

УДК 681.323

В.М. ГУСЯТИН, А.Е. ГРОМЕНКО

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина***ПОДХОД К НАЛОЖЕНИЮ ТЕКСТУРЫ НА ПРЕДЕЛЬНО ТРИАНГУЛИРОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ В СИСТЕМАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

В статье предложен подход к наложению текстуры, который учитывает особенности предельно триангулированной поверхности. Достоинства подхода: наложение текстуры выполняется на препроцессорном этапе, отсутствуют непоследовательные обращения в оперативную память в реальном времени, небольшая вычислительная сложность фильтрации текстуры на этапе реального времени. Подход имеет высокую производительность и качество наложения текстуры. Производительность подхода позволяет применять субдискретизацию высокой степени для улучшения качества синтезируемого изображения. В статье выполнена оценка качества наложения и фильтрации текстуры по сравнению с технологиями трилинейной и анизотропной фильтрации.

система визуализации, наложение текстуры, триангулированная поверхность, фильтрация текстуры, субдискретизация экрана, предельно триангулированная поверхность

Актуальность и постановка задачи

В настоящее время одним из основных требований к системам визуализации (СВ) тренажеров летательных аппаратов является фотореалистичность синтезируемого изображения. Для этого при построении СВ необходимо обеспечить не только синтез геометрии 3D-сцены с требуемой угловой точностью и наложение текстуры на 3D-объекты, но и устранить возникающие артефакты (aliasing), например, ступенчатость и др. с помощью фильтрации в реальном времени. Таким образом, при проектировании СВ разработка методов наложения и фильтрации текстуры, работающих в реальном времени, является актуальной задачей.

В статье [1] введено понятие предельно триангулированной поверхности (ПТП) и предложен метод синтеза ее изображения, который основан на методе обратного трассирования лучей. Метод реализуется в виде параллельно конвейерной архитектуры с непрерывным потоком входных данных и оптимизирован для выполнения субдискретизации экрана (supersampling) [2]. Для наложения текстуры на ПТП можно использовать любой из способов [2 – 5]. Приведенные в качестве примера способы используют

схожие подходы к наложению текстуры: в реальном времени согласно некоторому алгоритму выполняется преобразование координат точки пересечения в двумерные координаты текстуры; по полученным координатам текстуры вычисляется адрес памяти, по которому хранится цвет; выбранный из памяти цвет присваивается точке пересечения. При фильтрации текстуры необходимо выполнять дополнительные вычисления и обращения в память. Например, для билинейной (bilinear) фильтрации [6] при вычислении интегрального цвета пикселя экрана для каждой точки пересечения из памяти дополнительно выбираются четыре текселя текстуры. Анизотропная (anisotropic) фильтрация [6] предполагает расчет проекции пикселя на плоскость текстуры согласно некоторому алгоритму. Интегральный цвет вычисляется на основании определенного количества выбранных из памяти текселей текстуры, принадлежащих проекции пикселя. Важно отметить, что при любой фильтрации текстуры основная часть обращений в память является непоследовательной. При выполнении на экране субдискретизации высокой степени, например, в 2^6 раз увеличивая количество проекционных лучей (ПЛ) на пиксель, пропорционально возрастает объем вычислений и обращений в

память за текстурой, что приводит к повышению требований по производительности архитектуры спецпроцессора и памяти. Дальнейшее увеличение степени субдискретизации приводит к недостижимой на современном уровне развития компьютерной инженерии производительности памяти.

При выполнении субдискретизации высокой степени в сочетании с MIP-текстурами (mipmap) возможно синтезировать изображения по качеству сравнимому с анизотропной фильтрацией. При этом данная технология является универсальной с точки зрения устранения ступенчатости как краев 3D-объектов, так и самой текстуры; в дополнение к этому данная технология позволяет наиболее точно восстановить форму проекции пикселя на визуализируемую поверхность произвольного вида. В то же время существующие полноценные реализации анизотропной фильтрации не рассчитаны на работу в реальном времени [4, 7]. В современных графических спецпроцессорах используются способы анизотропной фильтрации, оптимизированные по производительности, вследствие чего при определенных условиях часто появляются артефакты в синтезированном изображении [8, 9].

В дополнение к этому существующие способы наложения текстуры не оптимизированы по производительности с учетом особенностей ПТП.

Таким образом, поиск методов наложения и фильтрации текстур, которые учитывают особенности ПТП, имеют небольшие вычислительные затраты и, в целом, высокую производительность при выполнении субдискретизации экрана высокой степени является актуальным.

Целью статьи является изложение подхода к наложению текстуры на ПТП, ориентированного на возможность применения в алгоритме субдискретизации экрана, предложенного авторами в [1].

Наложение текстуры на ПТП

К особенностям ПТП с точки зрения наложения текстуры можно отнести следующее [1]:

1) треугольник может быть представлен одним цветом без потери детализации. Действительно, из центра проекций (ЦП) для любого расстояния большего D_{\min} (расстояния, ближе которого ЦП не приближается к ПТП) угловой размер треугольника меньше углового размера пикселя экрана;

2) на препроцессорном этапе известно конечное множество возможных точек пересечения ПЛ с ПТП, которое инвариантно к положению ЦП.

С учетом вышеизложенных особенностей предлагается на препроцессорном этапе выполнять наложение текстуры на ПТП. А именно, по известным координатам точки пересечения вычисляются координаты на текстуре и выбирается цвет, который принимается за цвет треугольника (в дальнейшем считаем, что понятия «цвет точки пересечения» и «цвет треугольника» эквивалентны). Таким образом, структура данных о треугольнике, необходимая для синтеза изображения ПТП [1], дополняется данными о цвете:

$$T = \{\{V_1, V_2, V_3\}, C\}, \quad (1)$$

где V_1, V_2, V_3 – координаты вершин треугольника;

C – вычисленный цвет треугольника.

Из (1) следует, что геометрическое описание поверхности связано с ее цветовыми свойствами, что позволяет работать с динамическими поверхностями, которые изменяют свою форму. Действительно, в этом случае при любом изменении ориентации треугольника в пространстве его цвет не изменяется, т.е. не вносятся артефакты из-за некорректного учета геометрии поверхности методами наложения текстуры. Отмеченный недостаток существующих методов наложения вызван их адаптацией для выполнения в реальном времени. В дальнейшем ПТП, для которой геометрическое описание связано с цветовыми свойствами поверхности, будет называться *текстурированной ПТП*.

Для наложения текстуры на препроцессорном этапе могут применяться любые из ранее разработанных алгоритмов: сферический, цилиндрический,

прямой и т.д. [2]. Также при работе с ПТП возможно использовать интерактивный режим наложения [10], при котором оператор может вручную корректировать цвет отдельно взятого треугольника, а также задавать для различных областей ПТП специфические способы и параметры наложения текстуры. На препроцессорном этапе практически нет ограничений по времени выполнения, поэтому при наложении текстуры на предельно триангулированную поверхность возможно использовать вычислительно сложные методы и текстуры максимального разрешения.

Фильтрация текстуры

Фильтрация наложенных на предельно триангулированную поверхность текстур разделена на этапы: препроцессорный и реального времени.

На препроцессорном этапе вычисляется интегральный цвет области угловой погрешности каждой из возможных точек пересечения P для множества расстояний $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ (рис. 1), каждый элемент которого больше D_{min} . Область угловой погрешности точки P (рис. 1) задается на поверхности областью, отсекаемой конусом с вершиной в центре проекций h_i , находящейся от точки P на расстоянии d_i , направление оси симметрии которого совпадает с нормалью к поверхности в точке P , а угол при вершине равен допустимой угловой погрешности $\gamma_{дон}$ СВ [11].

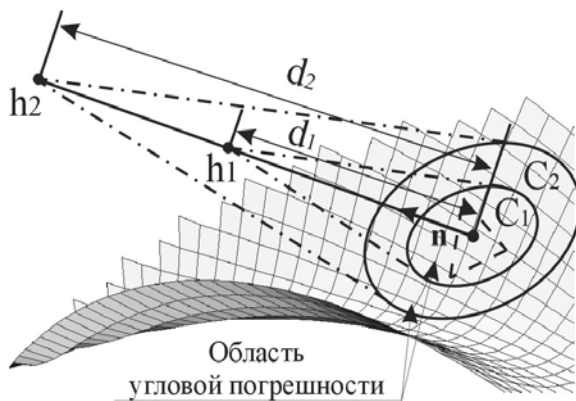


Рис. 1. Область угловой погрешности

На рис. 1 введены следующие обозначения: h_1 и h_2 – положения ЦП; d_1 и d_2 – расстояния от точки P до ЦП, принадлежащие множеству D ; n – нормаль к поверхности в точке P ; пунктирными линиями показан треугольник ПТП; штрих пунктирными линиями показаны конусы, определяющие области угловой погрешности C_1 и C_2 на поверхности.

Для расчета интегрального цвета области угловой погрешности предполагается использовать любой из известных алгоритмов расчета интегрального цвета проекции пикселя на поверхность [2].

С учетом вышесказанного, структура данных (1) дополняется интегральными цветами C_i области угловой ошибки на расстояниях $d_i \in D$:

$$T = \{V_1, V_2, V_3, \{d_1, C_1\}, \dots, \{d_N, C_N\}\}. \quad (2)$$

На этапе реального времени для произвольного расстояния d , большего D_{min} , определяются ближайшие к d расстояния d_i и d_{i+1} , принадлежащие множеству D :

$$d_i < d < d_{i+1}, \text{ где } 1 \leq i < N_D - 1, \quad (3)$$

где N_D – количество элементов множества расстояний D .

Цвет C_d точки пересечения вычисляется путем линейной интерполяции компонентов (RGB) интегральных цветов C_i и C_{i+1} треугольника для расстояний d_i и d_{i+1} , соответственно:

$$C_d = C_i + (C_{i+1} - C_i) \cdot \frac{d - d_i}{d_{i+1} - d_i}. \quad (4)$$

Важно отметить, что при расчете цвета C_d согласно (4) следует обратиться к памяти только один раз, что существенно повышает производительность предложенного метода в реальном времени.

Для уменьшения количества элементов N_D^j множества D^j для j -го треугольника ПТП выполняется кусочно-линейная аппроксимация функции изменения его цвета в зависимости от расстояния (рис. 2). Вдоль оси абсцисс отложен коэффициент K_d такой, что расстояние $d = K_d * D_{min}$; вдоль оси ординат – оттенки от 0 до 255 одного из компонентов

интегрального цвета C . Критерием для оптимизации количества элементов множества D^j может служить как занимаемый текстурованной ПТП объем памяти (рис. 2, а), так и величина отклонения интерполированного цвета от расчетного (рис. 2, б). На рис. 2, а и 2, б сплошной линией показана исходная функция изменения цвета треугольника, пунктирной линией – после оптимизации.

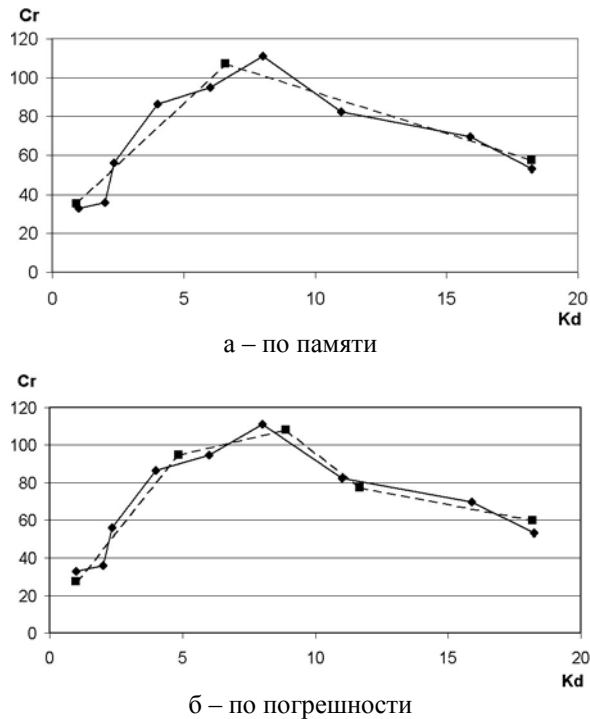


Рис. 2. Оптимизация множества D

Важно отметить, что после оптимизации для каждого треугольника ПТП количество элементов множества D различно и зависит от вида накладываемой текстуры, например, для треугольников, соответствующих одноцветным областям текстуры, $N_D^j = 1$.

Оценка качества наложения и фильтрации текстур

Предложенный метод сравнивается по качеству с классическим подходом (MIP-текстуры с трilinearной фильтрацией), за эталон принято изображение, синтезированное с использованием анизотропной фильтрации. Для всех методов выполнялась субдискретизация экрана (16 ПЛ на пиксель экрана). В

качестве оценки качества наложения и фильтрации текстуры примем погрешность цвета пикселя экрана в сравнении с эталонным изображением и характер изменения цвета на границе перехода цветов.

На рис. 3 показаны границы перехода цветов для идеального фильтра (сплошная линия), для анизотропной фильтрации при разных степенях субдискретизации (пунктирная линия – 64 ПЛ на пиксель; точечная линия – 16 ПЛ на пиксель) и для классического подхода (штрих пунктирная линия – 16 ПЛ на пиксель). Вдоль оси абсцисс лежат номера пикселей, вдоль оси ординат – оттенок одного из компонентов RGB цвета (R).

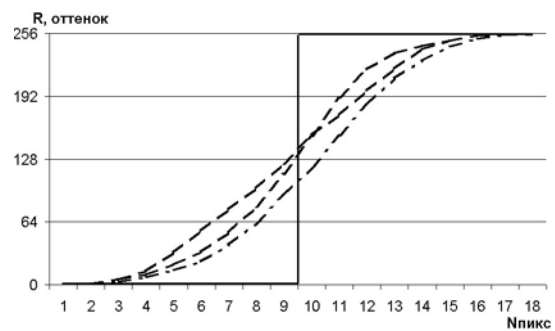


Рис. 3. Характер изменения цвета на границе

Из анализа рис. 3 следует:

- при анизотропной фильтрации характер изменения цвета на границе повторяет идеальный фильтр и приближается к нему при увеличении степени субдискретизации, что подтверждает правильность выбора данной технологии фильтрации в качестве эталона;
- при классическом подходе кривая изменения оттенка не является симметричной относительно идеального фильтра.

Сцена, созданная для эксперимента, состоит из одного объекта, являющегося плоскостью, у которой одна половина окрашена в черный цвет, а вторая – в белый цвет. На рис. 4 приведены результаты сравнения для разных положений объекта в сцене, в углу графиков показано положение плоскости относительно экрана и линия, вдоль которой нумеруются

пиксели ($N_{\text{пикс}}$) и выполняется выборка значений одного из компонентов RGB цвета (R).

Расстояние d от ЦП до плоскости выбирается следующим образом:

- для рис. 4, а, 4, г, 4, ж:

$$d \approx d_i + 0,1 \cdot (d_{i+1} - d_i);$$

- для рис. 4, б, 4, д, 4, з:

$$d \approx d_j + 0,5 \cdot (d_{j+1} - d_j);$$

- для рис. 4, в, 4, е, 4, и:

$$d \approx d_k + 0,9 \cdot (d_{k+1} - d_k).$$

Таким образом, проверяется точность расчета согласно (4) цвета C_d для различных расстояний из множества D и на различных участках интервала интерполяции $[d_i, d_{i+1}]$.

На рис. 4, а – в сравнивается отклонение от эталона и характер изменения цвета при небольшом

угле наклона (6°) границы перехода цветов относительно столбцов пикселей; на рис. 4, г – е – при угле наклона 23° ; на рис. 3, ж – и – при угле наклона 45° . Таким образом, оценивается качество фильтрации на всем возможном интервале изменения угла. Дальнейшее увеличение угла наклона можно свести к рассмотренным случаям, если считать угол наклона границы перехода цветов относительно строк пикселей.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 4, позволяет сделать выводы:

- приведенная относительная погрешность отклонения цвета не превышает 10% относительно эталонного метода;
- предложенный метод по качеству синтезированного изображения не уступает классическому подходу.

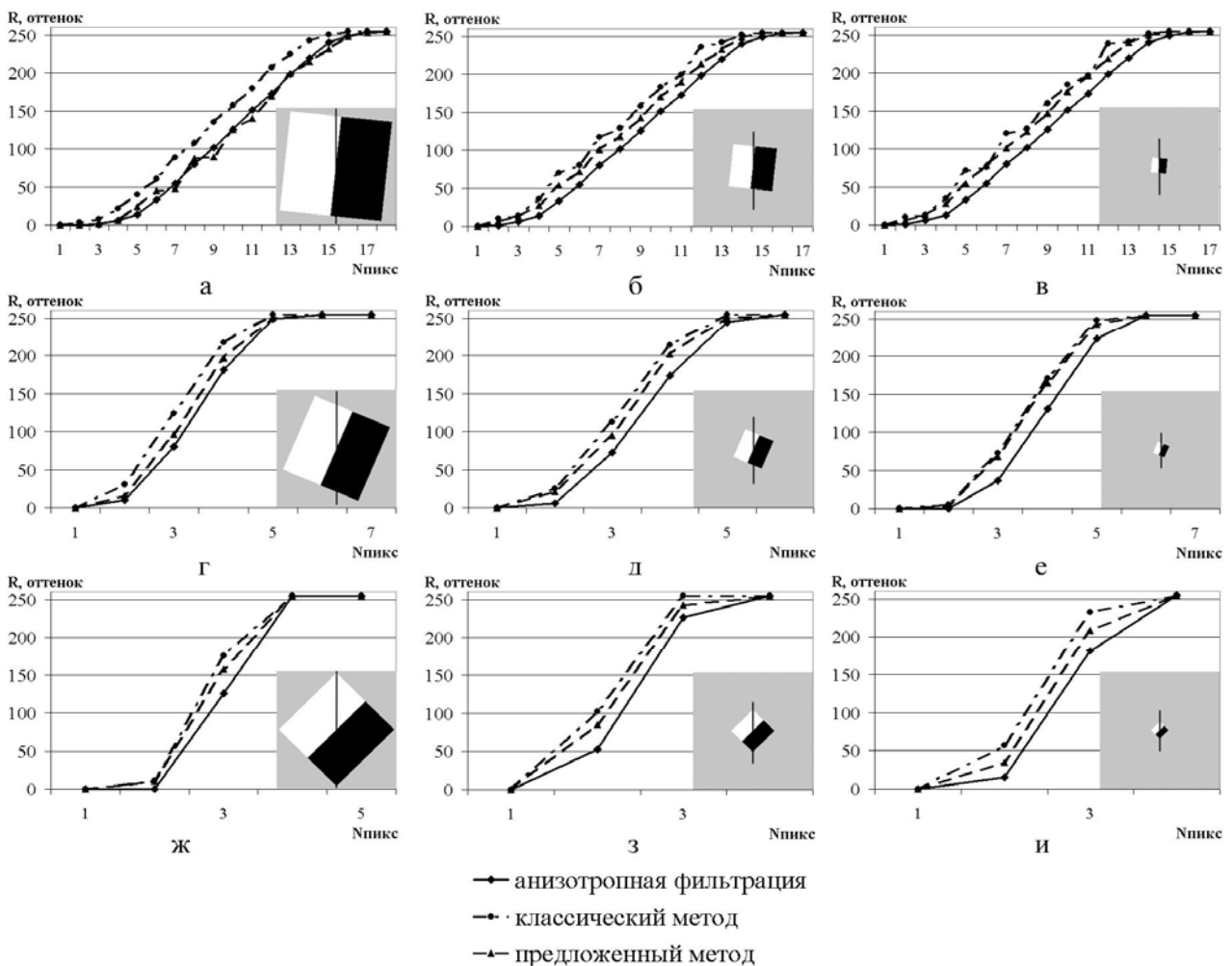


Рис. 4. Результаты эксперимента

Выводы

Предложенный метод наложения и фильтрации текстуры обладает следующими особенностями:

– поскольку метод предполагает наложение текстуры на препроцессорном этапе, то это позволяет использовать точные способы наложения текстуры на поверхности любой сложности;

– небольшая вычислительная сложность этапа реального времени и отсутствие непоследовательных обращений в оперативную память за текстурой позволяет достичь высокой производительности;

– метод оптимизирован для выполнения субдискретизации экрана;

– метод позволяет работать с поверхностями, которые динамически изменяют свою форму;

– для предложенного метода приведенная относительная погрешность при расчете цвета пикселя меньше, чем для классического.

В дальнейшем предполагается выполнить исследование производительности предложенного метода и определить возможность реализации синтеза изображений текстурированных предельно триангулированных поверхностей на современных графических процессорах.

Литература

1. Гусятин В.М., Громенко А.Е. Подход к визуализации триангулированных поверхностей методом обратного трассирования лучей // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Х.: НТУ "ХПІ", 2006. – № 40. – С. 30-43.

2. Computer graphics: principles and practice / J. D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner, J.F. Huges. – Addison-Wesley publishing company. – 1996, 2-nd ed. – 1174 p.

3. Qu L., Yuan X., Nguyen M.X., Meyer G.W. Perceptually Guided Texture Mapping on Points // In Proceeding of the 3rd Eurographics Symposium on Point-Based Graphics. – 2006. – P. 95-102.

4. Heckbert P. Fundamentals of Texture Mapping and Image Warping. Master's thesis, University of California at Berkeley, Department of Electrical Engineering and Computer Science. – June 17, 1989. – 88 p.

5. Wei L.Y., Levoy M., Texture synthesis over arbitrary manifold surfaces // In: SIGGRAPH: Proc. 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 2001. – P. 355-360.

6. Birn J. Digital Lighting and Rendering. Second Edition. – New Riders Publishing. 2000. – 432 p.

7. Geusebroek J.M., Smeulders A.W., Weijer J. Fast Anisotropic Gauss Filtering // IEEE transactions on image processing, Vol. 12. – 2003. – No 8. – P. 938-943.

8. Lumenex Engine: The New Standard in GPU Image Quality. Technical Bref. TB-02824-001_v01 November 8, 2006.

9. Olano M., Mukherjee S., Dorbie A. Vertex-based anisotropic texturing // In Proc. of Eurographics/ SIGGRAPH Graphics Hardware Workshop. – 2001. – P. 95-98.

10. Boubekeur T., Schlick C. Interactive Out-Of-Core Texturing Using Point-Sampled Textures // Proceedings of IEEE/Eurographics Point-Based Graphics. – 2006. – August – P. 134-141.

11. Гусятин В.М. Оценка точности геометрических преобразований в спецпроцессоре растровой графики // Радиоэлектроника и информатика. – 1998. – № 2. – С. 118-120.

Поступила в редакцию 30.01.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Руденко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.