

Вяткин С. И.,
*кандидат технических наук, старший научный сотрудник
института автоматизации и электротехники СО РАН*

Романюк А. Н.,
*доктор технических наук, профессор,
первый проректор Винницкого национального технического университета*

Дудник А.А.
аспирант Винницкого национального технического университета

МЕТОДЫ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕКСТУРЫ

Применяемые в трехмерной графике методы наложения текстур, используются для визуализации трехмерных сцен с высокой степенью детализации. Генерация текстуры заключается в проецировании изображения на трехмерную поверхность, таким образом, обеспечивается дополнительная детализация объекта без усложнения его геометрии. При этом появляется множество разнообразных ошибок визуализации, называемых артефактами. Было разработано множество различных методов, которые уменьшают количество подобных артефактов визуализации. Для имитации реалистичных сцен необходимо использовать большое количество детализированных текстур. Однако это зависит от объема оперативной и графической памяти компьютера, в зависимости от того, где хранятся текстуры, а также от пропускной способности системы.

Отображение текстуры [1] на поверхность является эффективным методом повышения реализма в системах машинной графики. Применение текстур позволяет, в первую очередь, моделировать цветовой рисунок на поверхностях, а также прозрачность, резкие границы, движущиеся объекты и многие другие спецэффекты [2]. При отображении текстуры приходится решать две проблемы: геометрическое отображение массива текстуры на поверхность и фильтрация изображения, которая устраняет на изображении ступенчатые линии, муа-

ры и т.д. После вычисления отображения и привязки текстуры, изображение должно быть перенесено на экран, этот процесс называется фильтрацией. Простейшая процедура фильтрации – точечная выборка, в которой выбирается пиксел, ближайший к выбранной точке. Она работает удовлетворительно в случае немасштабированных изображений, но для изображений с перспективой пиксели выглядят как большие области, а для сжатых изображений возникает эффект элиазинга. Элиазинг возникает, когда сигнал имеет невоспроизводимые на экране высокочастотные компоненты. Особенно заметно он проявляется в случае высококонтрастных высокочастотных текстур. Решить данную проблему можно двумя методами: точечной выборкой с высоким разрешением, либо предфильтрацией до выборки. Второй метод более предпочтителен, поскольку он позволяет бороться с причинами, вызывающими алиазинг, а не с его внешними проявлениями. Для устранения алиазинга сигналы должны быть ограничены, т.е. не должны содержать частот выше предела Найквиста. Существуют пространственно независимая и пространственно зависимая фильтрации. При аффинной привязке изображения, фильтр пространственно независим, его форма остается постоянной при перемещении по изображению. Нелинейные отображения требуют пространственно зависимых фильтров, форма которых меняется, при перемещении по изображению. Пространственно зависимые фильтры более сложные, чем пространственно независимые. В общем случае квадратный экранный пиксель, наложенный на искривленную поверхность, имеет криволинейный четырехугольный прообраз в текстурном пространстве. Обычно криволинейный прообраз аппроксимируется четырехугольником или параллелограммом. Если рассматривать пиксели в виде окружности, то их прообразами будут эллипсы. Этот способ проще, поскольку эллипсы имеют 5 степеней свободы, в то время как у четырехугольника их – 8. Теоретически идеальный фильтр описывается формулой

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

но его бесконечная ширина делает его непригодным для практических вычислений, поэтому на практике используются фильтры с конечным импульсным откликом (ящик, треугольный, кубический В-сплайн, Гаусс и т.д.). Путем видоизменения процесса фильтрации получают некоторые специальные эффекты. Например, можно получить текстурный рисунок с постоянной шириной контура. Приложений с использованием текстур множество, - это и раскраска поверхности, зеркальные отражения, отражающая способность, диффузное отражение, прозрачность, тени и т.д.

Методы прямой свёртки

Фильтрация производится с помощью непосредственного вычисления средневзвешенного значения по текстурной выборке [3]. В работе [4] применен треугольный фильтр, формирующий перекрывающиеся четырехугольные пирамиды. Для каждого пиксела, пирамида преобразуется так, чтобы она соответствовала аппроксимирующему параллелограмму в текстурном пространстве. В другом методе [5] в каждом экранном пикселе находится центр фильтрующей функции (поскольку она задана таблицей, можно использовать ящик, цилиндр, конус или Гауссиан), и ограничивающий прямоугольник. Далее этот прямоугольник отображается в текстурное пространство и все пикселы попавшие в него отображаются на экран. Подобный алгоритм описан в работе [6], однако в этом алгоритме равномерная выборка производится не в текстурном, а в экранном пространстве. Эллиптический средневзвешенный фильтр предложен в работе [7], в данном методе фильтрующая функция задается в виде таблицы просмотра. Вместо отображения текселя на экран этот фильтр отображается в текстурное пространство.

Предфильтрация текстуры

Даже с учетом оптимизации методы прямой свёртки недостаточно производительны, поскольку образы пикселов могут быть сколь угодно большими областями вблизи контуров и у горизонта текстурной плоскости. Для ускорения расчетов можно использовать предфильтрацию текстуры, так чтобы при гене-

рации каждого экранного пикселя необходимо было просматривать лишь несколько текселов, а не тысяч, как это происходит при процедуре усреднения метода прямой свёртки. Для предфильтрации используются два типа данных: пирамиды и суммирующие массивы. Так в работе [8], используется трилинейная схема интерполяции. Процесс отображения текстурных карт на плоские грани включает два этапа. Первый – перспективное преобразование, т. е. вычисление координат текстурной карты (u,v) , соответствующих координатам (X_s, Y_s) пикселя на экране. Плоскость параметризуется, если задать на ней единичные текстурные вектора U и V и точку привязки. Задача состоит в том, чтобы, зная координаты экрана (X_s, Y_s) , получить текстурные координаты U и V соответствующей точки плоскости в системе координат наблюдателя. Вторым этапом отображения текстуры – фильтрация, необходимая для предотвращения элиазинга. Наиболее часто применяются так называемые MIP-мар (пирамидальные) текстурные карты. Путем предварительной фильтрации получают набор квадратных текстурных карт с разным разрешением для каждого объекта. Каждой текстурной карте ставят в соответствие целочисленное значение так называемого уровня детальности (LOD-level of detail, англ.).

В зависимости от расстояния до грани и ее ориентации выбираются для работы две текстурные карты с соседними уровнями детальности. Критерием выбора является линейный размер проекции пикселя на грань. Если проекция пикселя покрывает менее двух текселов (texel-элемент текстурной карты), наблюдается элиазинг. У граней, с углами наклона (между плоскостями грани и экрана), близкими прямому, текстурный рисунок сильно размывается. Этот эффект носит название *смаза*. Затем в соответствии с текстурными координатами из каждой текстурной карты считываются по четыре тексела. Трилинейная интерполяция по этим восьми значениям завершает процесс фильтрации. Коэффициентами трилинейной интерполяции являются дробные части текстурных координат и уровня детальности. Таким образом, после вычисления отображения и привязки текстуры, изображение должно быть перенесено на экран, этот процесс называется фильтрацией.

В работе [9], как альтернатива пирамидальной фильтрации, предложено использовать метод суммирующей таблицы. Данный метод позволяет фильтровать ортогонально направленные прямоугольные области за постоянное время. Исходная текстура предварительно суммируется по U и V координатам, и результаты хранятся в высокоточной суммирующей таблице. Для фильтрации прямоугольной области с помощью таблицы производится выборка в четырех подобластях (аналогично оценке определённого интеграла на основе выборки из неопределённого интеграла). Фильтрация с повторным суммированием предложена в работах [10] и [11].

Если исходное изображение предварительно суммируется по U и V координатам n раз, фильтрация ортогонально ориентированного эллипса может быть проведена по выборке из $(n + 1)^2$ точек.

Ряды Фурье

Альтернативой пространственной фильтрации является преобразование текстуры в частотный ряд и фильтрация полученного спектра. Это наиболее удобный путь, если текстура представлена рядом Фурье (а не массивом). Так в работе [12] используется трехмерный ряд Фурье как функцию прозрачности текстуры. В работе [13] используются спектрально-ограниченные псевдослучайные функции в качестве текстурных примитивов. Этот способ обработки текстуры облегчает переход от макро- к микро-участкам поверхности. Для каждого элемента текстурного ряда эти переходы могут выполняться независимо, в соответствии с его частотной характеристикой [14].

Анизотропная фильтрация (Anisotropic Filtering)

Чтобы добиться лучшего качества, необходимо использовать все тексели, покрываемые световым пятном и усреднять их значение. Однако это сильно влияет на пропускную способность памяти – ее может не хватить, и выполнить такую выборку с усреднением нетривиальная задача. Можно использовать разнообразные фильтры для аппроксимации формы светового пятна в виде эллип-

са для нескольких возможных углов положения полигона относительно точки зрения. Существуют техники фильтрации, которые используют от 16 до 32 текстелей из текстуры для определения цвета пикселя. Правда использование подобной техники фильтрации требует существенно большей ширины полосы пропускания памяти, а это почти всегда невозможно в существующих системах визуализации без применения дорогостоящих архитектур памяти.

Эллиптический средневзвешенный фильтр допускает перекрывающиеся круглые пиксели, отображающиеся в произвольно ориентированные эллипсы на текстуре [15-17]. Фильтрующая функция задаётся в виде таблицы просмотра. Вместо отображения текстеля на экран фильтр отображается на текстурное пространство. Его форма, являющаяся в экранном пространстве центрально симметричной функцией, отображается в эллипс текстуры с помощью функции эллиптического параболоида. Этот параболоид вычисляется по шагам и используется как для проверки включения эллипса, так и для задания таблицы фильтрации. Эллиптический средневзвешенный фильтр позволяет с большой точностью обрабатывать вытянутые вертикальные или горизонтальные области с меньшими размываниями по контуру и у горизонта, а также диагонально-ориентированные области.

Литература

1. Paul S. Heckbert. Survey of Texture Mapping// IEEE Comput. Graph. and Applicat.- 1986.-6, N11, pp. 56-67.
2. Paul Haeberli and Mark Segal. Texture Mapping as a Fundamental Drawing Primitive. Fourth Eurographics Workshop on Rendering. June 1993, pp. 259-266.
3. Catmull, E. A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces. PhD thesis, University of Utah, 1974.
4. J. Blinn and M. Newel. Texture and Reflection in Computer Generated Images. Communications of the ACM 19(10) October 1976, pp. 542-546.

5. Feibush E. A., Levoy M., Cook R. L. Synthetic texturing using digital filters SIGGRAPH 80.- New York, NY, USA: ACM Press, 1980, pp. 294-301.
6. M. Gangnet , D. Pery and P. Coueignoux. Perspective Mapping of Planar Textures, Eurographics 82, 1982, pp. 57-71.
7. N. Greene and P. S. Heckbert. Creating Raster Omnimax Images from Multiple Perspective Views Using the Elliptical Weighted Average Filter, IEEE CG&A, vol. 6, pp. 21- 27, 1986.
8. L. Williams. Pyramidal Parametrics, Computer Graphics (SIGGRAPH '83 Proceedings), pp. 1-11, July, 1983.
9. F. C. Crow. Summed-Area Tables for Texture Mapping, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 84), vol. 18, pp. 207-212, 1984.
10. K. Perlin. Course Notes, SIGGRAPH 85: State of the Art in Image Synthesis Seminar Notes, pp. 287-296, 1985.
11. L. A. Ferrari. Efficient Two-Dimensional Filters Using B-Spline Approximations, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Volume 35, Issue 2, August 1986, pp. 152-169.
- 12.G. Y. Gardner. Visual Simulation of Clouds, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 85), vol. 19, pp. 297-303, 1985.
13. K. Perlin. An Image Synthesizer, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 85), vol. 19, pp. 287-296, 1985.
14. J.T. Kajiya. Anisotropic Reflection Models, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 85), vol. 19, pp. 15-21, 1985.
15. McCormack, J., Perry, R., Farkas, K. I., and Jouppe, N. P. Feline: fast elliptical lines for anisotropic texture mapping. In SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 243–250. 1999

16. Вяткин С.И., Романюк С.А., Савицкая Л. А., Стрельчук Т.А.. Метод анизотропной фильтрации текстуры с использованием графических ускорителей // Вестник Херсонского национального технического университета, Херсон, ХНТУ: - 2015. – Вып. 3(54). - С. 340-343.
17. Романюк О. Н., Дудник О. О., Вяткин С. І. Модифікація методів анізотропної фільтрації// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький - 2015.- № 3 (52).- С. 193-195.