

УДК 004.925

Генератор отрезков прямых повышенной производительности для трехмерных дисплеев

Е.А. Башков, О.А. Авксентьева, Аль-Орайкат Анас Махмуд, Д.И. Хлопов
Донецкий национальный технический университет
bashkov@pmi.dgtu.donetsk.ua

Abstract

Bashkov E. A., Avksentieva O.A., Al-Orakait Anas Makhmud, Hlopov D.I. High- performance vector generator for three-dimensional displays. In the paper modifications of basic 3D vector rasterization algorithm are proposed. These modifications essentially increase algorithm performance. Maximum errors for all introduced algorithms are confirming their correctness. Estimations of average error and generation time for proposed algorithms are given.

Введение

Поиск путей дальнейшего совершенствования интерфейса "человек - компьютер" привел к разработке трехмерных дисплеев, которые призваны заменить в ближайшем будущем плоские устройства отображения информации на объемные, более привычные человеческому зрению. Добавление еще одной пространственной координаты - "глубины" позволяет существенно повысить информативность генерируемых компьютером визуальных сообщений. Это, по-видимому, генеральное направление повышения пропускной способности канала компьютер - человек, при одновременном улучшении адекватности восприятия информации человеком. Стремительное развитие систем трехмерной визуализации уже находит свое практическое использование в системах управления движением [1], авиационных системах [2], медицине [3], телевидении и кинематографии [4].

Попытки создания иллюзии глубины в системах отображения визуальной информации начались достаточно давно (первые патенты зарегистрированы в 1903 году [5]) и к настоящему времени предложено и в той или иной степени проработано множество различных подходов к решению этой задачи. Сложилась следующая классификация трехмерных систем отображения информации (рисунок 1) [6]. В первую очередь, все технологии построения 3D дисплеев делятся на два больших класса: бинокулярная стереоскопия и автостереоскопия.

Отличительная особенность технологий первого класса заключается в том или иным образом организованном "одновременном" предъявлении наблюдателю двух плоских (двухкоординатных) изображений - стереопары, отличающихся ракурсом. Причем левым глазом

наблюдатель воспринимает только изображение с "левым" ракурсом и, соответственно, правым глазом - с "правым" ракурсом. Внутри этого класса технологии отличаются собственно способом сепарации левого и правого изображений между глазами.

Второй класс - автостереоскопия - объединяет технологии создания иллюзии некоего объемного изображения без специальных устройств сепарации. Сюда относятся параллаксные, голографические и объемные технологии.

Параллаксные технологии основаны на принципе параллаксного барьера (parallax barrier), открытого в 1903 году [5]. Такого рода подходы используют различного рода комбинации линейчатого плоского изображения, генерируемого на экране обычного дисплея (в настоящее время ЖК дисплея), тонкой апертуры в виде узких прорезей и специальных оптических систем, с помощью которых формируются стереопары изображений для разных глаз одного наблюдателя или даже многих наблюдателей. Фактически наблюдатель видит разными глазами разные множества пикселей на экране, с помощью которых и формируются стереопары [7]. Можно отметить, что хотя параллаксные системы относятся к автостереоскопическим технологиям, параллаксный барьер, который они используют, собственно и является устройством сепарации, хотя и встроенным в дисплей. Существенным недостатком этих технологий является требование достаточно точного позиционирования наблюдателя относительно дисплея для наблюдения объемного изображения.

В голографических устройствах [8] формируется дифракционный образ сцены, а операцию обратной свертки выполняет хрусталик глаза человека. При этом воспроизводятся голограммы с помощью жидко кристаллических экранов или выводятся синтезированные компьютером голографические изображения. Такого рода устройства ориентированы в первую

очередь на отображение статических сцен.



Рисунок 1 – Классификация 3D устройств отображения

Объемные технологии (volumetric displays), отличаются тем, что образ отображаемой сцены формируется в некоторой реальной или виртуальной трехмерной среде. То есть некоторой точке реального трехмерного пространства отображаемой сцены соответствует точка в пространстве среды отображения. В [9] такого рода устройства называются "трехкоординатными" и их главной отличительной чертой определяется возможность множественного многокурсного наблюдения сцены.

В зависимости от способа "создания" трехмерной среды отображения устройства данного класса делятся на устройства с замещающим экраном (виртуальная трехмерная среда) и устройства с реальной трехмерной средой отображения - статические 3D "экраны".

Технологии построения устройств с замещающими экранами основаны на инерционности зрительного аппарата человека (собственно как и в кинематографе). При этом экран, на котором последовательно во времени формируются соответствующие "срезы" изображения, достаточно быстро перемещается в пространстве, а наблюдатель воспринимает эти

срезы как некоторое единое слитное трехмерное "изображение". Нашли распространение экспериментальные образцы такого рода устройств, использующих плоскопараллельное движение плоского экрана (мультипланарные устройства) [3], вращение плоского [10] или геликоидального экрана [3,11], сферические экраны [11].

В свою очередь технологии со статическим трехмерным экраном используют некоторую физически реальную (ограниченную в пространстве) трехмерную среду, в которой формируется трехмерное отображение сцены. Основная особенность такого рода устройств заключается в том, что весь отображаемый объем полностью заполняется неким материалом (веществом), который можно возбудить в любой произвольной точке (позиции, вокселе). Трехмерная развертка выполняется с помощью двух независимых лучей (пучков) некоторого излучения, которые активируют воксель, только когда лучи пересекаются. В качестве такого рода среды может использоваться газ [12] или стекло определенного состава.

Создаются и устройства, в которых физически присутствует трехмерный массив излучающих элементов, например светодиодов

[13], однако прототипы таких устройств имеют малую разрешающую способность.

Построение 3D дисплеев на базе объемных технологий требует разработки как собственно аппаратуры дисплея, так и его программного обеспечения. Здесь возникают задачи генерации трехмерных графических примитивов для синтеза трехмерных сцен. Следует отметить, что в литературе достаточно подробно рассмотрены вопросы создания воксельных моделей ("вокслизации") реальных объектов, например, с помощью трехмерных сканеров, в то время как методы и алгоритмы генерации типичных графических примитивов не рассматриваются. В [14] рассмотрен "базовый" алгоритм генерации 3D разложений отрезка произвольной прямой и дуги произвольной окружности. Алгоритм обеспечивает достаточную точность генерации, но его быстродействие недостаточно для генерации сцен в реальном времени. В настоящей статье предложены несколько модификаций исходного алгоритма из [14] с целью повышения его быстродействия.

Задача и базовый метод 3D растрового разложения отрезка

Предположим, что некоторая часть трехмерного евклидова пространства, которое отображается дисплеем, имеет вид трехмерного параллелепипеда:

$$\Omega \in R^3, 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq Z.$$

С учетом возможности масштабирования, будем считать, что $X=Y=Z=H$, то есть Ω – трехмерный куб.

Положим, что Ω заполнена вокселями – атомарными элементами, которые отображаются 3D дисплеем. Определим воксель как куб с единичной стороной. Центры «соседних» вокселей удалены друг от друга по координатным осям на единичное расстояние. Множество вокселей, заполняющих Ω можно представить как трехмерный массив вокселей $V_{i,j,l}$, где i,j,l – индексы, принимающие значения $0, 1, \dots, \text{int}(H)$. Координаты центра вокселя определяются как:

$$x_{i,j,l} = 0.5(i+1), y_{i,j,l} = 0.5(j+1), z_{i,j,l} = 0.5(l+1) \quad (1)$$

Соответственно, воксель, которому принадлежит точка $P \in \Omega$ с координатами p_x, p_y, p_z , имеет индексы

$$i = \text{int}(p_x), j = \text{int}(p_y), l = \text{int}(p_z), \quad (2)$$

В Ω задан своими начальной $A = [X_A, Y_A, Z_A]$ и конечной $B = [X_B, Y_B, Z_B]$ точками отрезок AB некоторой произвольной прямой. Необходимо найти такую совокупность вокселей, каждый из которых лежит в некотором смысле «недалеко» от прямой и «плотно» заполняет промежуток от A до B и, будучи

отображенной на экране 3D дисплея, воспринимается наблюдателем как отрезок прямой в трехмерном пространстве (с учетом масштабирования).

Определим два разных вокселя V_q и V_w как соседние, если у них а) хотя бы один индекс не равен и б) индексы отличаются не более чем на 1. Обозначим воксели V_A и V_B как начальный и конечный воксели растрового разложения отрезка AB . Индексы вокселей V_A и V_B определяются по (2).

Задача растрового разложения отрезка прямой формулируется как задача определения множества вокселей, к которому принадлежат V_A и V_B , каждый из которых (кроме начального и конечного) имеет два и только два соседних вокселя, центр каждого из которых лежит на минимальном расстоянии до отрезка и количество вокселей в множестве минимально.

В [14] предложен метод построения такого множества, суть которого кратко заключается в следующем. Предполагается, что отрезок лежит в первом октанте и все его проекции положительны. Начальный воксель V_0 задается условием $A \in V_0$. Пусть найден q -й воксель V_q последовательности. Требуется определить следующий $q+1$ -й воксель V_{q+1} . Рассматривается семь соседних с V_q вокселей – претендентов $V_{q+1(k)}$, $k=1,2,\dots,7$, в октанте (относительно V_q), в котором лежит направляющий вектор отрезка. Вычисляются расстояния между их центрами вокселей – претендентов и отображаемым отрезком. Следующий в последовательности воксель V_{q+1} определяется как воксель – претендент $V_{q+1(k)}$ с минимальным расстоянием до прямой. Таким образом строится последовательность вокселей V_q , $q=0,1,\dots,N$, где N – число вокселей в растровом представлении отрезка и $B \in V_N$.

Модифицированный алгоритм 3D растрового разложения отрезка

Алгоритмическая реализация базового алгоритма растрового разложения отрезка в трехмерном пространстве может быть модифицирована с целью повышения быстродействия.

Во-первых, можно учесть, что количество шагов N определяется максимальной проекцией отрезка на координатные оси, то есть:

$$N = \text{int}(\max(|X_B - X_A|, |Y_B - Y_A|, |Z_B - Z_A|)) + 1 \quad (3)$$

при этом индекс, соответствующий координате с максимальной проекцией, должен изменяться на каждом шаге генерации. Таким образом обобщенная матрица приращений для определения координат центров вокселей – претендентов должна иметь следующий вид:

| $k=$ | Приоритет по X | | | | Приоритет по Y | | | | Приоритет по Z | | | |
|--------------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $\Delta_i =$ | S_x | S_x | S_x | S_x | 0 | 0 | S_x | S_x | 0 | 0 | S_x | S_x |
| $\Delta_j =$ | 0 | 0 | S_y | S_y | S_y | S_y | S_y | S_y | 0 | S_y | 0 | S_y |
| $\Delta_l =$ | 0 | S_z | 0 | S_z | 0 | S_z | 0 | S_z | S_z | S_z | S_z | S_z |

Здесь

$$S_x = \text{sign}(U_x), S_y = \text{sign}(U_y), S_z = \text{sign}(U_z), \quad (4)$$

где U_x, U_y, U_z - компоненты направляющего вектора U заданного отрезка AB , $U = (B - A) / |B - A|$, а $\Delta_i, \Delta_j, \Delta_l$ - приращения индексов для вокселей - претендентов.

Расстояние D_k между k -м вокселем-претендентом $V_{q+1(k)}$ и заданным отрезком вычисляется по [1]:

$$D_k = |W_k - (W_k - U)U|, \quad (5)$$

где: $W = V_{q+1(k)} - A$.

Аналогично [14], следующий в последовательности воксель V_{q+1} находится как воксель - претендент с минимальным расстоянием до прямой, то есть $V_{q+1} = V_{q+1(k)}$, где $K = \text{arg}(\min_k(D_k))$

Модифицированный алгоритм трехмерной растризации отрезка прямой (алгоритм приоритетных направлений)

Start

Ввод начальной A и конечной B точек;

Определение V_A и V_B ;

// Определение направления распространения отрезка

Вычисление U ; Вычисление S_x, S_y, S_z ;

Формирование матрицы направлений M для 4-ех вокселей претендентов в зависимости от приоритетного направления отрезка;

$q := 0; V_0 := V_A; V_q := V_0$;

while($V_q \neq V_B$)

$\min := +\infty$;

for $i=1$ to 4 **do**

// формирование вокселя - претендента

$V_{next} := V_q + M^{<i>}$; //векторная операция

if($D(V_{next}) < \min$)

then $\min := D(V_{next}); V_{q+1} := V_{next}$;

end if

next i

$q := q+1$

end while

Вывод V_q для $q=0,1,\dots,N$

finish

По сравнению с матрицей направлений из [14], которая задает семь вокселей-претендентов, здесь, выбором из M только приоритетных приращений, определяется только четыре претендента. Например, если отрезок "вытянут" вдоль оси X , то индекс i должен инкрементироваться или декрементироваться в зависимости от знака проекции на ось X направляющего вектора U на каждом q -м шаге.

Алгоритм растрового разложения отрезка в трехмерном пространстве, с учетом вышеизложенного, может быть записан на псевдоязыке из [16] следующим образом.

Так как расстояние D_k используется только для сравнения, $D(V_{next})$ можно вычислять как квадрат расстояния, то есть по (5) без извлечения квадратного корня. Предложенная модификация сокращает на каждом шаге количество "пробных" вокселей с 7 до 4-х, уменьшая время вычислений не менее чем в 1,75 раза.

Во-вторых, возможен учет симметричности 3D растрового разложения отрезка, то есть необходима генерация только $N/2$ вокселей, начиная от A (генерация вперед), а вторая половина вокселей может быть сформирована как зеркальное отражение первой, относительно B (генерация назад). Изменения для такого варианта в псевдопрограмме алгоритма, приведенного выше, тривиальны. «Зеркальная» модификация позволяет дополнительно в 2 раза сократить время работы алгоритма.

Экспериментальные исследования модифицированного алгоритма 3D растрового разложения отрезка

Качество генерации трехмерного представления отрезка прямой естественно оценить учитывая расстояния каждого вокселя - растрового разложения отрезка от самого отрезка. На каждом шаге находится ϵ_k вокселя V_q разложения равная $\min_k(D_k)$, $k=0, 1, 2, 3, 4$. В целом для заданного отрезка можно найти:

минимальную ошибку

$$O_{\min} = \min_q (\epsilon_q), q=0,1,\dots,N,$$

среднюю ошибку

$$O_{av} = \frac{1}{N} \sum_q \epsilon_q,$$

максимальную ошибку

$$O_{\max} = \max_q (\epsilon_q), q=0,1,\dots,N.$$

Условие правильности работы генератора (все воксели разложения "пронизаны" заданным

отрезком) требует $O_{\max} < \frac{a}{2}\sqrt{3}$, где a - сторона вокселя. При $a=1$ максимальная ошибка разложения не должна превышать 0,866. Собственно качество разложения можно оценивать по O_{av} , чем меньше средняя ошибка - тем лучше генератор.

Экспериментальное исследование предложенных модификаций заключалось в генерации тысячи различных отрезков в Ω с $H = 1023$ (1 мегавоксель). Эксперименты выполнялись на персональном компьютере на базе Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E4600 @2.40GHz, 2.40ГГц, 1,99ГБ ОЗУ. Обобщенные результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты генерации 1000 отрезков

| | Средняя ошибка | Максимальная ошибка | Время генерации 1 000 отрезков (сек) | Ускорение относительно базового |
|---|----------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Базовый алгоритм | 0,3956 | 0,746 | 0,6593 | |
| Модификация 1: приоритетные направления | 0,38 | 0,704 | 0,330 | 1,9 |
| Модификация 2: «Зеркало» | 0,389 | 0,704 | 0,1648 | 3,9 |

На рис. 2 в качестве примера приведены примеры генерации отрезка модифицированными алгоритмами.

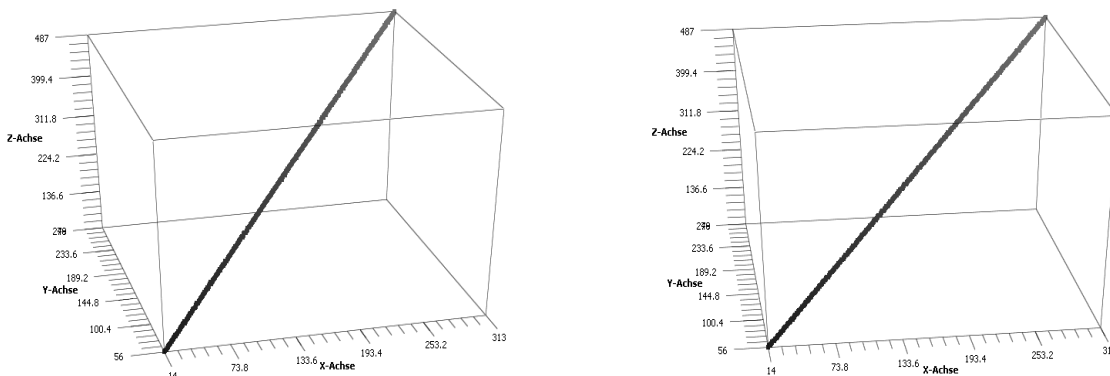


Рисунок 2 – Примеры 3D генерации отрезка.
а) приоритетные направления, б) «зеркало»
Начальная точка A (13, 55, 48), Конечная точка B (313, 278, 487)

Анализ результатов экспериментов показывает, что

- все алгоритмы имеют максимальные ошибки менее 0,866, что свидетельствует о корректности работы алгоритмов;

- модификация 1 алгоритма (приоритетных направлений) ошибки не ухудшает, но время генерации уменьшается в 1,9 раза, что несколько выше теоретической оценки (по-видимому за счет исключения операций извлечения корня при вычислении расстояния до отрезка);

- модификация 2 алгоритма («зеркало») - время генерации уменьшается в 3,9 раза, что

хорошо согласуется с предварительной оценкой.

Следует отметить незначительное уменьшение средней ошибки, что говорит о повышении качества генерации отрезка.

Предложенные модификации базового алгоритма 3D растрового разложения отрезка существенно повышают быстродействие (в 3,5 раза), но для генерации сложных сцен с учетом требования реального времени этого недостаточно. Дальнейшие исследования следует направить на оптимизацию алгоритмов с целью сокращения временных затрат путем распараллеливания вычислительного процесса на базе технологий CUDA.

Литература

1. Brown M.A., Slater M. Some Experiences with Three-Dimensional Display Design: An Air Traffic Control Visualisation // IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, IEEE, 1977.- pp. 296-301
2. Christopher D. Wickens and Steven Todd. Threedimensional display technology for aerospace and visualisation. // In Proc. Human Factors Soc. 34th Annual Meeting, pages 1479-1483, 1990
3. Geng J. "Volumetric 3D Display for Radiation Therapy Planning". Journal of Display Technology vol.4, No. 4, 2008, December, pp. 437-450
4. Bahram Javida, Fumio Okano. Three-dimensional television, video and display technology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002 505 p. ISBN 3-540-43549-2
5. F.E. Ives, Parallax stereogram and process of making same, US Pat 725567, 1903
6. Favolora G.E., Volumetric 3D Displays and Application Infrastructure // "Computer", 2005, August, pp 37-44
7. Gee Young Sung, Yun-Tae Kim, Du-Sik Park, Dong Kyung Nam, Ju Yong Park, 2d/3d switchable autostereoscopic display apparatus and method, Pat US 2010/00079584
8. Slinger Chris, Computer-Generated Holography as a Generic Display Technology // "Computer", V.38, #8, 2005, August, pp 46-53
9. Ezhov V.A., Studentsov S.A. Volume (or stereoscopic) images on the screens of standard computer and television displays. – Proc. SPIE, 2005, v.5821, pp.102-116.
10. Favolora G.E. et al., "100 million-voxel volumetric display", in Proc. SPIE Cockpit-Displays IX: Displays for Defense Appl, 2002, vol. 4712.
11. Geng J., "Method and apparatus for an interactive volumetric three dimensional display" US Patent 7 098 872.
12. Downing E.A., "Method and system for three-dimensional display of information based on two-photon upconversion" US Patent 5 684 621
13. Duncan L. MacFarlane, George R. Schultz, Paul D. Higley, Jon E. Meyer, Voxel-based spatial display, Proc. SPIE, Vol. 2177, 196 (1994); doi:10.1117/12.173876
14. Башков Е.А., Авксентьева О.А., Аль-Орайкат Анас М. К построению генератора графических примитивов для трехмерных дисплеев. В сб. Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія "Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем". Вип. 7 (150). - Донецьк, ДонНТУ. - 2008. - ст. 203-214
15. Авксентьева О.А., Аль-Орайкат Анас, Хлопов Д.И. Улучшенный алгоритм генерации прямой для 3D – дисплеев. Материалы 14 – 10 международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 18 -20 марта 2010, Харьков 2010, сб. материалов 4.1. – Харьков: ХНУРЭ. 2010. – 527с.
16. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. 478 с.

Поступила в редакцию 30.03.2010