

УДК 629.375

В.М. ГУСЯТИН, Р.В. СОРОКИН

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

НЕРАВНОМЕРНОЕ РАЗБИЕНИЕ ТРИАНГУЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ТРАССИРОВАНИЯ

Предложен метод неравномерного разбиения триангулированной поверхности, позволяющий получить изображение визуально гладкой поверхности при синтезе методом обратного трассирования. В качестве критерия неравномерности используется угловой размер треугольника, а также условие пересечения проекционного луча и ограничивающей оболочки участка предельно триангулированной поверхности, которая может быть получена разбиением данного треугольника. Выполнение разбиения продолжается только для тех треугольников, которые удовлетворяют заданному критерию. Введено понятие локальной области разбиения, формирование которой необходимо для эффективного продолжения разбиения на каждой последующей итерации. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: метод обратного трассирования, полигональная сетка, интерполяция, поверхность рекурсивного разбиения, ограничивающая оболочка, угловое разрешение, визуально гладкая поверхность.

Введение

Полигональные сетки получили широкое распространение как наиболее универсальная и простая форма представления поверхностей трехмерных объектов. В полигональной форме могут быть представлены кусочно-линейно аппроксимированные алгебраические, параметрические поверхности, а также поверхности, полученные с выхода трехмерных сканеров. С другой стороны, задача визуализации полигональной сетки в виде гладкой поверхности является важной задачей в геометрическом моделировании высоко реалистичной компьютерной графики.

Одним из подходов к визуализации полигональных поверхностей является построение поверхности разбиения [1, 2]. Поверхность разбиения формируется путем рекурсивного деления полигонов исходной полигональной сетки, в результате которого, в пределе, образуется гладкая поверхность, аппроксимирующая или интерполирующая исходную сетку [1, 2].

1. Постановка задачи исследования

Обратное трассирование – метод синтеза высоко реалистичных изображений [3] и является наиболее общим подходом к синтезу 3D сцен, так как позволяет визуализировать как аналитически заданные поверхности, так и полигональные. Поэтому исследование возможностей использования метода об-

ратного трассирования для синтеза изображений поверхностей разбиения является актуальной задачей.

Общим подходом в процессе синтеза изображения поверхности разбиения является выполнение полного разбиения, т.е. разбиения всех полигонов всей исходной полигональной сетки до требуемого уровня детализации. После чего выполняется поиск пересекаемого проекционным лучом треугольника и точки пересечения с ним [6, 7].

Однако такой подход, во-первых, требует больших объемов памяти для хранения полигонов, а во-вторых, время, необходимое на поиск точки пересечения проекционного луча и полигона в общем случае увеличивается пропорционально количеству полигонов в сетке. Применение дополнительных классификационных структур требует дополнительной предобработки, что не всегда приемлемо [7]. При таком подходе всегда возможно приблизится к модели так близко, что полученной в результате предварительного разбиения детализации окажется недостаточно. В этом случае нарушится восприятие синтезированной поверхности, как визуально гладкой.

Неравномерное разбиение полигонов полигональной сетки, которые удовлетворяют некоторому критерию, позволит в сравнении с полным разбиением уменьшить общее количество обрабатываемых полигонов, соответственно, время визуализации, а также синтезировать визуально гладкую поверхность.

2. Разбиение треугольно-полигональной сетки

Для разбиения полигональной сетки будем использовать метод рекурсивного разбиения триангулированных поверхностей (РРТП) [8], который позволяет формировать визуально гладкую поверхность в пределах заданной угловой погрешности.

Введем следующие обозначения. Под полигональной сеткой далее будем понимать треугольно-полигональную сетку (ТПС), состоящую только из треугольников (произвольную полигональную сетку всегда можно преобразовать к ТПС). Зададим ТПС множеством треугольников T :

$$T = \{t_0, \dots, t_i, \dots, t_{n-1}\}, \quad (1)$$

где $t(\alpha, \beta, \gamma) \in R^3$ – треугольник с вершинами α, β, γ ; n – количество треугольников в сетке.

В общем виде процесс разбиения ТПС запишем с помощью следующего рекуррентного соотношения:

$$T^{k+1} = F(T^k), \quad (2)$$

где T^0 – исходная ТПС; T^k, T^{k+1} – ТПС на k -й и $(k+1)$ -й итерации разбиения соответственно; $F(T^k)$ – оператор разбиения треугольно-полигональной сетки.

Оператор разбиения F определяет правил разбиения треугольников треугольно-полигональной сетки на каждой итерации.

По методу рекурсивного разбиения триангулированных поверхностей в результате разбиения каждого полигона сетки T^k формируются четыре полигона сетки T^{k+1} .

При полном разбиении, т.е. разбиении всех треугольников сетки T^k , количество треугольников $n(k)$ на k -й итерации можно вычислить по соотношению:

$$n(k) = 4^k n_0, \quad (3)$$

где n_0 – количество треугольников в исходной треугольно-полигональной сетке.

Соотношение (3) показывает, что при полном разбиении на каждой последующей итерации количество полигонов в треугольно-полигональной сетке увеличивается по экспоненциальному закону, что приводит к существенному увеличению требований к производительности и объему оперативной памяти графических вычислителей.

3. Неравномерное разбиение

В отличие от полного разбиения, представленного соотношением (2), предлагается выполнять неравномерное разбиение ТПС в процессе синтеза изображения для каждого проекционного луча. Перепишем соотношение (2) с учетом задачи неравномерного разбиения:

$$T^{k+1} = F(\Omega(T^k)), \quad (4)$$

где $\Omega(T^k)$ – множество треугольников, выделенных на k -й итерации, разбиение которых необходимо продолжить на следующей итерации.

Будем формировать множество $\Omega(T^k)$ исходя из угловой погрешности СВ – $\varepsilon_{СВ}$. Такой подход позволит на последней итерации разбиения получить ТПС, угловой размер полигонов в которой меньше или равен угловой погрешности СВ. В результате этого, не смотря на полигональную структуру разбиваемой поверхности, на экране устройства отображения СВ получим визуально гладкую поверхность (ВГП).

Введем определение. Ограничивающей оболочкой $B(t_i^k)$ треугольника t_i^k будем называть область трехмерного пространства такую, что ВГП, формируемая при разбиении треугольника t_i^k , будет лежать внутри этой области.

Среди треугольников, угловые размеры которых превышают угловое разрешение СВ, будем продолжать разбиение только тех треугольников, ограничивающие оболочки которых пересекаются проекционным лучом.

Исходя из вышесказанного, в качестве критерия разбиения треугольника t_i^k будем использовать следующее предикатное описание:

$$P(t_i^k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \varepsilon(t_i^k) > \varepsilon_{СВ} \text{ и } I(B(t_i^k)) \neq \emptyset, \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (5)$$

где $\varepsilon(t_i^k)$ – угловой размер треугольника t_i^k ;

$I(B(t_i^k))$ – множество точек пересечения проекционных лучей с ограничивающей оболочкой $B(t_i^k)$.

Рассмотрим процесс неравномерного разбиения на примере разбиения треугольника t_0^0 в сетке $T^0 = \{t_0^0, t_1^0, t_2^0, t_3^0\}$, изображенной на рис. 1, а.

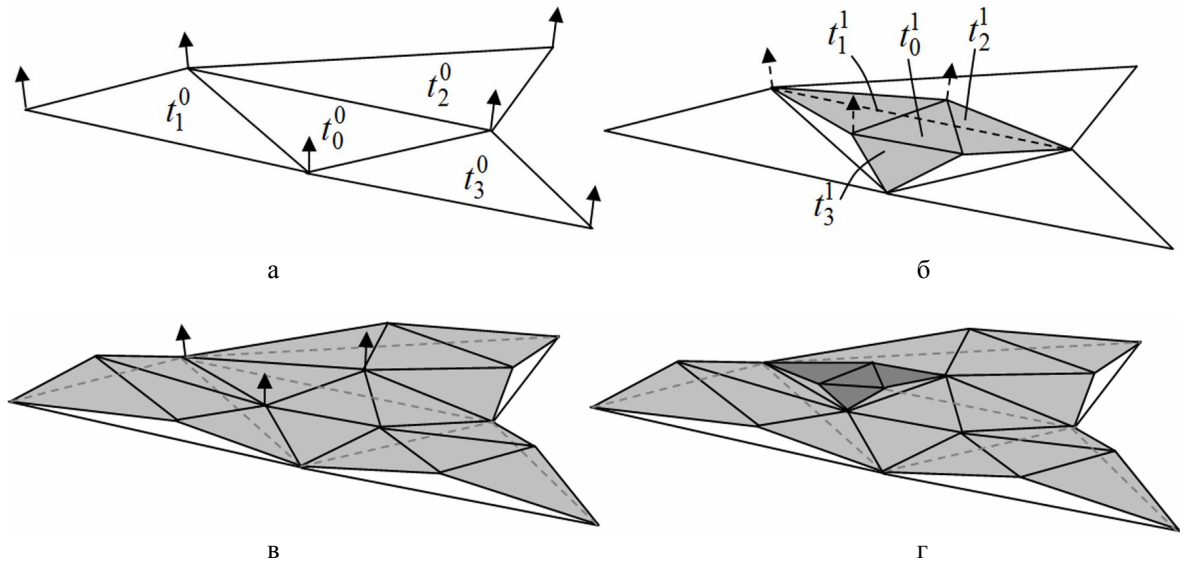


Рис. 1. Неравномерное разбиение: а – фрагмент исходной сетки, б – сетка, полученная после разбиения треугольника t_0^0 , в – разбиение локальной области треугольника t_0^0 , г – сетка, полученная после разбиения треугольника t_1^1 .

Нормали в вершинах исходной сетки T^0 рассчитаны по методу Гуро. Предположим, что, выполнив разбиение треугольника t_0^0 , получим в пределах этого треугольника сетку

$$T_0^1 = \{t_0^1, t_1^1, t_2^1, t_3^1\} \subset T^1$$

такую, что верны равенства:

$$P(t_1^1) = 1, P(t_i^0) = 0, i = 0, 2, 3. \quad (6)$$

Равенства (6) означают, что для треугольника t_1^1 сетки T^1 необходимо дальнейшее разбиение. Разбиение треугольника t_1^1 начинается с расчета нормалей в его вершинах по Гуро. Однако, в сетке T_0^1 , полученной в результате частичного разбиения сетки T^0 , нет всех треугольников, необходимых для расчета нормалей в вершинах t_1^1 (рис. 1, б).

Поэтому, для обеспечения возможности дальнейшего разбиения каждого из треугольников $t_0^1, t_1^1, t_2^1, t_3^1$ в сетке T^1 требуется разбиение треугольников t_0^0, t_2^0, t_3^0 в сетке T^0 на предшествующей итерации (рис 1в, г).

Выделим подмножество треугольников $\hat{T}^k \subset T^k$ такое, что все треугольники в нем удовлетворяют условию (5):

$$\hat{T}^k = \{t_i^k \in T^k \mid P(t_i^k) \equiv 1\}. \quad (7)$$

Обозначим $\hat{D}_i^k \subseteq T^k$ множество, состоящее из

треугольников, требуемых для вычисления нормалей в вершинах треугольника $t_i^k \in \hat{T}^k$. Множество \hat{D}_i^k будем называть *локальной областью разбиения* треугольника t_i^k .

При разбиении треугольника t_i^k будем выполнять разбиение всех треугольников, принадлежащих его локальной области разбиения \hat{D}_i^k . Такой подход вносит некоторую избыточность при разбиении каждого треугольника, т.к. необходимо разбивать окружающие его треугольники, однако позволяет на последующих итерациях разбиения иметь необходимые данные для выполнения дальнейшего разбиения.

С учетом локальной области разбиения каждого треугольника в \hat{T}^k искомое множество $\Omega(T^k)$ запишем следующим образом:

$$\Omega(T^k) = \bigcup_{i \in I} (\hat{D}_i^k \cup t_i^k), \quad (8)$$

где $I = \{i \in N \mid \exists t_i^k \in \hat{T}^k\}$.

Результаты работы метода приведены на рис 2, на котором различными оттенками серого обозначены области различных уровней разбиения исходной сетки. Анализ синтезированного изображения показывает, что для участков исходной сетки, изначально состоящих из более мелких полигонов, было выполнено меньшее количество итераций разбиения, чем других участков исходной сетки.

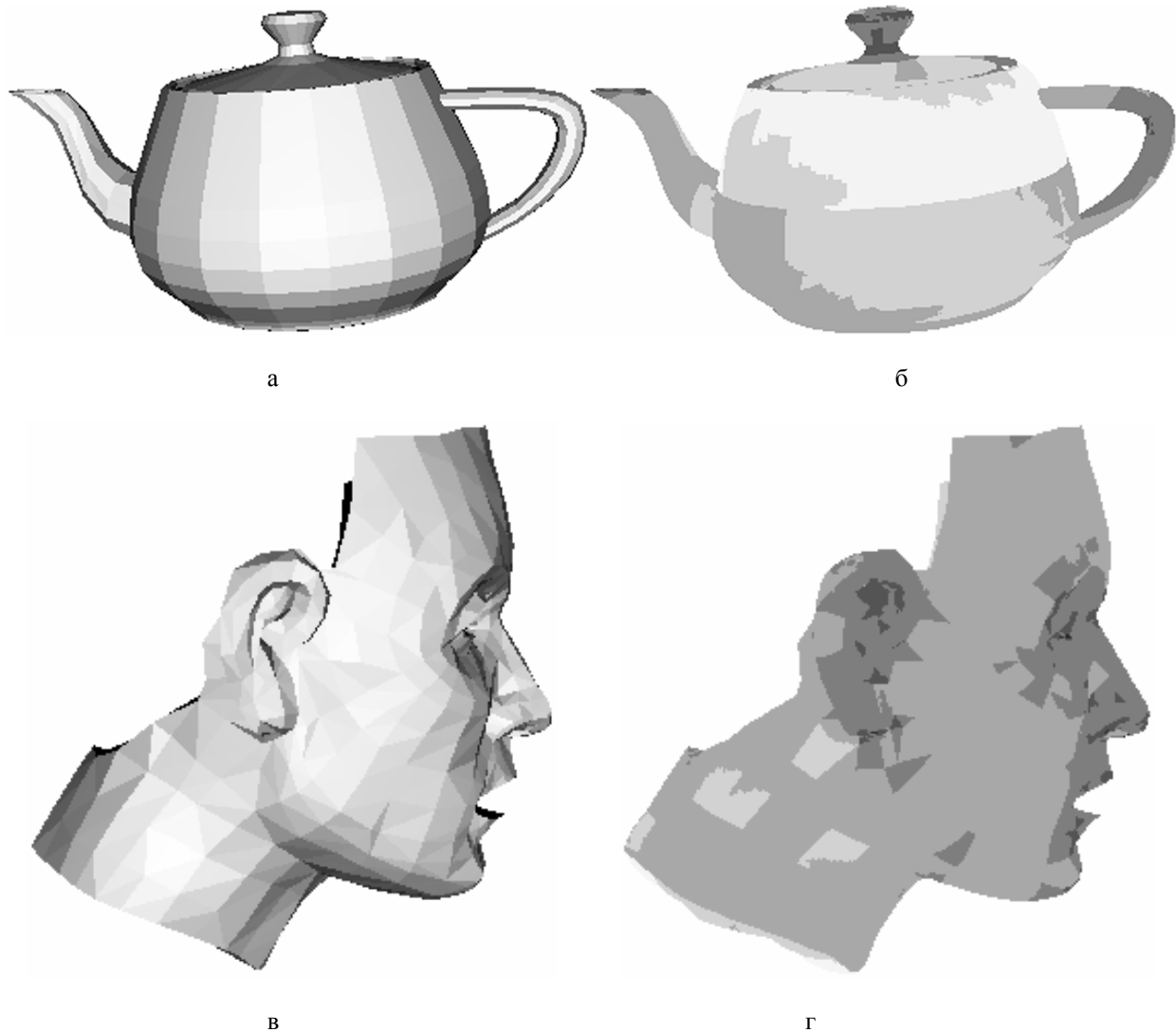


Рис. 2. Результаты моделирования.

Областями с более темными оттенками обозначены полигоны разбитой сетки, полученные в результате меньшего количества итераций разбиения, чем обозначенные более светлыми; а, в – исходные сетки; б, г – результат разбиения

Выводы

Предложен метод неравномерного разбиения ТПС, ориентированный на синтез изображения методом обратного трассирования. Предложенный метод разбиения, позволяет выполнять разбиение ТПС с учетом текущего ракурса наблюдателя и с учетом угловой погрешности СВ.

Использование углового размера полигонов в качестве одного из критериев разбиения позволяет визуализировать изображение визуально гладкой поверхности.

Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность предложенного метода. Дальнейшее исследование может быть посвящено выбору вида ограничивающей оболочки, позволяющей достаточно просто определять пересечение с

проекционным лучом; разработке и исследованию алгоритма поиска точки пересечения с разбиваемой ТПС а также решению задачи устранения «просветов» между треугольниками, полученными на разных итерациях разбиения.

Литература

1. DeRose T. D. *Subdivision surfaces in character animation* / T. D. DeRose, M. Kass, T. Truong // *Computer Graphics SIGGRAPH 98: Annual Conference, July 1998: proceedings.* – 1998. – P. 85-94.
2. Peters J. *Subdivision surfaces, Geometry and Computing* / J. Peters, U. Reif // *Springer Lecture Notes in Computer Science.* – 2008. – Vol. 3. – P.67-88.
3. Hurley J. *Ray Tracing Goes Mainstream* / J. Hurley // *Intel Technology Journal.* – 2005. – Vol. 09, is. 02. – P. 99-107.

4. *Packet-based Ray Tracing of Catmull-Clark Subdivision Surfaces [Technical Report UUSCI-2007-011] / C. Benthin, S. Boulos, D. Lacewell, I. Wald. – SCI Institute, University of Utah. – 2007. – 10 p.*

5. *Kobbelt L. Ray Tracing of Subdivision Surfaces / L. Kobbelt, K. Daubert, H.-P. Seidel // Rendering: 9th Eurographics Workshop, 1998: proc. – 1998. – P. 69-80.*

6. *Pulli K. Fast Rendering of Subdivision Surfaces / K. Pulli, M. E. Segal // Rendering Techniques. – 1996. – P.61-70.*

7. *Benthin C. Interactive Ray Tracing of Free-Form Surfaces / C. Benthin, I. Wald, P. Slusallek // Afrigraph, 2004: proceedings. – 2004. – P. 99-106.*

8. *Гусятин В.М. Рекурсивное разбиение триангулированных поверхностей в задачах синтеза изображений для систем визуализации / В.М. Гусятин., А.Е. Громенко, Р.В. Сорокин // Авиа-2006: VII междунар. науч.-техн. конференции, 2006: сборник трудов. – 2006. – С. 36-39.*

Поступила в редакцию 1.09.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ЕВМ О.Г. Руденко, Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

НЕРІВНОМІРНА РОЗБИВКА ТРЕАНГУЛЬОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗУ ЗОБРАЖЕНЬ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ТРАСУВАННЯ

В.М. Гусятин, Р.В. Сорокин

Запропоновано метод нерівномірної розбивки треангульованої поверхні, який дозволяє отримати зображення візуально гладкої поверхні при синтезі методом зворотного трасування. В якості критеріїв нерівномірності використовуються кутовий розмір трикутника, а також умова перетину проєкційного променя та обмежуючої оболонки ділянки візуально гладкої поверхні, яка може бути отримана розбиттям даного трикутника до його граничних розмірів. Розбивка продовжується тільки для тих трикутників, які задовольняють даним критеріям. Введено поняття локальної області розбивки, формування якої необхідно для ефективного продовження розбивки на кожній наступній ітерації. Приведено результати моделювання, які демонструють ефективність запропонованого методу.

Ключові слова: метод зворотного трасування, полігональна сітка, інтерполяція, поверхня рекурсивної розбивки, обмежуюча оболонка, кутова розподільча здатність, візуально гладка поверхня.

NON-UNIFORM SUBDIVISION OF TRIANGULATED SURFACES FOR IMAGE SYNTHESIS WITH RAY TRACING

V.M. Gusyatin, R.V. Sorokin

The method of non-uniform subdivision of triangular surface, that allows getting image of visually smooth surface using ray tracing, is proposed. Criteria of non-uniform subdivision are the triangle angular dimensions and the condition of intersection of ray and bounding volume of visually smooth surface patch that is obtained by subdivision of the triangle to its limit size. The subdivision is applied only for triangles that satisfy given criteria. The concept of local subdivision area, that is essential to effective continuation of subdivision on following iterations, is introduced. The modeling results demonstrating the effectiveness of the proposed method are given.

Key words: ray tracing, polygonal mesh, interpolation, recursive subdivision surface, bounding volume, angular resolution, visually smooth surface.

Гусятин Владимир Михайлович – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри електронних вичислительных машин Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина, e-mail: vmgus@rambler.ru.

Сорокин Руслан Вадимович – аспирант кафедри електронних вичислительных машин Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина, e-mail: ruslan.sorokin@gmail.com.