

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
СИНТЕЗА ВИЗУАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКИ

УДК 681.3.06

И. В. Белаго, Ю. Ю. Некрасов, А. В. Романовский, Ю. В. Тарасов
(Новосибирск)

КОМПЛЕКС ТРЕХМЕРНОГО ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
SOFTLAB IMAGES 1.1

Описывается структура программного комплекса трехмерного визуального моделирования. Приводится неформальное определение основных параметров визуальной модели. Коротко обсуждаются общие проблемы трехмерной компьютерной графики, связанные с созданием (моделирование), модификацией (анимация) и графическим выводом (отображение) визуальных моделей.

Введение. В настоящее время в нашей стране, наконец-то, появилась возможность говорить о широком применении систем трехмерной компьютерной графики. Главными областями использования таких систем, по-видимому, являются тренажеростроение, машиностроительное проектирование, видеореклама. Постепенно к компьютерной графике начинают проявлять все больший интерес специалисты в области архитектуры, медицины, обучения, информатики. Значительную роль в этом процессе сыграло бурное внедрение персональных компьютеров, которое привело к определенной стандартизации вычислительных средств. Международная конференция «Графикон 92» еще раз доказала, что трехмерная компьютерная графика теперь уже не рассматривается лишь как некоторый экзотический вид компьютерного искусства, а все более играет роль доступного и общепользуемого инструмента. Мы надеемся, что не за горами то время, когда системы компьютерной графики займут такое же место, как, например, текстовые редакторы или интегрированные языковые среды. Развитие систем multimedia [1, 2] позволяет предположить, что компьютерная графика так же, как текстовые и аудиосредства, станет в ближайшие годы неотъемлемой частью любой информационной среды. Приятно осознавать, что отечественные технологии в компьютерной графике смогли выжить под мощным натиском западных пакетов и постепенно пробивают себе дорогу на российском рынке. Введение в силу закона об охране авторских прав на интеллектуальную собственность и некоторое оживление борьбы с программным пиратством, вероятно, будут в какой-то мере способствовать развитию этого процесса.

Целью данной статьи является описание одного из отечественных программных продуктов — комплекса трехмерного визуального моделирования СЛАЙ 1.1 (SoftLab Images 1.1, далее SLI). Комплекс ориентирован, прежде всего, на те области применения, где визуальная модель — цель, а не средство разработки (в отличие, например, от систем автоматизированного проектирования, где венцом творения является моделируемый объект, а визуальная модель служит инструментом для предварительного контроля и визуализации процесса проектирования). Примерами таких областей являются компьютерная мультипликация, тренажерные системы, реклама, видеопродукция, создание компьютерных архивов архитектуры, интерьеров поме-

щений и т. д. Комплекс SLI можно рассматривать как некоторое обобщение опыта ее разработчиков, накопленного при создании программного обеспечения для компьютерных генераторов изображений «Аксай» и «Альбатрос» [3—6], а также электронного видеоманитрона STUDIO 9.0.

Системы «Аксай» и «Альбатрос» используются в авиа- и космических тренажерах в качестве систем синтеза визуальной обстановки реального времени. Это мощные программно-аппаратные комплексы производительностью 1000—4000 потенциально видимых полигонов за полукадр (20 мс) с заливкой по методу GOURAUD. При разработке программного обеспечения для такого рода систем основной акцент смещается в сторону уменьшения накладных расходов при отображении. Нередко это приходится совершать за счет гибкости и универсальности систем моделирования и управления, а также за счет их дружелюбности по отношению к пользователю. Конечный продукт системы моделирования в данном случае — база данных конкретной сцены, которая используется длительное время без каких-либо изменений, что несколько компенсирует затраты на ее разработку. Примером таких баз данных являются модели аэродромов со взлетно-посадочными полосами, светосигнальными установками и подстилающей поверхностью, визуальные модели космических аппаратов, навигационных звездных систем, поверхности Земли и т. д. Управление динамикой изменения сцены, как правило, сводится к модификации на каждом кадре небольшого набора типов данных визуальной модели. Традиционно этот набор включает в себя положение и ориентацию объектов сцены и параметры моделируемой среды (туман, источник освещения, дисперсия). Требования высокой производительности отображающей системы и специализированность вычислительных средств, в свою очередь, приводят к тяготению системы моделирования к созданию в основном статических (т. е. не изменяемых от кадра к кадру) данных, а также к жесткой и малоприспособной для изменений структуре самой базы. Противовесом указанных ограничений является вся прелесть реального времени. В первую очередь это возможность посещения сказочного мира виртуальной реальности, где каждый может создать для себя самые фантастические сюжеты и принять в них непосредственное участие [7, 8].

Другим направлением применения SLI стала покадровая компьютерная анимация, не требующая реального времени отображения в ответ на действия оператора. Такие системы удобны для генерации синтезированных фильмов с заранее определенным сценарием, не допускающим изменений во время воспроизведения. Популярными областями применения систем покадровой анимации являются, например, кино- и видеопродукция, реклама, создание multimedia-иллюстраций. В этом случае обычно используются системы отображения, не требующие дорогостоящего специализированного оборудования, тратящие на построение каждого кадра вплоть до десятков минут, но обладающие большими возможностями с точки зрения динамики и реализма результирующих изображений. Скорость воспроизведения готовых кадров занимает от 20 мс в специализированных системах вывода (например, в электронном видеоманитроне STUDIO 9.0) до нескольких секунд в универсальных ЭВМ. Поэтому процесс отображения, как правило, отделен от процесса воспроизведения. Один кадр полноцветного изображения размером 512×512 пикселей занимает (с учетом прозрачности в каждом пикселе) 1 Мбайт памяти. Для построения и хранения десятисекундного фильма требуется соответственно 250 Мбайт памяти. Это вызвало необходимость разработки специальных алгоритмов компрессии и декомпрессии синтезированных изображений, а также программных и аппаратных средств, реализующих эти алгоритмы. Большое значение приобретают также программные модификаторы двумерных изображений, позволяющие производить постобработку синтезированных фильмов с использованием различных спецэффектов.

Средства отображения комплекса SLI реализованы на двух платформах: IBM PC AT (286, 386, 486) и геометрический процессор ССВО «Альбатрос».

Постановка задачи. Рассмотрим некоторую реальную или гипотетическую систему, включающую в себя следующие компоненты: а) сцена, состоя-

щая из множества твердых трехмерных объектов, обладающих определенным набором визуальных характеристик; б) множество расположенных в трехмерном пространстве окон наблюдения, через которые можно увидеть объекты сцены; в) трехмерная «среда», проявляющая себя через воздействие на визуальные свойства объектов сцены.

Будем считать, что поведение системы во времени подчиняется некоторому заранее заданному сценарию, допускающему незапрограммированное воздействие извне. В самом общем неформальном виде задача трехмерного визуального моделирования сводится к построению для каждого из окон наблюдения серии изображений, соответствующих фазам развития сценария с учетом произведенных воздействий.

Выделяются два подхода к решению этой задачи.

1. Строится дискретная имитационная модель системы [9], описывающая эволюцию ее состояний в процессе продвижения по шкале системного времени. Описание модели при помощи имитационного языка переводится в форму программы, исполняемой на ЭВМ. Результатом работы программы являются сформированные на каком-либо выходном устройстве последовательности изображений, соответствующие дискретам системного времени (кадрам). Статическая (т. е. не изменяемая во времени) информация о системе, как правило, явно не отделяется от динамической, а этап построения изображений не отделен от этапа моделирования. По этому принципу построены многие визуальные языки [10, 11]. Такой подход наиболее удобен в тех случаях, когда неопределенность сценария, выраженная в воздействиях на систему извне, очень мала, например, при создании компьютерного фильма или при визуализации заранее известного поведения физической системы. Достоинством подхода является то, что в модели задана полная информация об объектах, включающая их поведение и «время жизни». Например, при моделировании салюта пользователь описывает все фазы изменения цвета и положения звездочек от момента выстрела и до полного исчезновения последней звезды, а также задает момент времени выстрела.

2. Происходит разделение процесса моделирования на три независимых этапа: а) построение статической модели системы с выделением динамических данных в качестве ее параметров; б) построение дискретной имитационной модели поведения параметров системы на основе заданного сценария; в) отображение (т. е. вывод на экран или другое выходное устройство видов сцены для всех окон наблюдения) на каждом кадре статической модели с заданными моделью поведения значениями параметров.

На этапе «а» при помощи выбранных средств моделирования (редактор сцен, язык моделирования, прикладные программы) статическая модель переводится в форму базы данных с выделенными для управления параметрами. На этом этапе, например, может быть задана форма вертолета и подстилающей поверхности, а также выделены для динамического управления параметры его положения в мировой системе координат и положение винтов в системе координат вертолета.

На этапе «б» производится реализация модели поведения в виде анимационной программы, обычно ориентированной на исполнение в реальном времени. В процессе исполнения анимационная программа может принимать параметры извне и транслировать их в текущие значения параметров статической модели. В примере с вертолетом анимационной программой может быть задано вращение винтов, а от пульта оператора могут приниматься параметры движения самого вертолета.

На этапе «в» программа отображения кадра за кадром принимает текущие значения параметров системы от анимационной программы и, пользуясь информацией из базы данных, производит построение очередного набора изображений, например, принимает параметры движения вертолета и его винтов и создает изображение подстилающей поверхности для летчика и вид с земли на вертолет для инструктора.

Привлекательность реализации второго подхода состоит в том, что она, во-первых, легко поддается оптимизации за счет явного выделения статичес-

кой информации, а во-вторых, достаточно просто подчиняется конвейеризации при отображении. На этом подходе базируются, как правило, интерактивные системы трехмерного визуального моделирования, а также системы реального времени для тренажеров, в которых конкретная база данных может использоваться многократно с различными анимационными программами. Комплекс SLI, являясь базовым программным обеспечением ССВ реального времени, реализован на базе второго подхода. Ниже мы перечислим основные возможности комплекса, в терминах которых производится моделирование. ная функция мигания и номер выключателя (управляемая извне логическая переменная).

Линия представляет собой ломаную, проходящую через заданный список вершин. Параметрами линии являются цвет и интенсивность, которые могут быть заданы в каждой вершине. Линия применяется как вырожденный случай вытянутой грани для моделирования проводов, мачт, швов в поверхностях и т. д.

Грань — это видимый с одной стороны плоский выпуклый многоугольник. Грани являются базовым средством имитации поверхностей. Средства моделирования комплекса предоставляют пользователю возможность оперировать такими понятиями, как списки вершин и моделирующие функции. Моделирующие функции позволяют строить различные аналитические поверхности, опирающиеся на заданный список (списки) вершин. Примерами моделирующих функций являются произвольный (возможно, невыпуклый) многоугольник, поверхность вращения, выпуклая оболочка, поверхность Безье и т. д. Допускаются эйлеровские операции между поверхностями.

Системы координат. Каждый из моделируемых объектов жестко связывается с некоторым подпространством, заданным трехмерной декартовой системой координат. Системы координат могут быть вложены друг в друга, образуя дерево систем координат сцены. Система координат является базовым типом данных в моделирующих средствах комплекса. Значения этого типа представляются ссылкой на объемлющую систему координат (она называется базисом) и матрицей преобразования из данной системы в объемлющую. Изменяя матрицу преобразования во времени, можно перемещать систему координат и соответственно связанные с ней объекты относительно базиса. Кроме того, допускается менять ссылки на объемлющие системы координат, переопределяя тем самым базис, относительно которого производится движение. Так, например, система координат вертолета может ссылаться на мировую систему координат во время его полета, а после посадки на движущийся ледокол поменять ссылку на систему координат ледокола. В результате вертолет будет двигаться совместно с ледоколом без изменения матрицы преобразования собственной системы координат.

Визуальные характеристики поверхностей. Для имитации различных материалов, из которых сделаны объекты сцены, в моделирующих средствах комплекса используется достаточно широкий набор визуальных характеристик. К этому набору относятся цвет, заданный в системе (R, G, B) , интенсивность цвета, параметры прозрачности, бликования и текстуры. Прозрачность поверхности задается тремя параметрами: T_f, T_0, N , где T_f — значение прозрачности в случае, когда векторы градиента к поверхности и направления взгляда наблюдателя противоположны по знаку (наблюдатель смотрит прямо на поверхность); T_0 — значение прозрачности, когда указанные векторы ортогональны (наблюдатель смотрит вдоль поверхности); N — показатель степени функции от косинуса угла между этими векторами. Последний параметр определяет «скорость перехода» от первого значения прозрачности ко второму

при соответствующем повороте поверхности. Тескущая прозрачность поверхности в заданной точке при отображении вычисляется по формуле

$$T_{\text{сир}} = (T_f - T_0)(1 - |\cos A| ** N) + T_0.$$

Такой подход удобно применять при моделировании как полых стеклянных объектов, например остекление кабины самолета (значение первого параметра 0., второго — 1., а третьего, например, — 5), так и лучей прожекторов или выхлопов пламени (например, 1., 0., 1).

Параметрами бликования поверхности являются коэффициент зеркального отражения и степень зеркальности. Коэффициент зеркального отражения задает вес цвета источника при появлении блика на поверхности, а степень зеркальности является характеристикой площади блика. При помощи параметров бликования моделируется шероховатость поверхности. Например, для имитации металлических объектов следует использовать близкие к максимальным значения параметров, а для объектов из мела наоборот.

Текстуры параметры поверхности определяют индекс текстурной карты и тип ее использования. Текстура применяется в тех случаях, когда присутствует значительная неоднородность визуальных свойств объекта вдоль его поверхности и ее неудобно или невозможно моделировать при помощи наборов граней с различными визуальными характеристиками. Примерами таких объектов может быть рельеф местности, зимний узор на стекле, лунные кратеры и т. д. Более подробно о типах текстур будет сообщено далее.

Часть визуальных характеристик может быть задана в вершинах граней, составляющих поверхность объекта. К ним относятся цвет, интенсивность цвета, прозрачность. При отображении происходит интерполяция значений соответствующих параметров вдоль плоскости грани. Важнейшим параметром в вершине грани является вектор нормали. Вектор нормали задает градиент аппроксимируемой поверхности в данной точке, что позволяет достичь эффекта визуальной «гладкости» поверхности моделируемого объекта. Программа отображения в зависимости от выбранной модели освещенности (GOURAUD или PHONG) либо: а) рассчитывает интенсивности в вершинах граней с учетом направлений источников освещения и вектора нормали; б) методом линейной интерполяции получает значение интенсивности в заданной точке (GOURAUD), либо: а) путем интерполяции нормалей получает значение нормали в заданной точке; б) рассчитывает интенсивность в заданной точке с учетом направлений вычисленного значения нормали и источников освещения (PHONG).

Кроме перечисленных характеристик, в каждой вершине грани могут быть заданы ее координаты в текстурной плоскости, что позволяет осуществлять привязку текстурной карты к поверхности объекта.

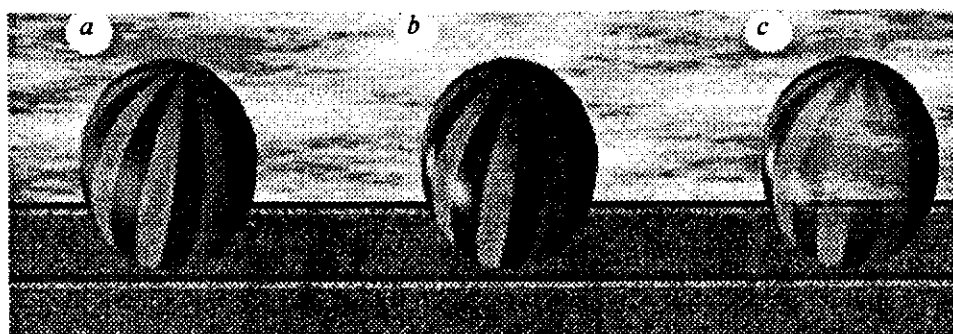


Рис. 1. Визуальные характеристики объектов:

a — коэффициент зеркального отражения 0,3; степень зеркальности 0,2; *b* — коэффициент зеркального отражения 0,9; степень зеркальности 0,6; *c* — коэффициент зеркального отражения 0,9; степень зеркальности 0,6; прозрачность:

$$T_f = 0,9, T_0 = 0, N = 1$$

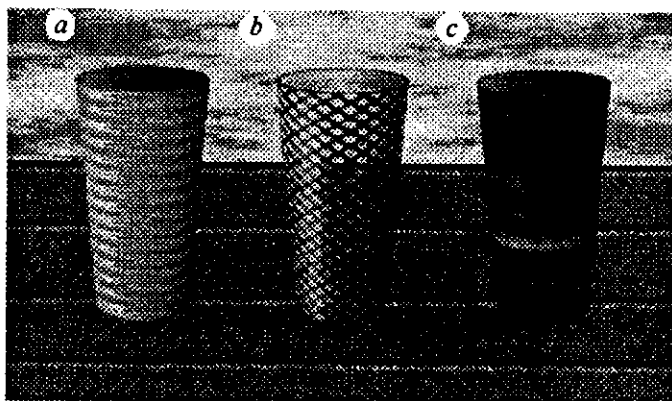


Рис. 2. Использование текстуры (геометрия одинакова):

a — тип В (отклонения нормалей); *b* — тип IT (прозрачность и интенсивность); *c* — тип С (цвет)

Текстура. Алгоритмы двумерного текстурирования позволяют задавать распределение визуальных свойств моделируемых объектов вдоль их поверхности при помощи двумерных массивов значений соответствующих визуальных характеристик.

Метод отображения текстурированных поверхностей, используемых комплексом SLI, изложен в [12]. Мы же остановимся более подробно на методах интерпретации текстурных карт. Двумерная текстурная карта в общем случае представляет собой набор плоских полутоновых изображений одинаковой размерности, каждое из которых называется слоем. Комплекс SLI допускает применение текстурных карт с количеством слоев от 1 до 4 и размерностями от 16×16 до 512×512 текселов (элементов текстурной карты). Каждый тексел в зависимости от количества слоев может задаваться 8, 16, 24 или 32 битами. Метод интерпретации текстурной карты при отображении зависит от заданного в модели типа ее использования. Одну и ту же текстурную карту можно интерпретировать по-разному для разных объектов сцены. В комплексе SLI текстурными картами могут задаваться следующие визуальные характеристики:

- тип I — интенсивность (размер тексела 8 бит);
- C — цвет (24 бита);
- M — коэффициент смеси двух цветов (8 бит);
- T — прозрачность (8 бит);
- B — три угла отклонения нормали (24 бита).

Исходя из ограничения на количество слоев, получаем, что, кроме перечисленных пяти типов использования текстурной карты, могут быть заданы еще 10 их комбинаций: ITM, IT, IM, TM, CI, CM, CT, BI, BM, BT.

Важным свойством применения текстуры является возможность привязки вершин граней к текстурной плоскости с учетом динамически изменяемого матричного преобразования, что позволяет осуществлять движение текстурного рисунка вдоль поверхности моделируемого объекта. Введение эффекта бегущей текстуры существенно расширяет возможности комплекса в части имитации подвижных зеркальных объектов, водных поверхностей, течения жидкостей, бега облаков, вращения Земли и т. д.

Визуальные эффекты. Комплекс SLI обладает набором визуальных эффектов, которые, с одной стороны, позволяют повысить степень реализма моделируемых сцен, а с другой — предоставляют пользователю ряд специальных средств для реализации приемов кинематографии. К визуальным эффектам относятся управляемые пользователем эффекты плавного проявления и исчезновения объектов (fade in, fade out), трехмерная покадровая анимация, имитация воздействия среды. Визуальные эффекты могут применяться как к отдельным объектам сцены, так и ко всей сцене сразу.

.....

Fade-эффекты производятся за счет присвоения набору объектов сцены единого множителя непрозрачности. При увеличении множителя от 0 до 1 объекты плавно проявляются из фона, а при уменьшении от 1 до 0 — исчезают. Используя два множителя одновременно, можно, например, добиться эффекта плавного перехода от одного набора объектов к другому (переход через прозрачность).

Трехмерная покадровая анимация является расширением традиционной "cartoon"-анимации в трехмерное пространство. Аналогично традиционной анимации строится последовательность фаз изменения объекта, а затем эти фазы последовательно отображаются. Количество требуемых фаз можно существенно сократить за счет использования перехода через прозрачность. Покадровая анимация обычно применяется для тех изменений формы моделируемых объектов, которые не подчиняются матричным преобразованиям (например, для имитации взрывов, пламени свечи, сгибания трубы и т. д.).

Воздействия среды на визуальные свойства моделируемых объектов имитируются при помощи управления такими характеристиками, как дисперсия, туман и источники освещения.

Параметрами тумана являются его цвет и дальность видимости. При помощи тумана имитируются плавный переход между землей и небом вдоль линии горизонта, проход через облачный слой при взлете и посадке, слой атмосферы над поверхностью земли при наблюдении с орбиты и т. д. Имитация тумана — эффективное средство для достижения визуальной глубины изображения сцены.

Источники освещения могут быть бесконечно- и конечно-удаленными, характеризоваться цветом и направлением свечения. Конечно-удаленные источники могут, кроме того, задаваться своим положением в пространстве, ограничением дальности и конуса действия. Источники освещения могут имитировать свет солнца, настольной лампы, фар движущегося автомобиля и т. д.

Дисперсия определяет освещенность объектов вне прямого действия источников освещения. Так, например, при имитации сумерек используются значения, близкие к 1, что приводит к очень малым различиям между интенсивностью цвета объекта с освещенной и неосвещенной стороны. Для достижения эффекта безвоздушного космического пространства или ночного лунного освещения, наоборот, используются значения дисперсии, близкие к нулю.

Параметры окон наблюдения. Параметры окон наблюдения, с одной стороны, задают характеристики наблюдателя, находящегося в трехмерном пространстве, а с другой — характеристики окна устройства графического вывода.

К первым относятся: система координат, с которой жестко связан наблюдатель, параметры пирамиды видимости и степень детальности отображения моделей объектов, попавших в пирамиду видимости.

Ко вторым относятся: габариты и расположение окна на экране, а также цвет и прозрачность фона. Прозрачность фона используется при отображении поверх уже существующего изображения, например, при наложении окон наблюдения друг на друга или подмешивании фона от внешних формирователей изображений — видеоматрицы, TV-камеры, другой синтезирующей системы. Количество окон наблюдения не ограничено. Изображения, полученные в процессе отображения сцены для какого-либо из наблюдателей, могут использоваться в качестве текстурных карт на последующих кадрах, создавая эффект живой поверхности.

Удаление невидимых поверхностей. Проблема удаления невидимых поверхностей возникает в тех случаях, когда при отображении одна поверхность частично или полностью закрывает другую в окне наблюдения. Так как производительность программы отображения играет главную роль в решении практических задач, то для удаления невидимых поверхностей был выбран метод, ориентированный на обработку заранее пространственно отсортированных последовательностей граней.

Алгоритмы статической пространственной сортировки позволяют за счет односторонней видимости граней статически переставить их так, чтобы при любом положении наблюдателя порядок обработки граней соответствовал порядку их потенциального закрывания друг другом. Порядок следования граней от ближних к дальним относительно положения наблюдателя называется прямым приоритетным порядком. В этом случае грани, попавшие на обработку первыми, не могут перекрыться последующими гранями. При обратном приоритетном порядке (от дальних к ближним) каждая последующая грань потенциально закрывает предыдущую. Приоритетные системы отображения удаляют невидимые части поверхностей либо путем последовательного наложения (при обратном приоритетном порядке), либо за счет пометки уже занятых пикселей (при прямом приоритетном порядке).

Алгоритм статической сортировки не работает, если несколько граней В этом случае используется ориентированная плоскость, которая делит пространство вместе с расположенными в ней гранями на два полупространства: над плоскостью и под плоскостью относительно ее нормали. Если алгоритм отображения ориентирован на обратный приоритетный порядок, то разделяющая плоскость подбирается так, чтобы грани полупространства, в котором в данный момент находится наблюдатель, никогда не закрывали граней оставшегося полупространства. Программа отображения при построении вида сцены для очередного окна наблюдения определяет, в каком полупространстве находится наблюдатель, и вначале обрабатывает грани этого полупространства, а затем — оставшегося. В случае прямого приоритетного порядка последовательность обработки инвертируется. Если невозможно подобрать разделяющую плоскость так, чтобы она не пересекала ни одну из граней, то допускается «разрез» граней плоскостью. При наличии циклов граней в полупространствах алгоритм поиска разделяющей плоскости рекурсивно повторяется. Таким образом строится бинарное дерево разделяющих плоскостей. Это дерево формируется независимо от дерева систем координат и соответственно не оказывает никакого влияния на связи между объектами по движению.

Существуют различные стратегии подбора разделяющих плоскостей. Одна из них приведена в [13]. Комплекс SLI предоставляет пользователю возможности как ручной, так и автоматической сортировки граней и расстановки разделяющих плоскостей.

Приведенный выше алгоритм динамического упорядочивания граней гарантирует правильное удаление невидимых поверхностей, если по сценарию может двигаться только наблюдатель. При наличии подвижных объектов пользователю предоставляются средства анимационной программы для упорядочивания объектов в зависимости от конкретного сценария их поведения. К таким средствам относятся динамическое управление параметрами разделяющих плоскостей и возможность явного указания порядка обработки объектов на данном кадре.

Методы оптимизации. При выбранном подходе к решению задачи трехмерного визуального моделирования наиболее трудоемкой является фаза отображения. В связи с этим оптимизация процесса моделирования сводится к максимально возможному уменьшению количества операций, выполняемых на данном этапе. Основные методы оптимизации:

1. Уменьшение общего количества граней, линий и огней в базе данных, что достигается за счет искусства разработчика баз данных в сохранении оптимального баланса между реалистичностью изображений моделируемых объектов и необходимым количеством граней, линий и огней, используемых для представления этих объектов.

2. Уменьшение общего количества динамических матричных преобразований, что достигается автоматическим уничтожением статических систем координат за счет перевода в базисные системы подчиненных им объектов и вычислением значений статических векторно-матричных выражений на этапе построения базы данных.

3. Представление объектов различными уровнями детальности и автоматический выбор необходимого уровня на этапе отображения. Средства моделирования комплекса позволяют связывать с объектом динамическую функцию его прозрачности в зависимости от расстояния до наблюдателя. Например, при моделировании здания можно на достаточно большом расстоянии до наблюдателя представлять его кубиком, затем по мере приближения плавно проявить окна, рисунок кирпичной кладки и, наконец, неровности самих кирпичей. Если расстояние до наблюдателя настолько велико, что объект слишком мал из-за перспективы или скрывается туманом, то его можно вообще не отображать, установив значение прозрачности для этого расстояния равным 1 (полная прозрачность).

4. Отбраковка на ранней стадии отображения объектов, по каким-либо причинам не видимых наблюдателю. Для реализации этой операции пользователю предоставляется возможность условного моделирования и набор булевских динамических функций, задающих условия отбраковки. Примерами подобных условий могут быть следующие: а) попадает ли сфера (объединение, пересечение сфер), ограничивающая объект, в пирамиду видимости текущего наблюдателя; б) нужно ли отображать объект для данного наблюдателя; в) нужно ли отображать объект, если текущий наблюдатель выше заданной плоскости (набора плоскостей, хотя бы одной плоскости из набора); г) закрывает ли сфера (объединение, пересечение сфер), вписанная в объект 1, сферу (объединение, пересечение сфер), ограничивающую объект 2.

Например, если ограничить здание набором из шести плоскостей, то можно, используя функцию «в», отображать либо интерьер, либо улицу в зависимости от того, где находится наблюдатель: внутри здания или снаружи. То же самое можно проделать и с каждым этажом или даже комнатой в здании. Здания в городе следует также ограничить сферами (комплекс позволяет выполнить это автоматически), чтобы при проезде по улице на обработку подавались только те здания, которые попали в пирамиду видимости наблюдателя. С частью зданий можно связать вписанные сферы, чтобы при помощи функции «г» отбраковать кварталы, которые такие здания закрывают. Если сюжет включает в себя два окна наблюдения: вид из окна автомобиля и вид на приборную доску, то при помощи функции «б» можно отбраковывать информацию о приборах для первого окна и информацию о зданиях — для второго.

Структура комплекса. Комплекс SLI включает в себя следующие системы: подготовки визуальных моделей трехмерных сцен, управления динамикой поведения моделируемых объектов, отображения визуальных сцен, редактирования кадров.

Система подготовки визуальных моделей служит для автоматизации процесса моделирования трехмерных визуальных сцен и состоит из следующих основных компонентов:

1. Программа ввода трехмерной информации с плоских носителей (чертежи, карты, схемы, фотографии). Позволяет производить преобразование информации о форме объекта, заданной в виде изображений его проекций, в набор последовательностей трехмерных векторов, который в дальнейшем может быть использован при создании визуальной модели языковыми и интерактивными средствами комплекса.

2. Базовый язык описания визуальных моделей [14, 15]. Является основным инструментом для создания баз данных. Терминология описания языка дает пользователю возможность моделировать непосредственно в трехмерном пространстве, абстрагируясь от механики получения изображений. Моделирование объектов производится привычными средствами традиционных языков программирования. Средства языка позволяют создавать описания моделей объектов наиболее оптимальным образом с точки зрения производитель-

ности системы отображения. Переменные большинства из встроенных типов языка могут экспортироваться в систему управления динамикой и изменять свои значения от кадра к кадру.

3. Язык геометрического моделирования [16, 17]. Предназначен для описания объектов, форма которых может быть задана аналитически. Язык позволяет конструировать поверхности объектов по заданным в программе или полученным из подсистемы ввода последовательностям списков вершин, опираясь на встроенные функции типа полигон, поверхность вращения, поверхность Безье, «протягивание сечения по контуру», выпуклая оболочка. Над поверхностями могут быть произведены теоретико-множественные операции конкатенации, объединения, пересечения, вычитания.

4. Интерактивный геометрический редактор. Применяется для интерактивного создания моделей сцен как в виде библиотек, так и в виде исполняемой программы. Позволяет также модифицировать модели, созданные другими средствами комплекса, и информацию, полученную из подсистемы ввода. Редактор достаточно прост в управлении для того, чтобы его мог использовать неквалифицированный пользователь. Обладает собственной системой отображения, позволяющей предьявлять реберные и полигональные изображения проекций объектов в процессе их моделирования.

5. Интерактивный редактор для моделирования рельефа местности. Используется для интерактивного создания и редактирования моделей рельефа местности. Допускает применение в качестве исходной информации как регулярных матриц высот, так и изолиний поверхности. Производит оптимизацию по объему программы, используя критерии сгущения полигональной сети по линиям перегибов.

6. Пакет программ алгоритмической обработки моделей. Обеспечивает статическую пространственную сортировку моделей, генерацию габаритных сфер, теоретико-множественные операции над моделями объектов и их плоские разрезы, сглаживание поверхностей за счет расстановки нормалей в вершинах, документирование базы данных.

7. Сборщик базы данных. Завершает процесс построения статической модели сцены. Создает базу данных из отдельных модулей, полученных в результате работы перечисленных выше компонентов системы подготовки. В процессе сборки разрешаются межмодульные внешние ссылки, строятся специальные структуры, обеспечивающие доступ к анимационным переменным, производится преобразование описания моделей в удобный для быстрого отображения формат.

Система управления динамикой предназначена для создания анимационных программ, описывающих сценарий «поведения» динамических параметров моделируемой системы (анимационных переменных) во времени. В качестве таких параметров могут быть выбраны визуальные и геометрические характеристики объектов, параметры окон наблюдения, свойства среды и т. д. Анимационные программы генерируют траектории состояний моделируемой

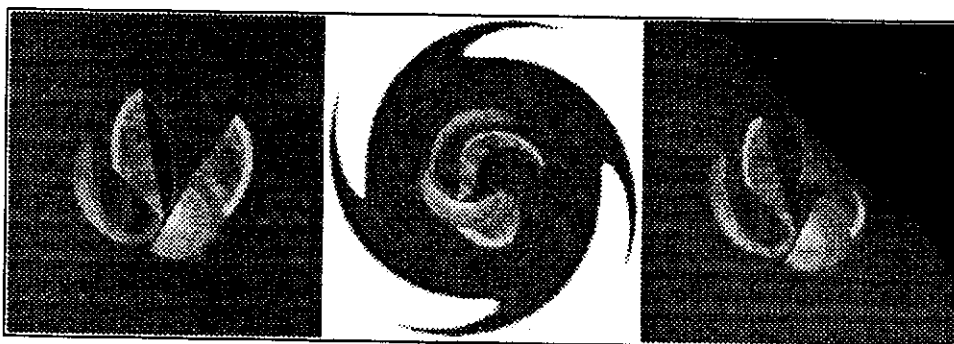


Рис. 3. Пример редактирования кадра

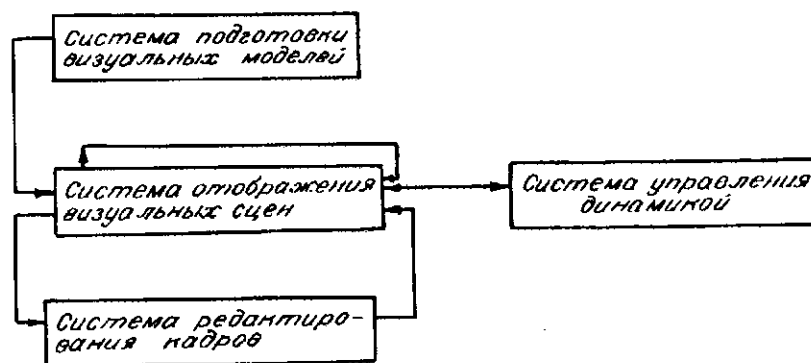


Рис. 4. Взаимодействие компонентов комплекса

системы на каждом кадре в соответствии с заданным сценарием. Система управления динамикой представляет собой процессно-ориентированное библиотечное расширение универсального языка высокого уровня Модуля 2. Система дает возможность пользователю описывать параллельно исполняемые процессы и синхронизировать их исполнение во времени.

Система отображения предназначена для построения цветных полутонных изображений, являющихся видами сцен при соответствующих значениях анимационных переменных. Система многооконна, ориентирована на построение серий изображений, может работать как в режиме диалога с пользователем, так и в режиме интерпретации траектории. В режиме диалога она способна сохранять введенные пользователем значения анимационных переменных в виде последовательных фаз траектории, в режиме интерпретации позволяет сжимать полученные изображения для их хранения и последующего использования. При отображении допускаются сверхбыстрый (до 50000 полигонов в секунду на РС АТ 486(33)) предварительный просмотр сцены в реберном виде, использование модели освещенности Гуро (Gougaud), Фонга (Phong), высококачественная фильтрация, генерация фильмов для просмотра с частотой 25 и 50 кадров в секунду.

Система редактирования кадров служит для создания и редактирования изображений, используемых в качестве фона, текстур поверхностей моделируемых объектов, самостоятельных кадров, а также для распознавания и векторизации изображений объектов в целях облегчения процесса моделирования. Система включает в себя растровый и векторный редакторы, генераторы текстурных карт, транскодер стандартных форматов, архиватор и трансформер изображений (масштабирование, преобразование в grey scale, переходы через мозаику, резиновый экран и т. д.).

Заключение. За более чем двухлетний период эксплуатации комплекс SoftLab Images 1.1 доказал свою практическую пригодность в большинстве перечисленных во введении приложений. Одновременно с этим выявился ряд недостатков комплекса. К ним, прежде всего, относятся недостаточная ориентированность на неквалифицированного пользователя, иерархические методы построения моделирующих программ, отсутствие возможностей динамической пространственной сортировки и некоторые другие. В настоящее время проходит опытную эксплуатацию новая версия комплекса (Softlab Images 2.0), в которой авторы попытались существенно расширить его возможности и преодолеть недостатки предыдущей версии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новосельцев С. Мультимедиа — синтез трех стихий // Компьютер Пресс.—1991.—№ 7, 8.
2. Новосельцев С. Мультимедиа-91: достижения, тенденции, рынок // Компьютер Пресс.—1992.—№ 7, 8.
3. Ковалев А. М., Талныкин Э. А. Машинный синтез визуальной обстановки // Автометрия.—1984.—№ 4.

4. Гусев А. Б., Иващин С. Л., Талныкин Э. А. Математические модели сцен в синтезирующих системах визуализации реального времени // Автометрия.—1985.—№ 4.
5. Гусев А. В., Иващин С. Л., Иоффе А. В., Талныкин Э. А. Программные компоненты синтезирующих систем визуализации // Автометрия.—1986.—№ 4.
6. Талныкин Э. А. Структура локальной базы данных и организация геометрических преобразований в синтезирующей системе визуализации реального времени // Автометрия.—1987.—№ 3.
7. Уокер Дж. Киберпространство: прорыв за границы реальности // Мир САПР.—1990
8. Галликсен Э., Уолсер Р., Гелбанд П. Киберпространство — программирование впечатлений // Там же.
9. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ 2.—М.: Мир, 1987.
10. Magnelat-Thalman N., Magnelat-Thalman D. Procedural animation blocks in discrete simulation // Simulation.—1987.—49, N 9.
11. Reynolds D., Craig W. Computer animation with script and actors // Comput. Graph.—1982.—16, N 3.
12. Ковалев А. М., Тарасов Ю. В. Текстура на произвольно ориентированных плоских поверхностях // Автометрия.—1988.—№ 6.
13. Гусев А. В., Романовский А. В. Пространственная сортировка трехмерных объектов // Автометрия.—1989.—№ 2.
14. Белого И. В., Романовский А. В., Тарасов Ю. В. SDL — язык описания визуальных моделей трехмерных сцен // Автометрия.—1993.—№ 5.
15. Белого И. В., Тарасов Ю. В., Романовский А. В. Комплекс трехмерного визуального моделирования SoftLab Images 1.1. Базовый язык.—Новосибирск, 1993.—(Препр. /СО РАН. ИАиЭ; 477).
16. Романовский А. В. vml — язык описания геометрических моделей трехмерных сцен для синтезирующих систем визуализации // Автометрия.—1993.—№ 5.
17. Романовский А. В. Комплекс трехмерного визуального моделирования SoftLab Images 1.1. Язык геометрического моделирования.—Новосибирск, 1993.—(Препр. /СО РАН. ИАиЭ; 478).

Поступила в редакцию 10 июня 1993 г.