

# Синтез виртуальной среды с рекурсивным делением объектного пространства

С.И. Вяткин, Б.С. Долговесов, С.Е. Чижик

Институт автоматики и электрометрии

Новосибирск, Россия

## Аннотация

Обсуждается проблема синтеза изображений фотореалистичного качества в реальном времени. Рассматриваются новые способы задания поверхностей свободных форм без аппроксимации их полигонами или патчами. Предложен рекурсивный алгоритм деления объектного пространства с многоуровневым маскированием и с учетом перспективы и коррекции дисторсии. Показана возможность визуализации пассивов скалярных данных.

*Ключевые слова:* Поверхности свободной формы, текстура формы, рекурсивное деление объектного пространства, объемная визуализация.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Отношение цена/производительность современных Ю акселераторов изменилось к лучшему настолько, то эквивалент имитатора полета в реальном масштабе времени уже появился на столе среднего пользователя. Несмотря на ряд недостатков 3D акселераторов, в недалеком прошлом такой уровень производительности систем визуализации был достижим только в специализированных системах имитаторов полета, появившихся сотни тысяч долларов.

Анализ возможных путей развития графических систем и, в частности, систем визуализации реального времени, показывает, что самый простой способ достижения реалистичности изображения - за счет увеличения количества отображаемых в кадре многоугольников - не самый эффективный. На этом пути трудно ожидать качественного скачка, например, такого, какой дало в свое время введение текстуры. Даже при многократном большем количестве отображаемых многоугольников изображение без текстуры будет беднее, чем более простое, но с цветной текстурой. То же самое можно сказать и в связи с применением Фонг (Phong) -интерполяции, при использовании которой требуется меньшее число многоугольников, чем при использовании Гуро (Gouraud) - интерполяции. Тем не менее, для отображения реалистичного горного рельефа местности требуется большое количество многоугольников. Это же относится и к отображению скульптурных моделей, даже если применять NURBS (non-uniform rational B-splines) или другие spline surfaces, то потребуются

большое количество патчей. Все это говорит о необходимости обработки большого количества примитивов в системах визуализации. Существующие алгоритмы визуализации работают либо с полигональными описаниями, либо с полиномиальными, либо с другими способами задания поверхностей. Поверхности высоких порядков, как правило, аппроксимируются многоугольниками или патчами для отображения, что приводит к большому числу последних. С другой стороны, использование полиномов высоких степеней также неудобно из-за сложности вычислений и ограничений по точности. Несмотря на то, что системы визуализации, использующие полигональное задание, получили широкое распространение в силу продвинутой архитектур и алгоритмов, актуальным остается решение вопроса об эффективности использования подобных систем для представления объемов (Volume Rendering). С практической точки зрения, наиболее эффективной была бы универсальная система, обеспечивающая широкий круг задач с минимальной заменой программного обеспечения и, возможно, некоторых submodule под решение конкретной задачи. Обеспечение такой универсальности является одним из требований к системе визуализации нового поколения - Voxel Volumes, проект которой предлагается для рассмотрения. Разрабатываемые системы визуализации нового поколения базируются на двух основных аспектах для создания систем визуализации, обеспечивающих как универсальность, так и высокое качество отображаемых сцен:

- 1) новый способ задания поверхностей свободных форм и математический аппарат описания трехмерных объектов, не требующий для отображения поверхностей задания их полиномами высоких степеней или аппроксимации примитивами более низкого уровня (многоугольники, патчи);
- 2) эффективный метод растривания с минимальным количеством вычислений,

## 2. СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Характерной особенностью предлагаемого метода задания отображаемых поверхностей является то, что основными примитивами выбраны поверхности

второго порядка - квадратики. На этой базе строится класс свободных форм. Это дает возможность описывать сложные геометрические объекты, задавая функцию отклонения от базовой поверхности второго порядка. Частным случаем свободных форм является рельеф местности (Terrain), который задается двумерной табличной функцией высот - отклонением относительно несущей плоскости (Рис. 1,2), В нашем случае поверхности представлены композицией базовых поверхностей (квадратов) и функций возмущения. С помощью функций возмущения (которые задаются так же, как и базовые поверхности, уравнениями второй степени в неявном виде) задаются более сложные поверхности. Получающаяся поверхность будет гладкой, и потребуется небольшое количество функций возмущения для создания сложных форм поверхностей, включая дырчатые (Рис. 7), с возможностью "отрыва" и обратным их "воссоединением".

Уровень детальности 0  
 Уровень детальности 1  
 Уровень детальности 2

Рис. 1.

Рис. 2.

Гладкое возмущение строится из квадратичной функции следующим образом. Определим внутреннюю область Q как часть пространства, где  $0 < Q$ . Тогда во внешней части Q положим R тождественно равной нулю, а во внутренней части возведем Q в квадрат:

Мы получили функцию R, которая естественным образом вычисляется в процессе рекурсивного подделения, так что квадрат может выступать в роли возмущения для других объектов. А объект, который мы называем *свободной формой*, остается по своей сути квадратом, но учитывающим добавку, вносимую возмущением к собственной базовой функции. В свою очередь, свободная форма может являться функцией

возмущения для какого-либо другого объекта. Потому как  $\max[Q + R] < \max[Q] + \max[R]$ , то это означает, что для оценки максимума Q на некотором интервале необходимо вычислить максимум функции возмущения на этом же интервале.

Сложные объекты, в свою очередь комбинируются с помощью трехмерных теоретико-множественных операций, таких как объединение (Рис. 6-9), пересечение (выделение общего подмножества) и разность (взятие первого объекта за исключением тех его частей, которые являются общими со вторым объектом). Таким образом, свободные формы можно отображать без предварительной аппроксимации их большим количеством патчей, не имея проблем с заданием границ, кривых полупространств и  $i, 1$ , присущих параметрическому заданию патчами.

Отметим, что обычный способ представления рельефа гранями требует большого количества многоугольников, в частности, треугольников. Известно, что рельеф местности (Terrain) можно задан картой (сеткой) высот и без предварительной триангуляции его отобразить, получая при этом высокую реалистичность (Рис. 5). Отличительной особенностью является алгебраическое задание базовой поверхности (как в случае свободных форм), а каждый узел сетки высот характеризуется только отклонением от этой поверхности [1]. Предусматривается несколько уровней детализации, каждый из которых описывает своей картой высот. Представление карты высот, как скалярного поля, функциями возмущения, что позволяет ориентировать поле относительно базовой поверхности произвольным образом (наклонит расходящееся в разные стороны и т.д.). Такой способ задания поверхности позволяет рассматривать карты высот как текстуру формы объекта, которая как и обычная текстура легко анимируется, требует минимального объема памяти, обеспечивает высокий реализм отображаемых трехмерных сцен (Рис. 5). Для смены уровней детализации используется тот же механизм, что и для обычной текстуры.

Рис. 3.

### 3. РЕКУРСИВНОЕ ДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТНОГО ПРОСТРАНСТВА

Метод растривания включает разработанный нами алгоритм многоуровневого рэй - кэстинга, осуществляющий эффективный поиск элементов объема-вокселей, участвующих в формировании изображения. Поиск производится в пространстве внутри куба, от -1 до +1 по каждой координате, так что центр куба соответствует началу координат (Рис. 3). На первом шаге рекурсии исходный объем разбивается на четыре подобъема в экранной плоскости (Рис. 4). Для каждого подобъема выполняется тест на пересечение с объектом. Если пересечение **имеет** место, то подобъем подвергается следующему уровню рекурсии.

Рис. 4.

Подобъемы, не пересекающиеся с объектом, дальнейшему погружению в рекурсию не подлежат, что соответствует исключению из рассмотрения квадратных областей экрана, на которые данный подобъем (следовательно, и поверхность объекта) не отображается. В процессе поиска вокселей, содержащих в себе участки поверхности объекта, формирующие изображение, алгоритм осуществляет обход кубического пространства по четверичному дереву, листья которого являются корнями двоичных поддеревьев. В процессе обхода дерева используется механизм многоуровневого маскирования в случае непрозрачных объектов. Применение проективного преобразования обобщает приведенный алгоритм на пирамидальные объемы, что позволяет синтезировать изображения с перспективой и учетом коррекции дисторсии. Наиболее просто подделение пространства осуществляется в кубе или параллелепипеде. Однако, при переходе к пирамидальному пространству (с учетом перспективы), можно столкнуться с проблемами либо увеличения порядка поверхностей, а следовательно, и количества вычислений, либо неоднородности пространственного описания моментов изображения (вокселей). Эти проблемы еще более усложняются при решении задачи коррекции дисторсии изображения. Задача подделения перспективного пространства без увеличения порядка поверхностей (аналогично подделению куба) была решена за счет трансформации пространства в пространство. При этом пирамидальное пространство может быть достаточно произвольной формы, что важно для коррекции дисторсии.

Применение *проективного преобразования* обобщает приведенный алгоритм на пирамидальные объемы, что позволяет синтезировать изображения с перспективой.

Ветвь геометрических знаний, изучающая проективные свойства фигур, называется *проективной геометрией*, где для определения метрики в пространстве вводятся *однородные координаты*. В трехмерном пространстве точке с декартовыми координатами  $(x, y, z)$  соответствует бесконечное множество однородных координат  $(x', y', z', a)$  таких, что  $x=x'/a, y=y'/a, z=z'/a$ , т.е. однородные координаты определяются с точностью до общего ненулевого множителя. Представляет интерес матрица преобразования, действующая на однородные координаты следующим образом:

, или

где  $(C)$  - матрица преобразований,  $(M)$  - однородные координаты точки пространства  $M$ , и  $(P)$  соответствующие по отображению координаты в  $P$ .

В рамках проективной геометрии доказывается теорема о том, что проективное отображение пространства  $M$  на пространство  $P$  однозначно определяется заданием пяти пар соответствующих по отображению точек, при условии, что из пяти точек, задаваемых в пространстве  $M$ , никакие четыре не лежат в одной плоскости. Выбираем пять пар таких *опорных* точек  $(M^i)$  и  $(P^i)$  (верхний индекс соответствует номеру пары) и составляем систему уравнений:

$$(C) * (M^i) = p^i * (P^i),$$

где  $i = [1, \dots, 5]$ ,  $p^1, p^2, p^3$  и  $p^4$  - неизвестные множители, а  $p^5 = 1$ . Решая эти уравнения, находим коэффициенты матрицы проективного преобразования  $(C)$ , которая в дальнейшем используется для трансформации геометрических примитивов.

В случае решения таких задач, как Terrain Skinning, данный метод также имеет ряд преимуществ, а именно:

- 1) в геометрическом процессоре обрабатывается всего одна базовая (несущая) поверхность, например, плоскость;
- 2) правильный приоритетный порядок видимых поверхностей рельефа обеспечивается соответствующим обходом дерева и системой масок;
- 3) задние поверхности рельефа отбрасываются автоматически (система без Z-буфера и без приоритетной сортировки способна правильно отображать объекты);

4) клиппирование рельефа пирамидой видимости становится ненужным, т.к. в процессе растривания автоматически обеспечивается выборка только нужных высот из карты высот;

5) просто решаются проблемы определения и смены **уровней** детализации, конформинга.

При визуализации поверхностей проводится тест на принадлежность им лишь пересеченных вокселей, внешние и внутренние воксели отбраковываются. Если подделять и внутреннее пространство, можно выделять объемы. Внутренние воксели, также как и пересеченные могут быть различных уровней. С целью уменьшения вычислений можно выделять лишь поверхность, ограничивающую объем, если в объем попадает непрозрачный объект, то выделяется его поверхность в объеме взвешиванием интенсивностей с учетом функции затухания. Таким образом, данный метод пригоден к отображению наряду с поверхностями также и объемных областей с таблично заданными в трехмерной системе координат значениями параметров типа прозрачности, цвета, данных томографии и пр. Наряду с Volume Rendering этот метод позволяет достигать качества изображения, сравнимого с методом трассировки лучей (Ray Tracing), но за меньшее время за счет быстрого поиска объектов, которые проверяются на пересечение лучей. Применение кластеризации в методе трассировки лучей ускоряет расчет, однако в предлагаемом методе список объектов, необходимых для тестирования, максимально локализован.

#### 4.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В завершение можно отметить возможность визуализации трехмерных векторных полей и процессов в газо- и гидродинамике, получаемых при численном моделировании. Предлагаемые в проекте алгоритмические решения для обработки трехмерных данных, предназначенных для визуального представления в реальном масштабе времени, легли в основу разрабатываемого проекта по созданию компьютерной системы визуализации нового поколения "Voxel Volumes" [2]. В проекте данной системы используются также лучшие свойства известных методов, таких как виртуальная техника визуализации [3], процедурное текстурирование, в том числе тематическая текстура. На основании достигнутых результатов можно создать систему синтеза изображений для различного применения, для которой будет характерна высокая степень достоверности изображений и высокая скорость обработки. Благодаря адаптивности методики к обработке распределенных в пространстве объемов становится возможным более эффективное использование средств визуализации при проведении научных экспериментов, медицинских исследований и т.д.

Рис. 6. Объект из 25 квадратов.

Рис. 7. Объект из 17 квадратов.





Рис. 8. Объект из 49 квадратикой.



Рис. 9. Объект из 31 квадрика.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Овечкин В.В., Чижик С.Е., Каинов Н.Р. Генерация фотореалистичного рельефа местности, поверхностей свободных форм и тематических текстур в системе визуализации реального времени **Voxel-Volumes** // Труды 7-ой Междунар. конф-"Графикон-97". Москва, 1997.

[2] Savchenko V.V., Pasko A.A., Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S. New approach in geometric modeling:

distributed and hardware implementation perspectives, // International Conference on Computers and Devices for Communication **CODEC-98**. Calcutta, India, 1998, pp. 285-290.

[3] R.I. Velickohatny, S.I. Vyatkin, O.Yu. Ghimautdinnv, B.S. Dolgovesov, N.R. Kaipov, A.V. Romanovsky, S.E. Chizick, "ARIUS" - Family of real-time 3D graphics systems for PC platforms, Graphicon'97 Proceedings, S. Klimentko et al. (Eds), 132-135, 1997.

## Авторы:

Сергей Иванович **Вяткин** ст.н.с.

**Борис** Степанович Долговесов, к.т.н., зав-лаб.

Сергей Евгеньевич **Чижик** вед. инж.

Институт автоматизации и электротехники СО РАН

Адрес: 630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 1

Телефон:(3832)333-630 E-mail: bsd@iae.nsk.su

## Synthesis of virtual environment with object-space recursive subdivision

Sergei I.Vyatkin, Boris S.Dolgovesov,  
Sergei E. Chizik

We present a method for the generation of photo-realistic images of 3D-terrain datasets by mapping a digital aerial photographs on a perspective projection of a digital elevation map. In our method we depart from traditional techniques of defining and processing geometrical primitives, since there are problems which cannot be solved simply by brute-force approach.

We suggest to expand the notion of primitives and make it possible to process them by easy and effective method without approximation by polygons. We present a new representation scheme for freeform surfaces - it is possible to combine basic surface and shape-driving functions.

As a result of application of the 3D space subdivision algorithm the possibility appear to render surfaces which consist of huge amount of polygons