

УДК 681.3.06

С. И. Вяткин, Б. С. Долговесов, Б. С. Мазурок, А. Ф. Рожков  
(Новосибирск)

**ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД РАСТРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Рассматриваются вопросы, связанные с использованием эффективных алгоритмов преобразования описания трехмерных объектов в телевизионный растр для компьютерных систем визуализации реального масштаба времени. Предлагается в качестве алгоритма растрирования изображений использовать рекурсивное деление экрана по кватернарному дереву. Описываются преимущества такого алгоритма на многих этапах преобразования изображений, заданных многоугольниками, представленными уравнениями линий. Рассматриваются различные аппаратные варианты реализации алгоритма в системах визуализации реального времени. Обсуждаются результаты использования этого алгоритма в системе визуализации «Альбатрос», разработанной с участием авторов.

Построение систем визуализации трехмерных объектов, работающих в реальном времени, связано с выполнением большого объема вычислений за время телевизионного кадра. Основными процедурами, ограничивающими сложность изображений в кадре, являются геометрические преобразования объектов, аппроксимированных выпуклыми многоугольниками, клипирование их относительно плоскостей пирамиды видимости, растрирование многоугольников с одновременным удалением невидимых поверхностей.

Одной из трудоемких операций является процедура растрирования многоугольников — разложение многоугольников в телевизионный растр. Известные подходы решения этой задачи можно разделить на две группы. К первой можно отнести поиск пересечения многоугольников с телевизионной строкой и получение сегментов строки. Существует множество алгоритмов, реализующих этот подход, в частности, он реализован в системе «Аксай» [1]. Ко второй группе алгоритмов растрирования можно отнести поиск участков экрана — клеток, занятых отображаемыми многоугольниками. Этот подход был реализован, например, в системе СТ-5 [2], в которой отображаемые многоугольники разбиваются на клетки фиксированного размера. Достаточно подробный анализ некоторых методов растрирования и эффективности использования клеточного подхода приводится в [3].

В данной работе предлагается использовать для процесса растрирования алгоритм рекурсивного деления экрана в виде кватернарного дерева и определения принадлежности многоугольника, заданного уравнениями линий, различным частям экрана. При этом в качестве элемента сравнения используется уменьшающаяся в 4 раза от уровня к уровню клетка, первоначальный размер которой совпадает с размером экрана отображающего устройства. Алгоритм рекурсивного деления уже применялся ранее для решения других задач машинной графики, например для удаления невидимых поверхностей по методу Варнока [4]. В данной работе предлагается его использование для задачи растрирования. Впервые он был изложен авторами в работе [5].

Рассмотрим обобщенное описание процесса рекурсивного деления. В предлагаемом методе растрирования рассматриваются выпуклые многоугольники, которые на плоскости экрана описываются уравнениями линий:



Таким образом, при делении модифицируется лишь коэффициент  $C$ , и в модификации используются простейшие операции сложения, вычитания и умножения на 2.

Далее определим взаимное расположение выбранной клетки и одного из ребер. Возможны три варианта расположения полуплоскости ребра относительно данной клетки:

- линия ребра пересекает клетку,
- клетка целиком лежит вне полуплоскости ребра,
- клетка целиком лежит внутри полуплоскости ребра.

Условие непересечения клетки линией записывается в виде

$$|A| + |B| < |C|. \quad (8)$$

Это условие легко может быть получено, если записать условие одновременного расположения всех четырех вершин (4) по одну сторону линии  $Ax + By + C = 0$ :

$$\begin{cases} A + B + C > 0, \\ -A + B + C > 0, \\ -A - B + C > 0, \\ A - B + C > 0, \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} A + B + C < 0, \\ -A + B + C < 0, \\ -A - B + C < 0, \\ A - B + C < 0. \end{cases} \quad (9)$$

Признаком, различающим случаи, когда клетка целиком лежит внутри либо вне полуплоскости ребра, служит знак  $C$ :

$$C \geq 0 \text{ — полуплоскость ребра включает клетку целиком,} \quad (10)$$

$$C < 0 \text{ — полуплоскость ребра и весь многоугольник лежат вне клетки.} \quad (11)$$

Клетка принадлежит многоугольнику, если относительно каждого из ребер она лежит внутри полуплоскости ребра либо им пересекается. В этом случае к ней применяется следующий шаг рекурсивной процедуры.

Клетка не принадлежит многоугольнику, если полуплоскость хотя бы одного из ребер многоугольника лежит вне клетки. В этом случае клетка дальнейшему делению не подвергается и отбраковывается.

Рекурсивная процедура применяется до тех пор, пока размер текущей клетки не станет равным размеру пиксела. На каждом шаге координата центра клетки уровня  $n + 1$  формируется путем добавления к разрядам координат центра клетки уровня  $n$  двух разрядов, указывающих положение клетки уровня  $n + 1$ .

Таким образом, алгоритм может быть представлен в виде кватернарного дерева. В корне дерева имеем полный экран и описание многоугольника в экранной системе координат. В листьях дерева имеем координаты пикселов, принадлежащих многоугольнику, и коэффициенты уравнений ребер во внутрипиксельной системе координат.

Изложенный обобщенный метод рекурсивного деления может быть реализован в различных вариантах. Один из вариантов алгоритма, пригодный для аппаратной реализации, предусматривает определенный способ нормирования коэффициентов ребер. Нормирование коэффициентов в выражении (1) приводит к уменьшению числа параметров, описывающих ребро, и уменьшает описание, необходимое для формирования субпиксельной маски.

Разделим коэффициенты уравнения ребра  $Ax + By + C = 0$  на положительную величину  $|A| + |B|$  и введем обозначения:

$$a = \frac{A}{|A| + |B|}; \quad b = \frac{B}{|A| + |B|}; \quad c = \frac{C}{|A| + |B|}. \quad (12)$$

В результате уравнение ребра задается двумя параметрами  $a$  и  $c$ , а также знаком  $b$ . Условие (8) упрощается и сводится к проверке:

$$|c| > 1. \quad (13)$$

Преобразование коэффициента  $c$  согласно (7) приобретает вид

$$c' = \begin{cases} 2c \pm d, \\ 2c \pm 1, \end{cases} \quad (14)$$

где  $d = 2|a| - 1$ , а четыре варианта вычисления соответствуют четырем клеткам.

Возможны различные варианты реализации рекурсивного поиска элементов изображения с помощью следующих архитектур:

- итерационный монопроцессор с многоуровневым регистровым файлом на число уровней кватернарного дерева;
- кватернарное дерево клеточных процессоров, реализующих субфреймовый параллелизм различных уровней;
- конвейер однотипных клеточных процессоров.

В каждом из рассматриваемых вариантов возможна как последовательная обработка ребер многоугольников, так и параллельная обработка ребер, коэффициентов уравнений цветовых параметров и текстурных координат. Предложенные основные варианты архитектуры могут использоваться в различных сочетаниях с применением как полного видеобuffers (фрейм-буферный подход), так и фрагментарной виртуальной памяти. Во всех вариантах возможно реализовать удаление невидимых поверхностей с помощью приоритетно упорядоченных последовательностей многоугольников либо с применением Z-буфера, а также использовать их сочетание.

Использование алгоритма деления по кватернарному дереву позволяет для приоритетно упорядоченной последовательности многоугольников достаточно просто реализовать механизм многоуровневого маскирования, позволяющего значительно повысить производительность системы. Эффективность действия этого механизма существенно возрастает с ростом глубинной сложности изображений. Маски занятых областей изображения могут быть сформированы на любом уровне деления, а также модифицированы при заполнении более нижних уровней. Механизм многоуровневого маскирования может применяться не только в пространстве изображения для уменьшения времени обработки кадра и количества вычислений видеопроцессором, но и в пространстве объектов для уменьшения количества вычислений геометрическим процессором.

Использование рекурсивного алгоритма растривания многоугольников, заданных уравнениями плоскостей, ограничивающих объект, позволяет существенно упростить процедуру клипирования многоугольников по сравнению с классическим вариантом. Так, после выполнения геометрических преобразований в системе, использующей задание многоугольников уравнениями плоскостей, процедура клипирования не требует точного разрезания многоугольников плоскостями пирамиды видимости и сводится к отбраковке ребер и многоугольников согласно условиям (8) и (10). Кроме того, проецирование многоугольников в экранную систему координат не требует операции перспективного деления.

Данный метод растривания является ключом к решению задач получения систем большой производительности и высокого качества изображения и имеет следующие достоинства:

- быстрый поиск принадлежащих многоугольнику элементов изображения за счет эффективного отбрасывания не принадлежащих ему клеток;
- простота операций нахождения внутренних и пересеченных клеток (на каждом уровне подразделения при аппаратной реализации выполняется не более одной арифметической операции типа сложения или вычитания на одно ребро в соответствии с выражением (14));
- простота обобщения алгоритма на случай фильтра с произвольной апертурой без существенного увеличения количества вычислений;

- простота распараллеливания вычислительного процесса: по функциям вычисления цвета, пикселям, клеткам и многоугольникам;
- высокая эффективность работы процессоров в многопроцессорной архитектуре за счет возможности асинхронной работы процессоров;
- функциональная однородность архитектуры и как следствие простота реализации в виде заказных СБИС;
- простота адаптации алгоритма к различным растрам (1024 × 768, 1280 × 1024) с помощью предкоррекции уравнений ребер.

Один из вариантов рассматриваемого алгоритма растривания был реализован с участием авторов в компьютерной системе визуализации «Альбатрос» [5, 6].

Входной информацией для системы является приоритетно-упорядоченная последовательность многоугольников, описывающая отображаемую обстановку. Геометрические преобразования осуществляются с помощью программируемого 32-разрядного многопроцессорного устройства с плавающей запятой с пиковой производительностью 60 Мфлопс. После геометрических преобразований объектов, заданных трехмерными координатами вершин многоугольников, осуществляется переход к заданию многоугольников уравнениями линий, что позволяет не производить точное клипирование отображаемых объектов.

Видеопроцессор включает память кадра, конвейер однотипных клеточных процессоров, реализующих рассмотренный алгоритм растривания, вычислитель цветовой компонент и текстурированных поверхностей, заданных уравнениями, и видеопамять, хранящую 24-разрядный цвет RGB в каждом пикселе.

Систему «Альбатрос» характеризуют следующие возможности: высокая вычислительная мощность; высокое качество изображений, достигаемое за счет использования средств, компенсирующих дефекты изображений, вызванных дискретностью растра (цифровой фильтрацией); возможность представления изображений типа точечных источников света (огни, звезды и т. д.); генерация различных визуальных эффектов (округлых объектов за счет интерполяции цвета вдоль многоугольников, дымки, тумана, текстурированных поверхностей, полупрозрачности); многоканальность.

С целью расширения диапазона приложений системы в основу ее реализации заложена многоуровневая модульность, допускающая различные конфигурации по сложности, производительности и функциональным возможностям. Основными из них являются:

- а) одноканальная система производительностью 4000 многоугольников за кадр или 10000 огней;
- б) трехканальная система производительностью 12000 многоугольников за кадр;
- в) трехканальная система с одним геометрическим процессором и тремя видеопроцессорами производительностью 4000 многоугольников за кадр.

Система может оснащаться модулями, реализующими специальные функции (линейная интерполяция яркости, дымка, туман, полупрозрачность, текстура, фильтрация).

Система снабжена встроенным контролем. Тестирование от управляющей ЭВМ позволяет производить поиск неисправностей с точностью до печатной платы.

В состав математического обеспечения входят: система реального времени; тестовое обеспечение; система подготовки баз данных.

Разработанная система визуализации в 4—10 раз превышает по производительности лучшие отечественные разработки и по основным параметрам соответствует системам подобного класса, серийно выпускаемым за рубежом.

Статистические исследования на некоторых базах данных показали, что использование многоуровневого маскирования, даже при небольшой глубинной сложности отображаемых сцен, позволяет уменьшить время растривания изображения в 2 и более раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буровцев В. А., Власов С. В., Вяткин С. И. и др. Геометрический процессор синтезирующей системы визуализации // Автометрия.—1986.—№ 4.
2. Башков Е. А., Казак А. В. Генераторы изображений для авиатренажеров // Зарубеж. радиоэлектрон.—1984.—№ 8.
3. Sproull R. F., Sutherland J. F. et al. Characterization of ten rasterization techniques // Comput. Graph.—1989.—23, N 3.
4. Warnock J. E. A hidden surface algorithm for computer generated halftone pictures.—Salt Lake City, 1969.—(Techn. Rept. /Univ, Uta, Computer Science Dept.; TR-4-15).
5. А. с. 522240 СССР. Генератор изображений /А. И. Богомяков, С. И. Вяткин, Б. С. Долговесов.—Опубл. 15.11.89, Бюл. № 42.
6. Долговесов Б. С., Куц Л. И., Пустыльников Л. В. Разработка унифицированного ряда растровых систем визуализации для тренажеров // Проблемы и перспективы голографии и оптоэлектроники в системах визуализации: Сб.—М.: НИКФИ, 1989.

*Поступила в редакцию 6 апреля 1993 г.*

---

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!