

ОБЗОР МЕТОДОВ РЕАЛИСТИЧНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

ПОПОВ А.С.

Рассматриваются современные методы реалистичной визуализации и их применимость для задач интерактивной визуализации. На основании проведенного анализа определяются характеристики, которыми должен обладать метод реалистичной интерактивной визуализации динамических сцен.

1. Введение

Интерактивная визуализация широко применяется во многих отраслях человеческой деятельности, включая авиацию, энергетику, нефтегазовую и химическую промышленность, науку, строительство и архитектуру, рекламу, медицину и геологию. Применение интерактивной визуализации для предварительного моделирования, наглядного отображения виртуальных сред и тренинга персонала позволяет снижать стоимость и риски эксплуатации и внедрения сложных систем. Эффективность творческой деятельности и обучения во многом зависит от адекватности воссоздания виртуальных сред. Несмотря на то, что прогресс компьютерных технологий сделал трехмерную интерактивную визуализацию реальностью, реалистичная интерактивная визуализация остается сложной задачей, не имеющей общего решения.

2. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является решение задачи реалистичной интерактивной визуализации трехмерных динамических сцен.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- проанализировать эффекты глобальной иллюминации и выбрать методы и подходы, которые позволят эффективно их аппроксимировать в интерактивном режиме;
- проанализировать различные виды проекций в целях аппроксимации расчетов распространения света в трехмерной сцене;
- провести анализ уравнения рендеринга (визуализации) в целях эффективной аппроксимации в интерактивном режиме;
- разработать метод интерактивной визуализации глобальных эффектов освещения с учетом особенностей человеческого восприятия:
 - 1) падающий и отраженный свет;
 - 2) тени от неточечных источников света;
 - 3) подповерхностное рассеяние;
 - 4) эффекты среды;

– разработать библиотеку интерактивной визуализации на основе предложенного метода.

3. Постановка проблемы

В связи с наличием комплексной освещенности в окружениях реального мира реалистичная визуализация остается сложной задачей даже для неинтерактивных методов. Сложность возникает из-за того, что на освещение каждой точки изображения влияет энергия всех остальных точек сцены. Рассмотрим сначала транспорт света с одним отражением. Вычисление освещенности каждой точки требует нахождения сложного интеграла:

$$L^r(\vec{x}, \vec{\omega}) = \int_{\Omega} L(\vec{y}, \vec{\omega}) \cdot f_r(\vec{\omega}', \vec{x}, \vec{\omega}) \cdot \cos^+ \theta'_{\vec{x}} \cdot d\omega', \quad (1)$$

где $L^r(\vec{x}, \vec{\omega})$ – выходное излучение в точке \vec{x} , сумма всех излучений со всех направлений $\vec{\omega}'$; $L(\vec{y}, \vec{\omega})$ – излучение точки \vec{y} в направлении $\vec{\omega}$; \vec{y} – точка, видимая из \vec{x} в направлении $-\vec{\omega}$; Ω – направленная полусфера; $f_r(\vec{\omega}', \vec{x}, \vec{\omega})$ – двунаправленная функция распределения отражения/преломления (BRDF); $\theta'_{\vec{x}}$ – угол между нормалью поверхности и направлением $-\vec{\omega}$ в точке \vec{x} .

Сложность заключается в том, что для нахождения точки \vec{y} , видимой в направлении $\vec{\omega}$, как правило требуется некоторая разновидность трассировки луча через всю сцену, что является достаточно дорогостоящей операцией. Для учета множественных отражений интеграл (1) должен быть рекурсивно рассчитан для всех видимых точек \vec{y} , что приводит к вычислению последовательности многомерных интегралов:

$$L^r = \int_{\Omega_1} f_1 \cos^+ \theta'_1 (L^e + \int_{\Omega_2} f_2 \cos^+ \theta'_2 \cdot (L^e \dots) d\omega'_2) d\omega'_1, \quad (2)$$

где L^e – распространяемое излучение.

В связи с указанной сложностью реалистичная визуализация остается уделом неинтерактивных методов, а интерактивные методы продолжают использовать аппроксимации, дающие низкое качество изображения или в значительной степени полагаются на предварительные расчеты, что существенно ограничивает интерактивность виртуальных сред, а соответственно и область применения таких приложений.

4. Обзор методов

Рассмотрение методов реалистичной визуализации начнем с классических неинтерактивных методов, поскольку многие современные методы визуализации являются либо адаптацией классических методов

под архитектуру современных графических процессоров, либо в значительной степени базируются на них. Основными неинтерактивными методами являются трассировка лучей и радиосити.

Трассировка лучей [1] основывается на отслеживании пути, преодолеваемого лучом света от камеры через сцену, и расчете отражения, преломления или поглощения света при пересечении с объектами сцены. Источник света излучает луч, который в конечном итоге пересекается с поверхностью. В этот момент может произойти поглощение, отражение и преломление. Далее отраженные и преломленные лучи могут пересечься с другими поверхностями, где вновь рассчитывают поглощение, отражение и преломление. Часть лучей, таким образом, попадает в глаз наблюдателя, формируя итоговое изображение. Основным ограничением метода является производительность: из-за рекурсивной природы и большого количества лучей визуализация изображений может занимать от нескольких секунд до нескольких часов. В работе [2] представлена распределенная реализация трассировки лучей на кластерах персональных компьютеров, которая позволила визуализировать сложные сцены в интерактивном режиме. В [3] представлен быстрый алгоритм для визуализации мягких теней, эффективно использующий пространственную когерентность теневых лучей. В сравнении с трассировкой теневых лучей алгоритм дает в точности такие же результаты, выполняясь на тестовых сценах на 1-2 порядка быстрее.

Метод **радиосити** [4] основан на теории теплоизлучения, поскольку полагается на расчеты количества световой энергии, переходящей между двумя поверхностями. Для каждой поверхности рассчитывается энергия, покидающая поверхность за единицу времени (комбинация излучаемой и отраженной энергии). Отраженная энергия рассчитывается на основе форм факторов – долей от общей излучающей площади первой поверхности, которая перекрывается второй поверхностью. Метод получил значительное развитие после представления метода прогрессивного улучшения [5], который позволил показывать результаты промежуточных итераций в интерактивном режиме.

Локальное освещение OpenGL/Direct3D. В настоящее время для интерактивной визуализации широко используются программные интерфейсы OpenGL и Direct3D, поскольку их поддерживает большинство современных графических процессоров, позволяя получить высокую скорость визуализации. Однако модели освещения, реализованные в этих интерфейсах, основываются только на локальной информации, которой недостаточно для моделирования важных эффектов освещения. Рост производительности графических процессоров и расширение программных интерфейсов привели к появлению методов, позволяющих рассчитывать прямую освещенность (direct illumination), которая включает в себя тени от объектов, преграждающих свет. Наибольшее распространение получили методы, основанные на теневых картах [6, 7], теневых объемах [8, 9], и гибридные методы [10].

С появлением программируемых графических процессоров стала возможной адаптация классических методов визуализации для выполнения на графических процессорах в интерактивном режиме, что привело к появлению множества новых методов.

В работе [11] представлен метод для расчета **радиосити**, включая адаптивное деление модели **на графическом ускорителе**. Авторы инвертировали стандартные расчеты радиосити путем итерации по всем полигонам получателей и тестирования каждого элемента на видимость. Метод позволяет действовать в разрешении текстур получателей, а не в разрешении полукуба, что устраняет дефекты ступенчатости изображения. **Стохастический метод расчета радиосити** [12] использует рандомизацию, что позволяет использовать множество возможных взаимодействий света, которое может быть эффективно рассчитано на графическом ускорителе. Перечисленные методы требуют длительного времени для расчета радиосити в случае перемещения источников света или объектов сцены, что ограничивает их применение для целей интерактивной визуализации до небольших сцен.

Аппроксимация трассировки лучей на графическом процессоре [13] используется для локализации отражений и преломлений на основе карт окружений. Метод основан на том, что современные графические ускорители позволяют эффективно выполнять трассировку лучей, исходящих из одной точки. Он обладает достаточной скоростью и точностью в случае сцен, состоящих из больших плоских поверхностей.

Методы расчета рассеянного фонового освещения (Ambient Occlusion) [14, 15] позволяют рассчитать очень грубую аппроксимацию глобальной иллюминации. Результаты, полученные с помощью этих методов, схожи с тем, как выглядят объекты в пасмурный день. Методы обладают большой вычислительной сложностью, что ограничивает их применение небольшими сценами.

Предрасчитанный перенос излучения (Precomputed Radiance Transfer) является методом визуализации диффузных и блестящих объектов в низкочастотных световых окружениях и позволяет воспроизводить мягкие тени, переотражения света и каустику. В работе [16] затенение расширено до неточечных источников света с использованием сферических гармоник низкого порядка для светового окружения. Развитием метода является работа [17], в которой представлен метод, позволяющий визуализировать блестящие поверхности, включая теневые эффекты от динамического, всечастотного освещения. Недавние исследования значительно расширили область применения предрасчитанного переноса излучения, добавив поддержку произвольных деформируемых объектов [18], локальных источников света [19] и полупрозрачных объектов, освещенных всечастотными картами окружения [20]. Общим недостатком методов на основе предрасчитанного переноса излучения является необходимость длительных

расчетов на предварительном шаге, что ограничивает применение статическими сценами.

5. Сравнение и анализ методов визуализации

Современные методы визуализации по времени, затрачиваемом на визуализацию изображений, можно разделить на: неинтерактивные, интерактивные и реального времени. Неинтерактивные методы позволяют визуализировать глобальные эффекты освещения изображения, однако могут требовать несколько часов на визуализацию отдельного кадра. Интерактивные методы позволяют визуализировать трехмерные сцены со скоростью в несколько кадров в секунду, что быстрее, чем неинтерактивные методы. Методы, работающие в реальном времени, обеспечивают скорость визуализации от 25 кадров в секунду.

Поддержка различных типов освещения является важной характеристикой методов визуализации и определяет применимость того или иного метода для визуализации сцены. Поддержка освещения на основе карт окружения необходима для визуализации сцен, в которых солнце является доминирующим источником света. Однако карты окружения не подходят для визуализации интерьеров, поскольку представляют информацию об интенсивности бесконечно удаленных источников света. Для корректной визуализации интерьеров необходима поддержка локальных источников света. Другой не менее важной характеристикой методов является возможность визуализации различных частот освещения. Методы, работающие в реальном времени, ограничиваются, как правило, моделированием только высокочастотных составляющих освещения. Такие методы позволяют визуализировать тени только от точечных источников, т.е. не позволяют корректно визуализировать полутени. Другие методы ограничиваются моделированием только низкочастотных составляющих освещения и не позволяют получить резкие границы тени в точке контакта с поверхностью, в то время как для реалистичной визуализации необходимо моделирование всех составляющих освещения.

Поскольку время на расчет изображения в интерактивном режиме ограничено, современные методы для повышения качества изображения зачастую используют предварительные расчеты. Эти расчеты выполняются до начала основного цикла визуализации, и могут требовать значительных затрат времени, что ограничивает изменение трехмерной сцены. Ограничения могут накладываться на расположение и параметры источников света, расположение объектов, деформацию объектов. Такие ограничения значительно сужают сферу применения методов. Таким образом, визуализация полностью динамических сцен и предварительные расчеты являются несовместимыми.

Для реалистичной визуализации необходимо моделирование глобальных эффектов освещения, таких как: отраженный зеркальный и рассеянный свет, подповерхностное рассеяние и эффекты среды.

Общие методы визуализации, включая трассировку лучей и радиосити, требуют огромного количества времени для расчета и, следовательно, не подходят для интерактивной визуализации. Применение общих методов визуализации, адаптированных под графические процессоры, ограничивается, как правило, небольшими сценами. Методы на основе предрасчитанного переноса излучения позволяют моделировать глобальные эффекты освещения, однако они требуют длительного предрасчета, следовательно, не подходят для полностью интерактивных сцен. Методы на основе локальной информации и методы построения динамических теней позволяют визуализировать трехмерные сцены в реальном масштабе времени, но они не моделируют многие глобальные эффекты освещения, необходимые для реалистичной визуализации. Методы расчета рассеянного фонового освещения являются грубой аппроксимацией, позволяющей получать реалистичные изображения только для некоторых сцен.

Основные характеристики методов интерактивной визуализации можно разделить на три группы:

- скорость. Время, затрачиваемое на синтез одного кадра;
- качество. Учет различных эффектов глобальной иллюминации и учет различных частотных составляющих освещения;
- гибкость. Возможность изменения сцены в интерактивном режиме и время, затрачиваемое на предварительные расчеты.

Проанализировав современные методы визуализации, можно сделать вывод, что существующие методы успешно справляются только с тремя задачами:

- скорость и гибкость: OpenGL/Direct3D затенение, GPU трассировка лучей;
- скорость и качество: предрасчитанный перенос излучения (PRT), GPU радиосити;
- гибкость и качество: трассировка лучей, радиосити.

На сегодняшний день не существует метода, который обеспечивает высокую скорость и качество изображения, а также позволяет визуализировать динамические трехмерные сцены.

Таким образом, общий метод реалистичной интерактивной визуализации должен обладать следующими характеристиками:

- визуализация трехмерных сцен в интерактивном режиме;
- реалистичная имитация эффектов глобального освещения реального мира:

- 1) множественные зеркальные и рассеянные отражения света между объектами и их частями;
- 2) тени от неточечных источников света;

3) подповерхностное рассеяние и эффекты среды;
– визуализация динамических сцен. Метод должен позволять выполнять следующие манипуляции над трехмерной сценой в интерактивном режиме:

1) изменение местоположения и размеров любых объектов трехмерной сцены;

2) произвольная деформация любых объектов трехмерной сцены;

3) изменение местоположения и интенсивности источников света.

Для достижения поставленных целей метод должен обладать следующими особенностями:

– эффективно использовать ресурсы современных графических процессоров (GPU). Поскольку современные графические процессоры обладают значительно большей вычислительной мощностью, нежели центральные процессоры, реалистичная интерактивная визуализация практически невозможна без их использования. Предлагаемые методы основываются на рендеринге в кубические текстурные карты – операции, эффективно использующей ресурсы графического процессора, которая может быть применена для моделирования глобальной освещенности;

– использовать временную когерентность. Последовательность кадров интерактивной визуализации представляет собой небольшие последовательные изменения сцены и местоположения наблюдателя, а потому для расчета новых кадров могут быть использованы результаты расчетов на предыдущих кадрах;

– применять пространственную когерентность. Близкорасположенные точки трехмерной сцены, как правило, обладают схожими параметрами, например свойствами материала и уровнем освещенности;

– использовать особенности зрительного восприятия изображений человеком. Человек воспринимает неточности в расчетах одних эффектов реального мира значительно лучше, чем в других. Следовательно, учитывая эти особенности, можно варьировать точность расчетов различных эффектов, тем самым получая визуально более реалистичное изображение.

6. Заключение

Рассмотрены проблемы, которые существуют в реалистичной визуализации. Представлены актуальные методы реалистичной визуализации, рассмотрены их сильные и слабые стороны, а также применимость для различных практических задач. Описаны основные проблемы, которые решают рассмотренные методы: временные ограничения, сложность моделируемых эффектов и необходимость изменения сцен в интерактивном режиме. Каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны, однако ни один из них не может решить все указанные проблемы. Обзор показал, что последние методы визуализации

извлекают выгоду из программируемости графических процессоров, что значительно увеличивает качество изображения. Однако, как правило, эти методы не подходят для визуализации динамических сцен (методы на основе предрасчитанного переноса излучения), либо они являются адаптацией классических методов неинтерактивной визуализации и плохо согласуются с архитектурой современных графических процессоров, что ограничивает их применение визуализацией небольших сцен (GPU радиосити). Таким образом, на сегодняшний день не существует метода реалистичной интерактивной визуализации динамических трехмерных сцен.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложено решение проблемы реалистичной интерактивной визуализации динамических сцен за счет создания моделей и методов, основанных на рендеринге в кубические текстурные карты, учитывающих особенности зрительного восприятия изображений человеком, а также эксплуатирующих временную и пространственную когерентность. На основании проведенного анализа определены характеристики, которыми должен обладать метод реалистичной интерактивной визуализации динамических сцен, а также определены задачи, которые необходимо выполнить для создания подобного метода.

Практическая значимость работы состоит в том, что разрабатываемые модели и методы позволят снижать риски и стоимость эксплуатации и внедрения сложных систем, могут быть применены для следующих задач:

– предварительное моделирование (компьютерное проектирование, архитектурная визуализация);

– наглядное отображение виртуальных сред (виртуальная реальность, визуализация в медицине, геологии);

– анализ безопасности (условия вождения, видимость дорожных знаков);

– тренинг персонала (летные симуляторы и симуляторы вождения, компьютерные игры).

Литература: 1. *Arthur Appel*. Some Techniques for Shading Machine Renderings of Solids // SJCC. 1968. P. 27–45. 2. *Ingo Wald, Timothy J. Purcell, Joerg Schmittler, Carsten Benthin, Philipp Slusallek*. Realtime Ray Tracing and its use for Interactive Global Illumination // Eurographics State of the Art Reports. 2003. 3. *Samuli Laine, Timo Aila, Ulf Assarsson, Jaakko Lehtinen, Tomas Akenine-Möller*. Soft Shadow Volumes for Ray Tracing // ACM Transactions on Graphics 24(3) (SIGGRAPH 2005). P. 1156—1165. 4. *Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg and Bennett Battaile*. Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces // Proceedings of ACM SIGGRAPH. 1984, P. 213 - 222. 5. *Michael F. Cohen, Shenchang Eric Chen, John R. Wallace, Donald P. Greenberg*. A progressive refinement approach to fast radiosity image generation // Proceedings of ACM SIGGRAPH. 1988, P. 75 - 84. 6. *Mark Segal, Carl Korobkin, Rolf van Widenfelt, Jim Foran, and Paul Haeberli*. Fast shadows and lighting effects using texture mapping //

Computer Graphics (SIGGRAPH 1992). 1992. N 26(2). P. 249–252. **7.** Cass Everitt, Ashu Rege, and Cem Cebenoyan. Hardware shadow mapping // http://developer.nvidia.com/docs/IO/1830/ATT/shadow_mapping.pdf. **8.** Franklin C. Crow. Shadow algorithms for computer graphics. Computer Graphics (SIGGRAPH 1977). 1977. N 11(3). P. 242–248. **9.** Tim Heidmann. Real shadows, real time // In Iris Universe. Silicon Graphics Inc. 1991. N 18. P. 23–31. **10.** Eric Chan and Fredo Durand. An Efficient Hybrid Shadow Rendering Algorithm // Eurographics Symposium on Rendering. 2004. P. 185–195. **11.** Greg Coombe, Mark J. Harris, Anselmo Lastra. Radiosity on Graphics Hardware // Proceedings of the 2004 conference on Graphics interface. 2004. P. 161 – 168. **12.** Attila Barsi, Lószly Szirmay-Kalos, Góbor Szigórti. Stochastic glossy global illumination on the GPU // Proceedings of the 21st spring conference on Computer graphics. 2005. P. 187 – 193. **13.** Lószly Szirmay-Kalos, Barnabás Aszydi, István Lazónyi, Mótyós Premecz. Approximate Ray-Tracing on the GPU with Distance Impostors // Computer Graphics Forum. 2005. N 24(3). P. 685–704. **14.** Janne Kontkanen and Samuli Laine. Ambient Occlusion Fields // Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2005. P. 41–48. **15.** Michael Bunnell. Dynamic Ambient Occlusion and Indirect Lighting // GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation. 2005. P. 223 – 233. **16.** Jan Kautz,

Peter-Pike Sloan, John Snyder. Fast, arbitrary BRDF shading for low-frequency lighting using spherical harmonics // Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering. 2002. P. 291 – 296. **17.** Xinguo Liu, Peter-Pike Sloan, Heung-Yeung Shum, and John Snyder. All-Frequency Precomputed Radiance Transfer for Glossy Objects // Eurographics Symposium on Rendering. 2004. P. 337–344. **18.** Peter-Pike Sloan, Ben Luna, John Snyder. Local, deformable precomputed radiance transfer // Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2005. P. 1216 – 1224. **19.** Anders Wang Kristensen, Tomas Akenine-Müller, Henrik Wann Jensen. Precomputed local radiance transfer for real-time lighting design // ACM Transactions on Graphics. 2005. N 24 (3). P. 1208 – 1215. **20.** Rui Wang, John Tran, David Luebke. All-frequency interactive relighting of translucent objects with single and multiple scattering // Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2005. P. 1202 – 1207.

Поступила в редколлегию 9.10.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Лысенко Э.В.

Попов Андрей Сергеевич, аспирант кафедры социальной информатики ХНУРЭ. Научные интересы: реалистичная интерактивная визуализация, системология, объектно-ориентированная технология. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-15-91, 702-30-12.

УДК519.876

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ НА МОДЕЛЯХ УЗЕЛ-ФУНКЦИЯ-ОБЪЕКТ

ЦЕХМИСТРО И.В.

Рассматривается имитационное моделирование бизнес-процессов на моделях Узел-Функция-Объект. Проводится анализ возможностей существующих математических моделей динамических процессов для представления имитационных УФО-моделей. Предлагается использовать аппарат продукционных систем для создания системы имитационного моделирования на УФО-моделях.

1. Введение

В современных условиях развития предприятия все большую роль играет оперативность управления, оптимальность производственных процессов, распределения ресурсов и средств [1]. Одним из важнейших рычагов эффективного развития бизнеса является применение методов имитационного моделирования (ИМ) на ЭВМ при исследовании и управлении бизнес-процессами. Широкое использование ИМ объясняется тем, что размерность решаемых задач и неформализуемость сложных систем, к которым относятся бизнес-процессы, не позволяют использовать строгие методы оптимизации. Выделяют [2] следующие проблемы в исследовании бизнес-процессов, которые не могут быть решены сейчас и в обозримом будущем без ИМ:

1. Формирование инвестиционной политики при перспективном планировании.

2. Выбор средств обслуживания при текущем планировании.

3. Разработка планов с обратной информационной связью и операционных предписаний.

Эти классы задач определяются тем, что при их решении необходимо одновременно учитывать факторы неопределенности, динамическую взаимную обусловленность текущих решений и последующих событий, комплексную взаимозависимость между управляемыми переменными исследуемой системы, а часто и строго дискретную и четко определенную последовательность интервалов времени. Указанные особенности свойственны всем сложным системам.

ИМ является эффективным, но и не лишенным недостатков методом. Трудности использования ИМ связаны с обеспечением адекватности описания системы, интерпретацией результатов, обеспечением стохастической сходимости процесса моделирования, решением проблемы размерности и т.п.

ИМ с использованием УФО-подхода, позволяющего создавать предметно-ориентированные имитационные модели и обеспечивающего сохранение и использование знаний об элементах бизнеса, которые могут отобразить любой бизнес с необходимой степенью адекватности, точности и подробности; учет в одной модели и структурных, и функциональных, и объектных (субстанциальных) характеристик бизнеса (любой системы вообще) снимает часть проблем использования ИМ [3].

ИМ обычно основано на применении логико-математической модели сложной системы - со всеми вытекающими особенностями и осложнениями [4]. Построение математической модели в отличие от структурно-