования.

Дерево отсечений – это октодерево, построенное в пространстве исходной модели, которое используется для быстрого отсечения лишних треугольников. Для того, чтобы произвести отсечение всех лишних треугольников, строятся три плоскости, каждая из которых перпендикулярна плоскости заданного треугольника упрощенной модели и содержит одно из его рёбер. Нормаль каждой из плоскостей направлена в полуплоскость, в которой целиком содержится

заданный треугольник. Треугольники высокополигональной модели, целиком находящиеся во «внешней» полуплоскости хотя бы одной из трёх плоскостей, не проецируются ортогонально на заданный треугольник низкополигональной модели и могут не визуализироваться.

Таким образом, алгоритм построения дерева отсечений позволяет сопоставить каждому треугольнику упрощённой модели набор тех и только тех треугольников сложной модели, которые полностью или частично на него проецируются.

Использование дерева отсечений позволяет ускорить генерацию карты смещений в сотни раз (см. табл. 1).

3. ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА

Метод вычисления смещения, основанный на ортогональной проекции, не позволяет охватить всю поверхность сложной модели, кроме тех случаев, когда грани полигонов упрощённой модели целиком принадлежат поверхности исходной модели.

На рис. 4 показано изображение сечения поверхности двух моделей: исходной и упрощённой. Можно видеть, что часть модели, расположенная на стыке полигонов упрощённой модели не проецируется ортогографически ни на один из этих полигонов. Таким образом, часть информации об исходной модели будет потеряна. Такая ситуация возникает из-за неудачного построения упрощённой модели: вершины её полигонов не лежат на поверхности сложной модели. Тем не менее, популярные программные средства [3,4,5] для упрощения моделей стараются разместить максимально возможное количество вершин на исходной поверхности (в большинстве случаев так строятся все вершины).

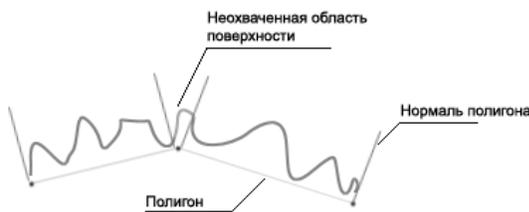


Рис. 4. Неохваченная область поверхности исходной модели появилась вследствие неудачного построения упрощённой модели.

Однако даже если все точки упрощённой модели принадлежат поверхности исходной модели, некоторые участки высокополигональной модели выходят за границы проецирования. На рис. 5 показан участок поверхности сложной модели и два прямоугольных полигона упрощённой модели. Вершины этих полигонов лежат на исходной поверхности, однако ближе к центру их общего ребра поверхность сложной модели значительно отстает от линии пересечения полигонов, что приводит к ситуации, показанной на рис. 5. Аналогично предыдущему случаю, это приводит к потере информации в карте смещений и артефактам при реконструкции.

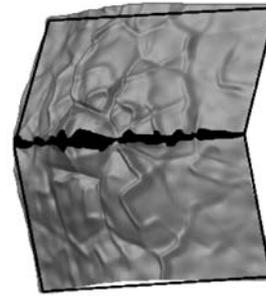


Рис. 5. «Отставание» поверхности сложной модели от рёбер полигонов породило потерянный участок (показан черным).

В критических участках модели возможно решить эту проблему путём перемещения полигонов упрощённой модели, либо путём построения усложнённой её версии. Тестирование, проведённое на реальных моделях, показало, что потери незначительны и не заметны невооружённым глазом.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Алгоритм был реализован с помощью языка Cg и C++, с использованием Windows API и Direct3D 9.0.

Сравнение времени полного цикла построения одной карты смещений для разных моделей приведено в табл. 1. Тесты показывают, что в большинстве случаев использование дерева отсечений позволяет существенно ускорить построение карты смещений даже на одном цикле.

Алгоритм построения карт смещений имеет некоторые параметры, требующие ручной настройки, такие, например, как отсечение задней поверхности, максимальная допустимая абсолютная величина смещения или требуемый формат карты смещений. Поскольку дерево отсечений для каждой пары моделей необходимо построить лишь один раз, то при его использовании каждое повторное построение карты смещений с изменёнными параметрами занимает в среднем от 25 до 140 миллисекунд (точные данные представлены в таблицах, показанных выше). Таким образом, изменяя те или иные параметры, пользователь может в реальном времени видеть, как они отражаются на результате, что позволяет очень сильно ускорить процесс нахождения оптимальной конфигурации карты смещений.

Существующие алгоритмы построения карт смещений, в отличие от разработанного алгоритма, существенно привязаны к методу получения упрощённой модели, поэтому прямое сравнение времени генерации карты смещений неадекватно. Тем не менее, на практике при сходных по качеству результатах, разработанный алгоритм позволяет получать карту смещений за сравнимое время. Например, для модели Bunny время построения карты смещений 512x512 в программ Pixologic ZBrush 2.0 составляет около 2с, тогда как разработанный алгоритм работает около 5,5с. Тем не менее, более длительное время работы полностью оправдывается возможностью применять качественные алгоритмы упрощения, и, следовательно, получать более качественную результирующую модель с картой смещений.

Модель	N polys	L polys	T tree (ms)	R 512 (ms)	RT 512 (ms)	R 2048 (ms)	RT 2048 (ms)
Sphere	262144	16384	118724.9	131838.6	126.3	170696.3	139.3
Sword	282624	438	3531.8	4076.8	24.9	4738.4	27.8
Bunny	138902	1698	5463.3	3325.8	24.0	3511.1	24.5

Табл. 1. Время построения карты смещения для различных моделей. N polys - количество полигонов в сложной модели, количество полигонов в упрощенной модели, T tree - время построения дерева отсечений, R 512 - время построения карты смещений размером 512x512 без использования дерева отсечений, RT 512 - время построения карты смещений размером 512x512, с использованием дерева отсечений, R 2048 - время построения карты смещений размером 2048x2048 без использования дерева отсечений, RT 2048 - время построения карты смещений размером 2048x2048 с использованием дерева отсечений.

Конфигурация тестового компьютера :

Intel Pentium 4 2.4 GHz 512KB cache FSB 533, 1024 + 128 MB RAM pc2700, ASUS nVidia 6600GT 128MB.

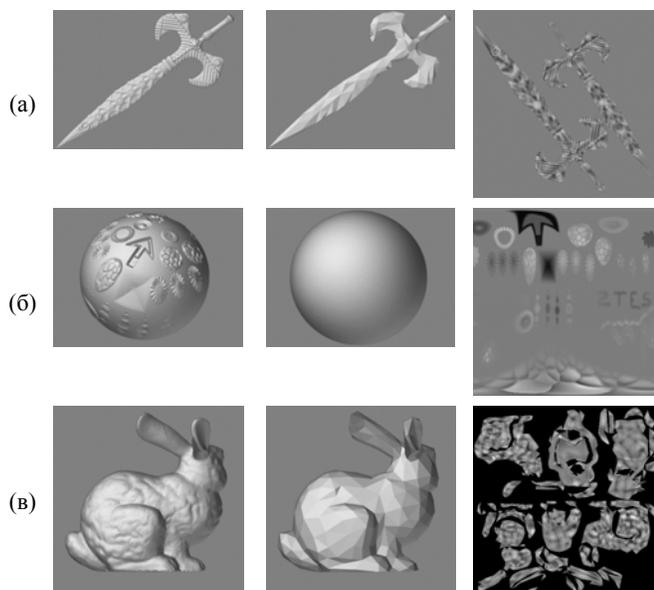


Рис. 6. Примеры генерации карт смещения для различных моделей: (а) Sword (б) Sphere (в) Bunny.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет строить карты смещений для произвольных пар моделей, не накладывая существенных ограничений на их структуру, за время, сопоставимое со временем работы существующих алгоритмов. Это позволяет использовать упрощенную модель, полученную из исходной при помощи высокоэффективных алгоритмов упрощения и оптимизации модели.

6. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Morgan McGuire and Max McGuire. *Steep Parallax Mapping*. I3D 2005 Poster, 2005.
- [2] Fabio Policarpo, Manuel M. Oliveira, João Comba. *Real-Time Relief Mapping on Arbitrary Polygonal Surfaces*. ACM SIGGRAPH 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2005, pp. 155-162.

[3] *Pixologic ZBrush*. <http://www.pixologic.com>.

[4] *Discreet 3D Studio MAX*. <http://www.discreet.com>.

[5] *Rational Reducer*. <http://www.sim.no>.

[6] *Ultimate Unwrap3D*. <http://www.unwrap3d.com>

Об авторах

Илья Олегович Тисевич – студент факультета вычислительной математики и кибернетики Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: ilya.t@mail.ru

Алексей Викторович Игнатенко – младший научный сотрудник факультета вычислительной математики и кибернетики Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова

E-mail: ignatenko@graphics.cs.msu.ru

Hardware-accelerated generation of displacement maps for arbitrary polygonal models

Abstract

Displacement maps are special textures which define an offset for each point on the polygonal surface, which allows to increase the quality of the model without increasing the complexity of the geometric model. This article proposes a GPU-accelerated algorithm for construction of displacement maps for coarse 3D model from its detailed version. Developed algorithms can generate displacements maps for arbitrary pairs of geometric models, without applying significant restrictions on their structure.

Ключевые слова: relief mapping, displacement map, level-of-detail, GPU algorithms, geometric simplification.

About the authors

Ilya Tisevich is a student at Moscow State University, Department of Computer Science. His contact email is ilya.t@mail.ru.

Alexey Ignatenko is a researcher at Moscow State University, Department of Computer Science. His contact e-mail is ignatenko@graphics.cs.msu.ru