

Реализация на GPU струй воды и пены в трехмерных виртуальных сценах на основе систем частиц¹

А.В. Мальцев

Аннотация. В работе предлагаются методы реализации виртуальных струй воды и пены в трехмерных сценах, основанные на использовании мелкоразмерных систем частиц. Моделирование и визуализация струй производятся в масштабе реального времени на современном графическом процессоре с поддержкой архитектуры параллельных вычислений CUDA. Подробно описываются разработанные виртуальные модели частиц воды и пены.

Ключевые слова: трехмерная сцена, система частиц, визуализация, графический процессор, реальное время, CUDA.

Введение

Широким классом объектов, моделируемых и визуализируемых в трехмерной виртуальной среде, являются струи жидкости и пены. Такие объекты состоят из совокупности большого количества мелкоразмерных частиц, число которых составляет сотни тысяч и даже миллионов. Особенностью их реализации в виртуальных сценах является сложность обеспечения режима реального времени, при котором процесс расчета динамики объектов сцены и визуализация одного кадра изображения должны занимать в сумме не более 40 мс. Данный режим является обязательным для корректной работы систем виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексов управления сложными техническими системами [1, 2].

Современным подходом, обеспечивающим режим реального времени при моделировании и визуализации сложных многоэлементных систем частиц, является использование возмож-

ностей многоядерных графических процессоров (GPU). Так, в работе [3] описываются методы и алгоритмы реализации систем частиц с использованием шейдеров. Авторы статьи [4] рассматривают моделирование снега в трехмерных сценах на GPU. В публикации [5] представлены методы и алгоритмы реализации атмосферных осадков с использованием частиц, основанные на шейдерной обработке и архитектуре параллельных вычислений CUDA.

В данной работе предлагаются методы реализации виртуальных струй воды и пены в трехмерных сценах, основанные на использовании мелкоразмерных систем частиц, подробно рассматривается построение предлагаемых геометрических моделей частиц воды и пены. Для обеспечения режима реального времени предлагаются методы, позволяющие повысить эффективность этапа визуализации систем частиц без потери качества. Описываемые подходы являются развитием решений, представленных в [3, 5]. Рассмотрим их подробнее.

¹ Работа выполняется при поддержке РФФИ, грант № 16-07-00796.

1. Повышение эффективности процесса визуализации частиц

1.1. Раннее отсечение частиц вне видимой области

Процесс визуализации системы частиц на графическом процессоре включает три стадии [3], выполняемые соответственно вершинным, геометрическим и фрагментным шейдерами. На вход вершинного шейдера поступает массив M , содержащий информацию о каждой из частиц системы (координаты центральной точки, время жизни, скорость и т.д.). Вершинный шейдер в рассматриваемой реализации не несет вычислительной нагрузки. Однако он является обязательной составляющей графического конвейера GPU, поэтому должен передать полученные входные данные в геометрический шейдер, который обеспечивает синтез полигональной модели частиц. Фрагментный шейдер вычисляет освещенность каждой точки F подготовленной модели частицы от источников света виртуальной сцены, учитывая материалы и текстуры, применяемые к системе частиц.

В соответствии с принципами работы графического конвейера, на этапе выполнения геометрического шейдера полигональные модели строятся для всех частиц системы, включая те, которые не попадают в область видимости наблюдателя. Аппаратное отсечение же таких невидимых частиц происходит уже после геометрического шейдера. Это снижает эффективность процесса визуализации системы частиц, а значит, и всей виртуальной сцены в целом.

Для решения описанной проблемы в данной работе предлагается реализация собственного механизма раннего отсечения частиц, находящихся вне поля зрения наблюдателя. Применяемый подход основан на построении полигональных моделей только для тех частиц, которые попадают в полубесконечный конус с вершиной в точке P_{cam} расположения текущей виртуальной камеры, описывающий пирамиду видимости этой камеры. Обозначим угол раствора этого конуса через γ . Тогда произвольная частица с центром в точке P будет находиться внутри конуса при выполнении неравенства $\varphi \leq \gamma/2$, где φ – угол между вектором $\mathbf{d} = P - P_{cam}$ и единичным вектором \mathbf{v} направления взгляда виртуальной камеры.

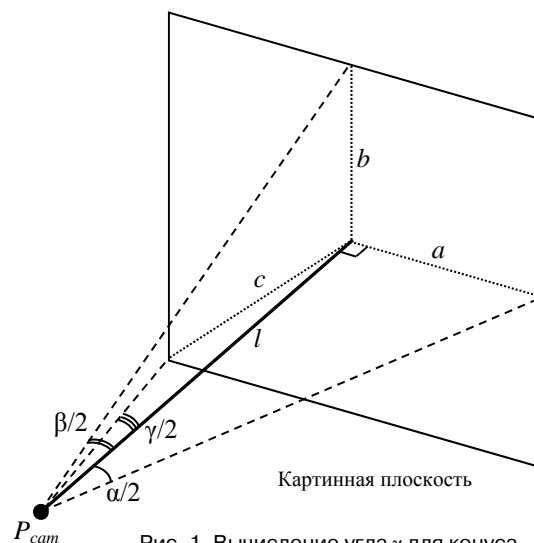


Рис. 1. Вычисление угла γ для конуса

Координаты точек и векторов в нашем случае представлены в мировой системе координат (СК) WCS, поскольку именно в ней производится расчет положений частиц.

Поскольку графический процессор эффективно выполняет операции скалярного произведения, то указанное выше неравенство можно заменить на

$$\left(\frac{\mathbf{d}}{|\mathbf{d}|}, \mathbf{v} \right) \geq \cos \frac{\gamma}{2}. \quad (1)$$

Косинус половины угла γ раствора конуса вычислим по значениям горизонтального α и вертикального β углов раствора виртуальной камеры. Обозначим расстояние до картинной плоскости через l , а половины ширины, высоты и диагонали прямоугольника пересечения данной плоскости с пирамидой видимости камеры – через a , b и c соответственно (Рис. 1). Тогда:

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \frac{l}{\sqrt{l^2 + c^2}} = \frac{l}{\sqrt{l^2 + a^2 + b^2}}.$$

Поскольку $a = l \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ и $b = l \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$, то

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} \right)^{-1/2}.$$

Подставив вычисленное значение в (1), получим:

$$\left(\frac{\mathbf{d}}{|\mathbf{d}|}, \mathbf{v} \right) \geq \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} \right)^{-1/2}. \quad (2)$$

Правая часть неравенства вычисляется только один раз перед выполнением этапа синтеза и визуализации системы частиц, левая – в геометрическом шейдере для каждой частицы. При выполнении неравенства (2) производится построение полигональной модели частицы, в обратном случае ее обработка прекращается уже на начальной стадии геометрического шейдера.

1.2. Управление частотой обновления буфера вывода для системы частиц

Для реализации этапа вычисления текущих параметров частиц в этой работе используется современная архитектура CUDA параллельных вычислений на многоядерных графических процессорах компании NVIDIA. Получаемый в результате массив данных размещается в CUDA-контексте. В таком случае, чтобы выполнить визуализацию системы частиц, возникает необходимость организации доступа к этому массиву из контекста, используемого графической библиотекой OpenGL и GLSL-шейдерами. Обычно данная проблема решается с использованием механизма CUDA OpenGL interoperability [6], который позволяет отобразить данные из памяти CUDA в вершинный буфер VBO [7], доступный в шейдерах. Но при большом числе частиц в системе процесс отображения памяти занимает существенное время. Выполнение такой операции в каждом кадре может серьезно снизить производительность и привести к невозможности визуализации в масштабе реального времени, необходимом для корректной работы систем виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексов. Поэтому целесообразно производить отображение не в каждом кадре, а ограничить частоту обновления буфера VBO до значения, позволяющего обеспечить рендеринг плавной динамики частиц. Так, при визуализации трехмерной сцены в масштабе реального времени вполне достаточно производить отображение данных из CUDA в VBO с частотой 25 раз в секунду.

2. Реализация виртуальных струй на основе системы частиц

Моделирование и визуализация виртуальных струй в данной работе выполняется на основе методов и алгоритмов, описанных в [3, 5],

с учетом подходов из п.1. Далее рассмотрим процесс генерации полигональных моделей частиц воды и пены, производимый на этапе выполнения геометрического шейдера.

2.1. Моделирование струй воды

Визуализация частицы воды в данной работе производится путем генерации в геометрическом шейдере виртуальной модели капли в виде двух полупрозрачных пирамид с высотами h_1 и h_2 , имеющих общее основание – правильный треугольник со стороной, равной a (Рис. 2). При этом $h_2/h_1 = k$, где $k > 1$ – регулируемый коэффициент, обеспечивающий придание модели капли вытянутой формы. Чтобы построить описанный многогранник для произвольной частицы со скоростью v , введем систему координат с центром в точке P размещения этой частицы и осью Y с ортом $e_y = -v / |v|$. Оси X и Z выбираются так, чтобы получившаяся система была правосторонней. Отметим, что координаты ортов e_x, e_y, e_z трех осей X, Y и Z необходимо вычислять в мировой системе WCS.

Вершины модели капли-частицы определим по формулам:

$$V_0 = P + h_1 e_y, \quad V_1 = P + 0.5a \left(\frac{\sqrt{3}}{3} e_z - e_x \right),$$

$$V_2 = V_1 + a e_x, \quad V_3 = P - \frac{\sqrt{3}}{3} a e_z, \quad V_4 = P - h_2 e_y.$$

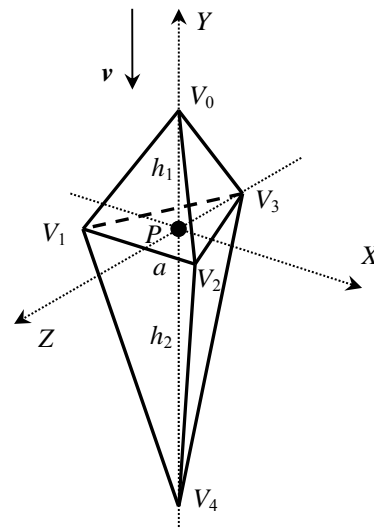


Рис. 2. Модель частицы-капли

Полученные точки являются вершинами шести треугольных граней нашей модели капли. Перед отправкой этих вершин на выход геометрического шейдера умножим их на произведение проекционной M_{proj} и видовой M_v матриц. Также на выход шейдера передадим цвет C_{rgb} и значение C_α альфа-канала (были получены эмпирическим путем), отвечающего за прозрачность, для каждой рассчитанной вершины, которые при дальнейшей интерполяции по граням в графическом конвейере обеспечат схожесть нашей модели с каплей воды:

$$C_{rgb} = (0.867, 0.867, 1.0), \\ C_{\alpha,0} = 0.3, C_{\alpha,1} = 0.234, C_{\alpha,2} = 0.234, C_{\alpha,3} = 0.3, C_{\alpha,4} = 0.1.$$

2.2. Моделирование струй пены

Для синтеза частиц пены будем использовать модель в виде «спрайта» (квадрата, всегда повернутого лицевой стороной к виртуальной камере). В геометрическом шейдере создадим для каждой частицы спрайт так, чтобы его центр располагался в точке P размещения этой частицы. Нормаль N к поверхности спрайта определим как нормализованную разность O_{wcs} (начальной точки O видовой СК VCS камеры с координатами в мировой СК WCS) и P (Рис. 3).

Формируемый спрайт содержит два треугольника с вершинами соответственно V_0, V_1, V_2 и V_1, V_2, V_3 . Чтобы оптимизировать работу графического конвейера, совокупность данных треугольников можно представить в виде треугольного стрипа $V_0V_1V_2V_3$. Для определения координат вершин вычислим пару перпендикулярных векторов A и B таких, что $A \parallel V_0V_2, B \parallel V_0V_1$:

$$A = [e_{y,wcs}, N] / |[e_{y,wcs}, N]|, \quad B = [N, A] / |[N, A]|,$$

где $e_{y,wcs}$ – орт оси Y системы VCS с координатами, пересчитанными в СК WCS, а квадратные скобки обозначают векторное произведение.

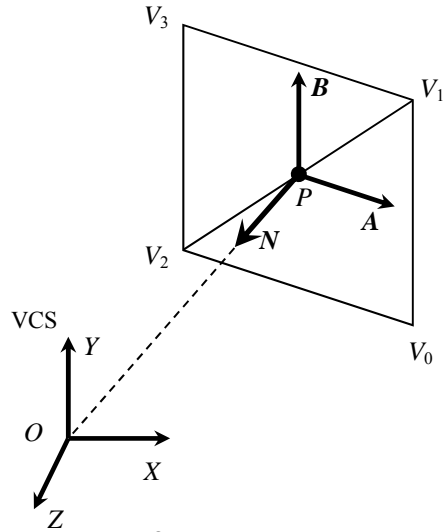


Рис. 3. Модель частицы в виде спрайта

Тогда, если s – размер стороны спрайта, то:

$$V_0 = P + 0.5s(A - B), \quad V_1 = V_0 + sB, \\ V_2 = V_0 - sA, \quad V_3 = V_1 - sA.$$

Рассчитанные вершины передадим на выход геометрического шейдера, предварительно умножив на произведение проекционной M_{proj} и видовой M_v матриц. Текстурные координаты для этих вершин зададим соответственно как $T_0 (1.0, 0.0), T_1 (1.0, 1.0), T_2 (0.0, 0.0)$ и $T_3 (0.0, 1.0)$.

Чтобы придать подготовленным спрайтам вид частиц пены, наложим во фрагментном шейдере на каждый из них текстуру прозрачности (двумерную текстуру в градациях серого цвета, в которой более темные участки отвечают за большую прозрачность, а более светлые – за меньшую). Для этой цели в данной работе была создана собственная анимированная текстура пены в формате AVI. Несколько ее кадров представлены на Рис. 4. Основной цвет материала выбирается в зависимости от требуемого цвета пены.

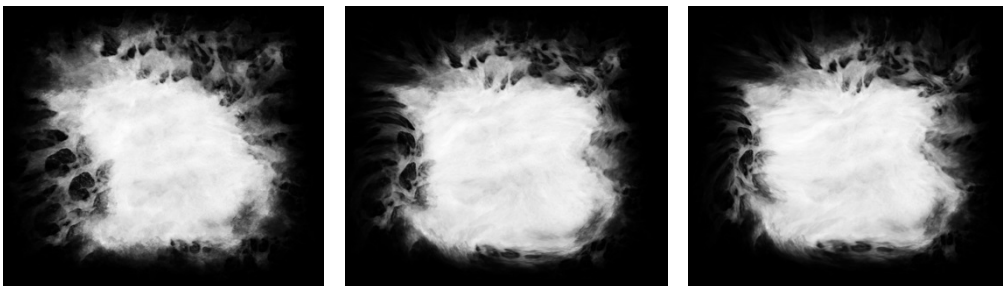


Рис. 4. Кадры анимированной текстуры пены

Заключение

На основе предложенных в работе решений были созданы программные модули для систем визуализации трехмерных виртуальных сцен, использующихся в системах виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексах. Они обеспечивают моделирование и визуализацию виртуальных струй воды и пены в масштабе реального времени. Данные модули

реализованы с помощью графической библиотеки OpenGL, шейдерного языка GLSL 4.0 и аппаратно-программной архитектуры параллельных вычислений CUDA версии 7.0. Для апробации разработанных программных решений была использована система визуализации «GLView» [8], созданная в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. На Рис. 5 и Рис. 6 представлены примеры моделирования струй пены и воды в трехмерных сценах.



Рис. 5. Моделирование струи воды в виртуальной среде



Рис. 6. Моделирование струи пены в виртуальной среде

Литература

1. Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Использование технологий виртуальной реальности для моделирования безопасного управления антропоморфными робототехническими средствами // Труды XXI Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – Москва, 2013. – С. 290-293.
2. Михайлюк М.В. Видеотренажерный комплекс управления роботами и манипуляторами // Труды Международного симпозиума «Инновационные технологии в исследовании окружающей среды». – Ларнака-Москва, 2013. – С. 84-85.
3. Мальцев А.В. Реализация системы частиц в реальном времени на GPU // Программные продукты и системы. – 2014. – № 4. – С. 57-62.
4. Zou C., Xie X., Zhao G. Algorithm for generating snow based on GPU // ICIMCS 2010, Proceedings of the Second International Conference on Internet Multimedia Computing and Service. – 2010. – pp. 199-202.
5. Мальцев А.В. Моделирование атмосферных осадков в трехмерных сценах с использованием CUDA // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2015. – № 2. – С. 31-39.
6. CUDA C Programming Guide. NVIDIA Corporation, 2015. URL: http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf (дата обращения: 21.06.2016).
7. Боресков А.В. Расширения OpenGL. СПб.: БХВ-Петербург. – 2005. – 667 с.
8. Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Система визуализации «GLView» для имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения // Труды Международной научной конференции Графикон-2015. – 2015. – С. 96-101.

Мальцев Андрей Валерьевич. Ведущий научный сотрудник ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Окончил МИРЭА в 2008 году. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: 52. Область научных интересов: компьютерная графика, системы виртуальной реальности, информационные технологии. E-mail: avmaltcev@mail.ru

GPU implementation of water and foam jets in 3D virtual scenes by using particle systems

A.V. Maltsev

Abstract. This paper presents implementation methods of virtual water and foam jets in three-dimensional scenes, based on using small-sized particle systems. Real-time simulation and visualization of such jets are performed on modern graphics processor that supports CUDA parallel computing architecture. Designed virtual models of water and foam particles are described in details.

Keywords: three-dimensional scene, particle system, visualization, graphics processor, real time, CUDA.

References

1. Mihayluk M.V., Torgashev M.A. Ispol'zovanie tekhnologij virtual'noj real'nosti dlya modelirovaniya bezopasnogo upravleniya antropomorfnyimi robototekhnicheskimi sredstvami // Trudy XXI Mezhdunarodnoj konferentsii «Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem». – Moskva, 2013. – P. 290-293.
2. Mihayluk M.V. Videotrenazhernyj kompleks upravleniya robotami i manipulyatorami // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Innovatsionnye tekhnologii v issledovanii okruzhaushchej sredy». – Larnaka-Moskva, 2013. – P. 84-85.
3. Maltsev A.V. Realizatsiya sistemy chastits v real'nom vremeni na GPU // Programmnye produkty i sistemy. – 2014. – № 4. – P. 57-62.
4. Zou C., Xie X., Zhao G. Algorithm for generating snow based on GPU // ICIMCS 2010, Proceedings of the Second International Conference on Internet Multimedia Computing and Service. – 2010. – P. 199-202.
5. Maltsev A.V. Modelirovanie atmosferynykh osadkov v trekhmerykh stsenakh s ispol'zovaniem CUDA // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. – 2015. – № 2. – P. 31-39.
6. CUDA C Programming Guide // NVIDIA Corporation. – 2015. – 240 p. URL: http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf (review date: 21.06.2016)
7. Boreskov A.V. Rasshireniya OpenGL. – SPb.: BHV-Peterburg. – 2005. – 667 pp.
8. Mihayluk M.V., Torgashev M.A. Sistema vizualizatsii «GLView» dlja imitacionno-trenazhernykh kompleksov i sistem virtual'nogo okruzheniya // Trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii Grafikon-2015. – 2015. – P. 96-101.

Andrey Valerievich Maltsev. Leading Researcher at Scientific Research Institute of System Analysis (Russian Academy of Sciences). He graduated from MIREA in 2008. Candidate of physico-mathematical Sciences. Number of publications: 52. Research interests are computer graphics, virtual reality systems and information technologies. E-mail: avmaltcev@mail.ru