

УДК 681.3.10

С. И. Вяткин¹, О. В. Романюк²

¹Институт автоматизи́ки и электрометрии Сибирского отделения РАН
просп. Академика В.А. Коптюга, 1, 630090 Новосибирск, Россия

²Винницкий национальный технический университет
Хмельницкое шоссе, 95, 21021 Винница, Украина

Метод формирования изображений рельефных поверхностей

Рассмотрены вопросы использования скалярных функций возмущения для визуализации микрорельефа и поверхностей свободных форм трехмерных объектов. Предложены новые методы задания и визуализации поверхностей на основе скалярных функций возмущения. Показаны преимущества перед существующими методами — сплайн базиремыми, полигональным представлением объектов и методами визуализации микрорельефа. Свободная форма может иметь порядок, значительно превосходящий третий, и в то же время моделироваться одной картой высот. Это эквивалентно заданию такой же поверхности большим количеством сплайн-патчей, что увеличивает время геометрической обработки поверхности на величину прямо пропорциональную их количеству.

Ключевые слова: скалярные функции возмущения, свободные формы.

Введение

Основные производители графических акселераторов стремятся повышать реалистичность уже не только за счет количества полигонов. Такие технологии как Bump Mapping и Environment Mapped Bump Mapping позволяют на порядок увеличить реалистичность изображения, не требуя для этого повышения количества геометрических примитивов. В настоящий момент все эти эффекты моделируются за счет специфических приемов, типа Environment Map – Bump Mapping или Elevation Map, недостатками которых являются сильные ограничения на условия их применения. Например, в случае Elevation Map реализм достигается только при углах зрения близких к прямому углу. Повышение степени детализации ведет к сильной загрузке транспортных магистралей, и, хотя вычислительных мощностей современных процессоров вполне хватает для обработки такого количества полигонов, пропускной способности не хватает для передачи данных. Применение текстуры решает проблему реалистичности лишь отчасти, так как вблизи

© С. И. Вяткин, О. В. Романюк

объект все так же представляется как плоскость с наклеенной картинкой. Эффекты типа Bump Mapping немного улучшают картину, но и они обладают существенными ограничениями.

Таким образом, повышение реализма идет уже не только за счет количества примитивов, которыми представлена сцена, а за счет моделирования специальных эффектов окружающей среды и мелких деталей поверхностей объектов сцены, причем все выше описанные технологии, применяемые в современных графических акселераторах, не решают эту задачу в полном объеме. Это обстоятельство обуславливает необходимость разработки более производительных и точных методов и средств отображения трехмерных графических объектов.

Анализ методов и постановка задачи

В современных графических процессорах для визуализации особенностей трехмерных объектов применяется совокупность синтезирующих методов [1]. Среди них выделяют класс методов для визуализации неровностей поверхности (микрорельефа) трехмерных объектов. Их использование позволяет воспроизводить структуру поверхности объекта более реалистично.

Существуют два основных метода визуализации микрорельефа: на уровне геометрии и на уровне визуализации плоских поверхностей. Отображение микрорельефа на уровне геометрии достигается за счет использования триангуляции объекта и последующего смещения новых вершин в нужную позицию (displacement mapping). Другой метод визуализации микрорельефа основан на изменении освещенности неровностей и смещении текстурных координат для выборки из текстур материала. На данный момент наиболее популярны следующие разновидности такого метода: метод карт нормалей (normal mapping [2]), метод текстурирования с перекрытием (parallax mapping [3]) и рельефное текстурирование (relief mapping [4, 5]). Также существует множество их модификаций, устраняющих те или иные их недостатки, например, метод рельефного текстурирования на основе сферических гармоник (spherical harmonic relief mapping) и пр.

Метод карт нормалей использует специальную текстуру, содержащую информацию о нормалях (вектор направления) в точках поверхности объекта. Такой метод позволяет приближенно передать рельефность поверхности при помощи видимых различий в освещенности неровностей.

В методе текстурирования с перекрытием используются метод карты нормалей и одноканальная карта высот, которая, как правило, хранится в виде четвертой компоненты карты нормалей. Для имитации рельефности в видимых точках вычисляется величина смещения текстурных координат. После этого новые координаты используются для выборки из текстуры. Величина смещения рассчитывается из данных карты высот и положения наблюдателя.

Метод рельефного текстурирования представляет собой форму упрощенной локальной трассировки лучей. Трассировка используется для нахождения ближайшей точки, видимой по направлению из точки наблюдения. Эта точка определяет текстурные координаты, используемые как и в случае текстурирования с перекрытием. Существуют различные способы нахождения видимой точки. Линейный поиск с последующим уточнением методом бинарного поиска является од-

ним из них. Суть линейного поиска заключается в равномерном разбиении текстурного пространства на ряд слоев и нахождение ближайшего слоя, точка пересечения с которым попадает внутрь предполагаемого рельефа. После этого на отрезке между найденным слоем и предыдущим производится бинарный поиск с целью уточнения точки пересечения. Как правило, число слоев и глубину бинарного поиска ограничивают сравнительно небольшими величинами, поэтому найденная точка будет лишь некоторым приближением. Такое ограничение связано с вычислительной сложностью точного поиска. С развитием аппаратных возможностей для систем виртуальной реальности становятся актуальными более эффективные и точные методы визуализации как микрорельефа, так и трехмерных объектов и сцен в целом.

В данной работе рассматривается метод формирования высоко-детализированных поверхностей на основе скалярных функций возмущения [6]. Принципиальное отличие предлагаемого метода от остальных заключается в неполигональном представлении поверхностей и применении метода многоуровневого отслеживания лучей для рендеринга сцены. Использование метода многоуровневого отслеживания лучей устраняет недостатки, характерные для систем с растриванием на плоскости и воксельно-базируемых систем. Требования, предъявляемые к методам задания сложных поверхностей, можно кратко описать как:

- снижение объемов данных, необходимых для задания высоко-детализированных объектов;
- уменьшение времени геометрической обработки высоко-детализированных объектов.

Формирование поверхностей свободных форм на основе скалярных функций возмущения

Определим основные понятия и термины, которые будут использоваться в дальнейшем. Открытое односвязное множество точек на плоскости будем называть плоской областью. Пусть D — плоская область, а \bar{D} — ее замыкание. Введем на плоскости координатную систему (u, v) . Пусть x, y, z — прямоугольные декартовы координаты точек в трехмерном Евклидовом пространстве E^3 . Заддим на множестве \bar{D} три непрерывные функции:

$$x = \phi(u, v), \quad y = \psi(u, v), \quad z = \chi(u, v). \quad (1)$$

Предположим, что функции (1) обладают следующими свойствами. Если (u_1, v_1) и (u_2, v_2) различные точки множества \bar{D} , то точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$ пространства E^3 , координаты которых вычислены по формулам (1), тоже различны:

$$\begin{aligned} x_1 &= \phi(u_1, v_1), \quad y_1 = \psi(u_1, v_1), \quad z_1 = \chi(u_1, v_1), \\ x_2 &= \phi(u_2, v_2), \quad y_2 = \psi(u_2, v_2), \quad z_2 = \chi(u_2, v_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Множество S точек $M(x, y, z)$, координаты x, y, z которых определяются соотношениями $x = \phi(u, v)$, $y = \psi(u, v)$, $z = \chi(u, v)$, где функции ϕ, ψ, χ в замыкании \bar{D} области D обладают вышеописанным свойством, называется *простой поверхностью*.

Далее, *сложной поверхностью* F будем называть *простую поверхность*, являющуюся графиком функции, определенной в 3-мерном пространстве $z = f(x, y)$. Задание сложной поверхности на основе скалярного поля представляет собой совокупность некоей *базовой поверхности* P , находящейся в той же системе координат, что и F , и связанной с базовой поверхностью P карты высот. Карта высот представляет собой двумерный прямоугольник, который далее будет именоваться *областью возмущения* D базовой поверхности P , внутри которого задана функция возмущения $h(u, v)$. Карта высот, в свою очередь, определяет само возмущение. Область определения функции $h(u, v)$ $D_{h(u,v)} = \{U, V\}$, где U и V — размеры прямоугольника. Карта высот связана с базовой поверхностью следующим образом: существует преобразование $G(\mathbb{R}^3 \Rightarrow \mathbb{R}^2)$ из системы координат, в которой находятся F и P , в систему координат карты высот. Как правило, таким преобразованием является параллельная проекция.

Значение функции $h(G(d_F))$ характеризует отклонение точки d_F , лежащей на поверхности F , от точки d_P , являющейся проекцией этой точки на поверхность P . Другими словами, значение функции $h(G(d_F))$ равно модулю вектора

$$\vec{v} = (d_F - d_P). \quad (3)$$

Следовательно, область сложной поверхности можно определить как множество точек в \mathbb{R}^3 , определяемых векторным уравнением

$$\vec{F} = G(\vec{v}) + \vec{n} \cdot h(G(\vec{v})); \forall \vec{v} \in \mathbb{R}^3, \quad (4)$$

где \vec{n} — нормаль к базовой поверхности.

Если \vec{v} находится за пределами области возмущения, то вектор $\vec{n} \cdot h(G(\vec{v})) = 0$, а вектор \vec{F} является вектором на базовой поверхности. Таким образом, для задания формы возмущающей поверхности можно использовать таблицу чисел, а в качестве функции h можно использовать функцию интерполяции по узловым значениям, которые берутся из таблицы (рис. 1). В таком случае, можно сказать, что в области возмущения D_P будет задано *скалярное поле*.

Функция h имеет следующий вид:

$$h(u, v) = f_0 + (f_1 - f_0) \cdot (v - m_v), \quad (5)$$

где

$$f_0 = (1 - (u - m_u)) \cdot table[m_u, m_v] + (u - m_u) \cdot table[m_u + 1][m_v];$$

$f_1 = (1 - (u - m_u)) \cdot table[m_u, m_v + 1] + (u - m_u) \cdot table[m_u + 1][m_v + 1];$
 m_u — целая часть u ;
 m_v — целая часть v ;
 $table[m_u][m_v]$ есть m_u, m_v -й элемент таблицы (рис. 1).

Итак, задание сложной поверхности F на основе скалярного поля есть: базовая поверхность, преобразование из системы координат базовой поверхности в систему координат карты высот, функция возмущения и таблица чисел, характеризующих отклонения поверхности F относительно базовой в контрольных точках. Далее, будем использовать понятие поверхности свободной формы F как комбинацию плоскости и возмущающей поверхности, которая может быть поверхностью с прямоугольным контуром (рис. 2) или поверхностью, определяемой векторным уравнением (4).

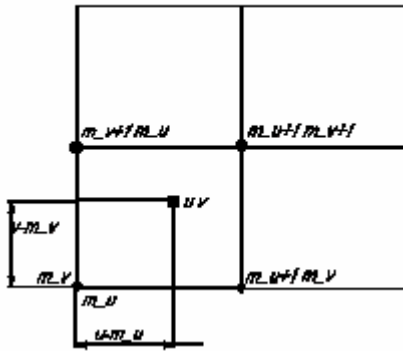


Рис. 1. Таблица чисел

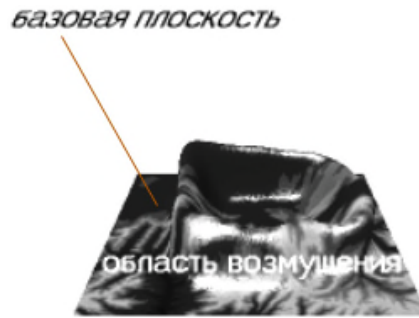


Рис. 2. Комбинация базовой плоскости и области возмущения

Для того чтобы стало возможным отображать объекты с «нелинейной» границей, было введено понятие порогового значения, находящегося в узле таблицы, и критерий принадлежности точки пространства:

$$\begin{cases} \vec{F} = G(\vec{v}) + \vec{n} \cdot h(G(\vec{v})), \\ h(G(\vec{v})) \geq threshold, \\ G(\vec{v}) \in D_p, \\ \forall \vec{v} \in \mathfrak{R}^3, \end{cases} \quad (6)$$

где \vec{n} — нормаль базовой поверхности, а $threshold = const \in R$ и означает пороговое значение.

Введение требования принадлежности образа $G(\vec{v})$ вектора \vec{v} к области возмущения D_p позволяет отсекал части пространства, которые отображаются в зо-

ну, находящуюся вне области возмущения. По критерию $h(G(\vec{v})) \geq \text{threshold}$ отсекаются элементы пространства, образ которых лежит в области возмущения, но которые не принадлежат моделируемому объекту. Область в карте высот, удовлетворяющая этим требованиям, определяет в области возмущения многосвязную область, которая и используется при моделировании объекта (рис. 3, 4). Поверхность F должна быть поверхностью нулевого уровня некой функции. Это означает, что каждой точке на базовой плоскости можно поставить в соответствие одну и только одну точку на поверхности F . Таким образом, смоделировать одной картой высот, например, поверхность вращения нельзя, так как в этом случае одной точке на плоскости будут соответствовать две точки на поверхности. Для моделирования поверхностей, не являющихся поверхностями нулевого уровня функции, предлагается метод *раздельного моделирования*. Для раздельного моделирования поверхностей, не являющихся поверхностями нулевого уровня функции, необходимо разбиение плоскости исходной поверхности F на составляющие ее патчи $F = F_1 \cup F_2 \dots \cup F_i \dots \cup F_n$. Построение вышеописанным методом карт высот по отдельности для каждой из этих разбивающих плоскостей и моделирование с помощью логических операций исходной поверхности из набора моделей патчей происходит по двум критериям.

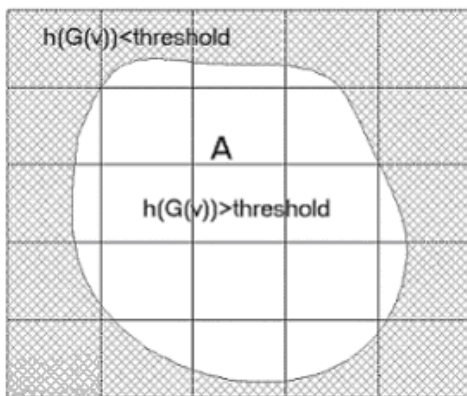


Рис. 3. Область возмущения

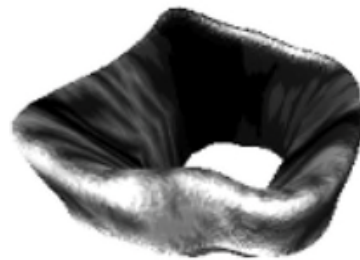


Рис. 4. Поверхность свободной формы

Первый заключается в возможности построения карты высот применительно к данной разбивающей плоскости, части объекта, расположенной в той части полупространства, которая находится в направлении вектора нормали разбивающей плоскости. Вторым критерий заключается в возможности построения исходного объекта с помощью логических операций из полученных моделей патчей. Другими словами, должно существовать разбиение объекта плоскостями такое, чтобы части, отсекаемые плоскостями, в совокупности представляли собой исходный объект. Применение такого подхода значительно расширяет класс моделируемых поверхностей (рис. 5–7).

Для визуализации применяется метод многоуровневого отслеживания лучей [6]. То есть, через каждый пиксель плоскости изображения пускается луч от взгляда наблюдателя через пирамиду видимости (объектное пространство). Эти

лучи проецируются на базовую плоскость. Выделение формы поверхности происходит на этапе деления луча по z координате. По размерам проекции воксела, соответствующего уровня рекурсии, вычисляется уровень детализации.



Рис. 5. Функционально заданная сцена (F-117 над горой Бандай, Япония)



Рис. 6. Функционально заданный объект (АК-47)



Рис. 7. Микрорельеф на основе скалярных функций возмущения

Заключение

Задание высоко-детализированных поверхностей на основе скалярных функций возмущения, позволяющее оперировать со сложными объектами как с текстурой, устраняет зависимость времени генерации изображения от количества входных данных. Такое представление решает проблему больших потоков данных, так как в геометрическом процессоре обрабатывается только базовая (несущая) поверхность. Метод растривания обладает всеми достоинствами прису-

щими алгоритмам объемного рендеринга, которые позволяют, в отличие от алгоритмов растривания на плоскости, отображать не только поверхности, но и внутренние структуры объектов. Объекты сцены F-117 (рис. 5) и АК-47 (рис. 6) были построены из моделей 3D-Studio, которые импортировались в bCAD и обрабатывались программами подготовки баз данных из моделей CAD/CAE/CAM систем. Рельеф местности (рис. 5) создан из реальных данных карты высот.

1. *Akenine-Moller T.* Real-Time Rendering. — 3-nd ed. / Т. Akenine-Moller, E. Haines, N. Hoffman. — A K Peters, 2008.
2. *Ernst I.* Hardware Supported Bump Mapping: A Step towards Higher Quality Real-Time Rendering / I. Ernst, D. Jackel, H. Russeler, O. Wittig // Proceedings of 10th Eurographics Workshop on Graphics Hardware — 1995. — P. 63–70.
3. *Welsh T.* Parallax Mapping with Offset Limiting: A PerPixel Approximation of Uneven Surfaces / T. Welsh // Infiscape Corp. Tech Report. — 2004.
4. *Oliveira M. M.* Relief Texture Mapping / M.M. Oliveira, G. Bishop, D. McAllister // Proceedings of SIGGRAPH 2000. — 2000. — P. 324–331.
5. *Policarpo F.* Real-Time Relief Mapping on Arbitrary Polygonal Surfaces / F. Policarpo, M. M. Oliveira, J. Comba // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005. — 2005. — P. 155–162.
6. *Вяткин С.И.* Моделирование и визуализация сложных поверхностей на основе скалярных функций возмущения / С.И. Вяткин // Сборник трудов ДонНТУ серии «Информатика, кибернетика и вычислительная техника». — 2009. — Выпуск 10(153). — С. 105–110.

Поступила в редакцию 11.12.2009