

## Система визуализации «GLView» для имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения\*

*М.В. Михайлюк, М.А. Торгашев*

*mix@niisi.ras.ru|mtorg@mail.ru*

Москва, Россия, Научно-исследовательский институт системных исследований РАН

*В статье описывается архитектура и основные возможности системы визуализации трехмерных виртуальных сцен «GLView» в масштабе реального времени в моно и стерео режимах. Эта система может использоваться в моделирующих и имитационно-тренажерных комплексах управления сложными динамическими процессами, системах виртуального окружения, виртуальных лабораториях, мультимедийных руководствах и других областях.*

**Ключевые слова:** *визуализация, тренажеры, виртуальная реальность, реальное время*

## The System of Visualization «GLView» for Simulators and Virtual Environment Systems\*

*M. V. Mikhaylyuk, M. A. Torgashev*

*SRISA RAS, Moscow, Russia*

*The article describes the architecture and main features of the «GLView» system of virtual scenes' real-time visualization in the mono and stereo modes. This system can be used in simulation-training complexes of dynamic processes modeling, virtual environment systems, virtual labs, multimedia tutorials and other areas.*

**Keywords:** *visualization, training systems, virtual reality, real-time mode*

### Введение

Система «GLView» предназначена для визуализации трехмерных виртуальных сцен в режиме реального времени в моно и стерео режимах. Исходные виртуальные сцены подготавливаются в системе трехмерного моделирования 3D Studio MAX. Система «GLView» поддерживает использование сложных материалов, текстур и источников освещения различного типа, попершинный и попиксельный расчет освещенности, ключевую анимацию с набором различных контроллеров интерполяции, морфинг (деформацию) объектов, скелетную анимацию и т.д. Важной особенностью системы является то, что вид и движение объектов в ней в точности совпадает с тем, как их подготовил дизайнер в системе моделирования 3D Studio MAX. Кроме того, обеспечивается управление объектами, камерами и источниками света как от стандартных средств (клавиатура, мышь, джойстик), так и по сети от моделирующего комплекса с помощью специального протокола. Это позволяет использовать систему как составную часть сложных программно-аппаратных комплексов. В «GLView» реализованы также дополнительные возможности, такие как многопортовая и мультискранный визуализация, эффекты постобработки, объемные динамические эффекты, системы частиц различного типа и т.д. Режим стерео поддерживается для широкого спектра устройств стерео отображения: с использованием анаглифических,

затворных и поляризационных очков, а также шлемов виртуальной реальности и автостереоскопических мониторов. Система может использоваться независимо для просмотра моделей 3D Studio MAX, а также подключаться в виде библиотеки DLL к другим программным комплексам. Области использования системы визуализации могут быть имитационно-тренажерные комплексы управления сложными динамическими системами, системы виртуального окружения, виртуальные лаборатории, мультимедийные руководства и другие области, в которых требуется визуализация трехмерных сцен в реальном режиме времени.

Система «GLView» успешно апробирована и эксплуатируется в ряде организаций, к числу которых относится Российский государственный научно-исследовательский испытательный Центр подготовки космонавтов им. Ю.А.Гагарина, ОАО РКК «Энергия», МГТУ им. Н.Э.Баумана и др. В статье рассматриваются архитектура, основные возможности и особенности реализации системы визуализации «GLView».

### Архитектура системы

Трехмерные виртуальные сцены подготавливаются в системе моделирования 3D Studio MAX и затем конвертируются в формат системы «GLView». Конвертирование осуществляется с помощью специально разработанного программного модуля (так называемого «плагины»), подключаемого к 3D Studio MAX. Результат конвертирования записывается в файловый архив, содержащий как сами

Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-07-20347

объекты трехмерной сцены, так и все текстуры, используемые для ее материалов.

Программные модули системы написаны на объектно-ориентированном языке Visual C++ в среде Windows с использованием графической библиотеки OpenGL. Система работает на персональных компьютерах с общедоступными графическими картами.

В качестве базовой технологии для вывода трехмерной графики используется графическая библиотека OpenGL. Базовые возможности ориентированы на версию 1.2, расширенные возможности визуализации (реализация сложных материалов и дополнительных эффектов визуализации) требуют версии OpenGL 4.2 с поддержкой шейдеров на языке GLSL. Система визуализации имеет модульную структуру, что позволяет наращивать список ее возможностей, а также реализовывать взаимодействие с новыми устройствами управления и вывода (например, с компьютерными перчатками и системами трекинга). Система «GLView» независима от пользовательского интерфейса и реализована в нескольких версиях:

- EXE приложение, выполняющее функции просмотра трехмерных сцен, в котором интерфейс пользователя реализован как надстройка, использующая функции системы визуализации;
- DLL версия, которая интегрируется во внешнее приложение (например, приложение подготовки мультимедийных курсов [1]), взаимодействие с которым осуществляется по согласованному программному интерфейсу;
- ActiveX DLL версия, которая интегрируется в любое приложение, поддерживающее модули ActiveX (например, Internet Explorer, Microsoft Word, PowerPoint и т.д.).

Такой подход позволяет построить произвольный программный комплекс, использующий высококачественную визуализацию трехмерных сцен, с необходимым пользовательским интерфейсом.

## Возможности визуализации

Основными задачами системы «GLView» являются высокое качество визуализации и масштаб реального времени. Качество визуализации зависит от степени подробности геометрической модели объектов сцены, а также качества используемых текстур. Масштаб реального времени означает синтез каждого кадра изображения не более чем за 40 миллисекунд, что обеспечивает частоту 25 кадров в секунду. В настоящее время система «GLView» обеспечивает реальное время визуализации в моно режиме для виртуальных сцен до 4 млн. полигонов, соответственно для стерео режима сцена может содержать до 2 млн. полигонов.

Для правдоподобной имитации визуальных свойств реальных поверхностей поддерживается точное моделирование освещения объектов от множества источников света, а также моделирование таких эффектов, как отражение, зеркальный блеск, микро-рельеф поверхности, тени и многих других [2]. Система визуализации разрабатывалась с целью максимально возможной реалистичности имитации визуальных свойств поверхностей при сохранении режима реального времени синтеза изображений.

Базовой моделью освещения, реализуемой в рамках графики реального времени, является модель освещенности Блинна. Она включает моделирование рассеянной (фоновой) составляющей света, диффузной составляющей, а также моделирование зеркальных бликов. В число учитываемых параметров входят цвета отдельных составляющих материала, параметры блика, прозрачность материала, цвет и яркость источников света, а также коэффициенты затухания светимости в зависимости от расстояния. Вычисление освещенности в системе «GLView» выполняется либо повершинно (закрашивание Гуро), либо попиксельно (закрашивание по Фонгу) с помощью так называемой шейдерной обработки [3]. Такая обработка состоит в использовании не фиксированного, а программируемого графического конвейера - это многократно повышает гибкость работы с графикой и позволяет реализовать не только стандартные, но и более сложные визуальные эффекты.



Рис. 1: Моделирование теней

Примером использования шейдерной технологии также служит реализация теней и освещение объектов сцены фарой. Для моделирования теней используется метод теневых карт (shadow maps). Для получения мягкого контура тени поддерживается фильтрация теней с помощью метода PCF. Одной из известных проблем базовой технологии теневых карт является недостаточность разрешения текстурных карт при моделировании теней на пространных картах при моделировании теней на пространных картах большой протяженности. Это может

приводить к визуальным артефактам в виде пикселизации и ступенчатости границ. Для устранения данной проблемы система «GLView» реализует технологию «каскадных теней» [4] (Cascaded Shadow Maps) с поддержкой до 8 карт на каждый источник света. На рис. 1 показан пример моделирования теней. Кроме параметров освещения очень важными параметрами материалов являются текстуры – двумерные изображения, «накладываемые» на поверхность объектов. Система визуализации «GLView» реализует основные (диффузные) текстуры, текстуры прозрачности, отражения, микро-рельефа (bump map) и карты нормалей (normal map). Для синтеза отражений «GLView» использует два подхода – имитацию плоского зеркала и имитацию отражений с помощью синтеза кубической карты среды. Первый подход применяется для плоских (или близких к плоским) поверхностей, второй подход (более ресурсоемкий) применим к объектам произвольной формы.

**Стереорежим.** Система «GLView» поддерживает технологию отображения сцены в стерео режиме, что в первую очередь направлено на повышение степени вовлечения наблюдателя в виртуальную обстановку. Стереорежим позволяет рассматривать трехмерные образы объектов в наиболее естественном виде, с учетом бинокулярной особенности зрения человека. Ощущение объема виртуальной сцены позволяет более точно понять габариты объектов и их пространственное расположение, что обеспечивает существенно лучшее восприятие синтезируемых визуальных образов. Поддержка стереорежима реализована с использованием нескольких технологий [5]: поляризационной технологии, анаглифа, очков затворного типа, автостереоскопических мониторов, а также с помощью шлемов виртуальной реальности. Основная сложность реализации стереорежима состоит в правильном задании параметров виртуальных камер, образующих стереопару. Для правильного задания параметров виртуальных камер необходимо знать положение наблюдателя, что требует реализации трекинга головы наблюдателя. В рамках системы «GLView» разработан модуль, реализующий оптическую подсистему трекинга с использованием одной видеокамеры и конфигурации из цветных светящихся маркеров [6].

**Многопортовая и мультиэкранная визуализация.** При моделировании сложных динамических систем часто возникает задача имитации специальных средств наблюдения и специальных режимов отображения. В частности, очень актуален и эффективен режим многопортового отображения визуальной обстановки, когда на экран монитора одновременно выводятся изображения с нескольких виртуальных камер (рис. 2). Это позволяет

оператору лучше представить взаимное расположение узлов и механизмов в пространстве и, тем самым, повысить точность и надежность управления. Кроме того, существует необходимость имитации реальных средств наблюдения, основанных на принципе многокамерного отображения.



Рис. 2: Многопортовая визуализация

Мультиэкранная визуализация обычно предполагает, что изображение для каждого экрана формируется отдельным компьютером. Очень важно, чтобы на стыках экранов изображение оставалось непрерывным, т.е. выводилось синхронно. Для создания непрерывного панорамного изображения в системе «GLView» разработана специальная технология синхронизации формирования и вывода на экраны отдельных частей изображения виртуальной сцены. Это обеспечивает синтез непрерывного панорамного изображения на нескольких экранах с помощью нескольких компьютеров в режиме реального времени.

**Эффекты пост-обработки.** Система визуализации «GLView» реализует следующие специальные эффекты, использующие технологию пост-обработки: черно-белый режим, срыв синхронизации, расфокусировку, имитацию глубины резкости, засветку, а также «заплывание» ярких областей при избыточной яркости. Рассматриваемые эффекты, являясь, зачастую, специфическими искажениями наблюдаемого изображения, моделируются искусственно для наиболее точной имитации реальной визуальной обстановки. Черно-белый режим характерен для некоторых используемых и в настоящее время средств наблюдения. Эффект расфокусировки и глубины резкости наблюдается в оптических системах средств наблюдения при трансфокации объектива и изменении расстояния фокусировки. Явления засветки и «заплывания» ярких областей возникают вследствие невозможности компенсации средством наблюдения чрезмерного разброса уровней освещенности наблюдаемой визуальной обстановки, например, при попадании солнца в

кадр объектива. Все рассмотренные эффекты могут применяться как по отдельности, так и в совокупности, при этом значения управляющих параметров могут задаваться либо интерактивно, либо с помощью скриптовых команд. Системой также поддерживается визуализация в расширенном диапазоне яркостей (HDR) с последующей нелинейной тональной компрессией в стандартный диапазон монитора [7].

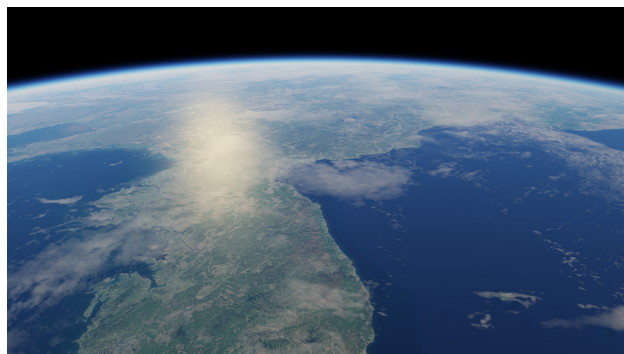


Рис. 3: Визуализация земной поверхности

**Визуализация поверхности Земли.** Во многих практических задачах, связанных с визуализацией, требуется модель поверхности Земли: например, в космических тренажерах для отработки задач наблюдения, ориентации и поиска отдельных объектов или районов, для определения очагов пожаров, для обеспечения необходимого фона при выполнении стыковки и т.д. В системе «GLView» реализована возможность высокореалистичной визуализации поверхности Земли [8] (а также других планет) с текстурным разрешением 150 м/пиксел и выше. В модели поверхности Земли реализован динамический облачный покров, атмосфера, линия терминатора, а также закатное и рассветное освещение (рис. 3). Кроме того, реализован облет модели Земли по кеплеровской эллиптической орбите. Разработанный модуль визуализации планет использует параллельные шейдерные вычисления на современных многоядерных графических процессорах.

**Объемные эффекты.** Одной из важных подзадач визуализации для имитационно-тренажерных комплексов является синтез объемных динамических эффектов. К таким эффектам относятся, в частности, такие процессы, как огонь и дым. В модуле визуализации «GLView» реализовано моделирование объемных эффектов на основе шумовых функций Перлина и их визуализация на основе шейдерной трассировки лучей в режиме реального времени [9]. Визуальные и динамические характеристики эффектов регулируются с помощью пользовательских параметров, позволяющих настроить желаемый вид эффекта и его динамику. Смодели-

рованы процессы распространения и затухания эффекта, а также дополнительное мерцающее освещение сцены от источников огня. Иллюстрация моделирования эффекта огня представлена на рис. 4.



Рис. 4: Моделирование огня

**Системы частиц.** Метод систем частиц широко распространен в компьютерной графике и применяется для моделирования таких эффектов, как, например, струи воды и пены, падающих листьев, а также таких природных явлений, как снег и дождь. Для системы визуализации «GLView» разработан специальный модуль [10], позволяющий моделировать такие системы частиц из 3D Studio Max, как струи, дождь и снег, а также расширенную систему частиц с дополнительными параметрами. Модулем поддерживаются частицы в форме спрайтов с произвольным материалом, а также частицы других форм. Генерация частиц и их визуализация в экранном буфере выполняются полностью на GPU с высокой степенью параллелизма, что позволяет визуализировать в реальном времени системы с количеством частиц до 1 млн. Иллюстрация работы модуля на примере моделирования снега представлена на рис. 5.

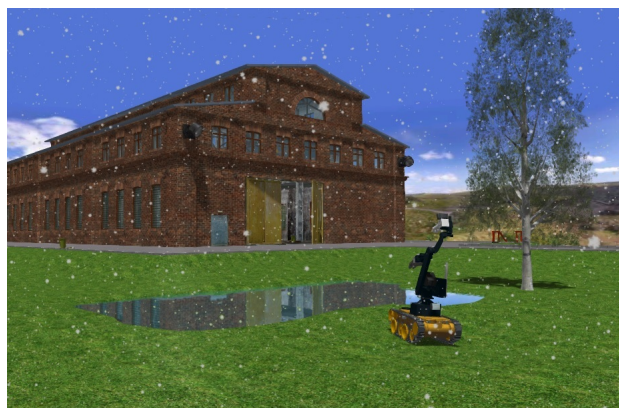


Рис. 5: Моделирование снега с помощью системы частиц

## Анимация и управление

**Анимация элементов сцены.** Анимация объектов виртуальной сцены позволяет задать заранее известное движение объектов. Обычно это относится к неуправляемым объектам, т.е. к объектам, которые не управляются пользователем от клавиатуры, мыши или джойстика и не управляются по сети от моделирующего комплекса. Например, движение виртуальных объектов по фиксированным траекториям, деформация объекта в случае столкновения и т.д. Однако, можно анимировать не только положение и ориентацию объекта или его вершин, но и широкий класс других его параметров (нормали, цвет, текстурные координаты и т.д.), а также параметры камер (положение, направление, угол раствора) и источников освещения (положение, цвет и т.д.).

Базовой для анимации элементов трехмерных сцен является технология «ключевой» анимации. Суть ее состоит в том, что значения анимируемых параметров задаются в определенных (ключевых) кадрах, значения же в промежуточных кадрах вычисляются с помощью интерполяции ближайших ключевых кадров. Функция интерполяции при этом может быть произвольной, например, линейной или сплайновой. В системе «GLView» в рамках технологии ключевой анимации принято понятие «контроллеров», позаимствованное из системы трехмерного моделирования 3D Studio MAX – для каждого типа анимируемых параметров существует набор возможных типов контроллеров, которые и отвечают за получение значения в произвольном кадре на основе ключевых значений. Примерами контроллеров являются линейный, сплайновые по кривым Безье и по TCB сплайнам, а также более сложные (например, контроллер следования по пути). Все контроллеры реализованы в полном соответствии с тем, как они работают в системе 3D Studio MAX. Кроме базовых контроллеров реализована также анимация объектов, моделирующая их сложную деформацию - морфинг объектов и скелетная анимация. Морфинг относится к поверхностным модификаторам и позволяет реализовать сложные деформации виртуальных объектов, моделирующие поведение реальных объектов. С помощью морфинга может быть реализована лицезвая интерактивная анимация, моделирующая эмоции, мимику или речь виртуальных персонажей. Скелетная анимация также относится к модификаторам, работающим поверхностно. Ее идея состоит в задании для объекта каркаса или скелета, представляющего собой систему костей (Bones), чаще всего организованную иерархически. Сам же объект выступает в роли оболочки, «кожи» (Skin) поверх этого скелета. При анимации отдельных костей скелета оболочка повторяет эти движения в той части, где она лежит

поверх данных костей, а в местах сочленений получается плавное сопряжение поверхностей. С помощью скелетной анимации можно реализовать, например, движение человека или антропоморфного робота.

Дополнительно к возможностям анимации, задаваемой системой моделирования, система визуализации «GLView» предоставляет также возможности по регулированию воспроизведения анимационных треков. Анимация отдельных параметров может быть запущена в необходимое время и с нужной скоростью, что позволяет реализовать сложный сценарий поведения сцены в моделируемой динамической обстановке.

**Управление элементами сцены.** Для управления элементами трехмерных сцен в системе визуализации «GLView» предусмотрены два способа – автономное управление с помощью стандартных средств управления, а также внешнее, поступающее от системы моделирования динамики либо по сети, либо через программный интерфейс с того же компьютера.

При автономном управлении пользователю предоставляются возможности удобного управления перемещением выбранного объекта и изменением его ориентации с помощью стандартных средств, включающих клавиатуру, мышь и джойстик. Чувствительность управления и набор управляющих кнопок можно настроить под конкретную задачу в файле конфигурации.

Управление объектами по сети является штатным режимом работы для распределенных имитационно-тренажерных комплексов. В таких системах выделен отдельный моделирующий комплекс, который занимается расчетом динамики объектов сцены и анализом их столкновений. В масштабе реального времени он формирует параметры положения и ориентации всех управляемых объектов сцены. Сформированные данные передаются по сети в систему визуализации «GLView», которая производит синтез изображений виртуальной сцены. Передача осуществляется на основе специального информационного протокола, регламентирующего формат передаваемых данных. Протокол разработан для удобного управления произвольными элементами сцены и реализован как оболочка над стандартным протоколом UDP, входящим в семейство TCP/IP.

К числу немаловажных составляющих в идеологии системы «GLView» относится работа со скриптовыми командами. Скриптовая команда представляет собой совокупность текстовой строки, задающей назначение и тип команды, и связанных с ней данных произвольного формата и размера. Команды могут поступать из текстовых конфигурационных файлов (скриптов), так и формироваться отдельными модулями для передачи ядру системы,

либо другим модулям. Эта схема позволяет организовать эффективный обмен данными произвольного типа. Система визуализации имеет широкий список поддерживаемых команд: системные команды, команды работы с материалами, команды управления узлами сцены, команды конфигурирования управления и т.д.

## Выводы

В работе рассмотрена система визуализации «GLView», ее базовые и расширенные возможности. Рассмотренная система может использоваться в моделирующих и имитационно-тренажерных комплексах управления сложными динамическими процессами, системах виртуального окружения, виртуальных лабораториях, мультимедийных руководствах и других областях, где требуется высококачественная визуализация трехмерных виртуальных сцен в масштабе реального времени.

## Литература

- [1] Решетников В.Н., Торгашев М.А., Хураськин И.А. Система создания и просмотра мультимедийных инструкций // Программные продукты и системы. - 2007. - №3. - С.35-37.
- [2] Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Система «GLView» визуализации для моделирующих комплексов и систем виртуальной реальности // Вестник РАЕН. - 2011. - Т. 11, №2. - С.20-28.
- [3] Мальцев А.В., Михайлюк М.В. Метод высоко реалистичной совмещенной визуализации 3D сцен в реальном времени // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. - 2012. - Т. 2, №2. - С.44-50.
- [4] Мальцев А.В. Моделирование теней в 3D сценах с помощью каскадных теневых карт в режиме реального времени // Информационные технологии и вычислительные системы. - 2014. - №1. - С.46-52.
- [5] Торгашев М.А. Реализация стереорежима в реальном масштабе времени для различных устройств отображения // Программные продукты и системы. - 2010. - №2. - С.23-29.
- [6] Михайлюк М.В., Брагин В.И. Технологии виртуальной реальности в имитационно-тренажерных комплексах подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. - 2013. - № 2(7). - С.82-93.
- [7] Тимохин П.Ю., Торгашев М.А. Визуализация космических сцен в расширенном диапазоне в режиме реального времени // Информационные технологии. - 2014. - №12. - С.53-60.
- [8] Михайлюк М.В., Тимохин П.Ю. Реалистичная модель земли в космических тренажерах // Abstracts of Thirteenth International Seminar on Mathematical Models & Modeling in Laser-plasma Processes & Advanced Science Technologies, Petrovac, Montenegro, 2015. - pp.44.
- [9] Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Синтез объемных динамических эффектов для имитационно-тренажерных комплексов // Информационные технологии и вычислительные системы. - 2014. - №4. - С.44-50.
- [10] Мальцев А.В. Реализация системы частиц в реальном времени на GPU // Программные продукты и системы. - 2014. - №4. - С.57-62.

## Сведения об авторах

Михайлюк Михаил Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,  
Email: mix@niisi.ras.ru

Торгашев Михаил Александрович, к.ф.-м.н., зав. сектором, Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,  
Email: mtorg@mail.ru