

УДК 004.925

Реалистичная визуализация атмосферных осадков в приложениях реального времени

В.В. Карабчевский, А.А. Лунтовская
Донецкий национальный технический университет
anastasia.luntovskaya@gmail.com

Карабчевский В.В., Лунтовская А.А. Реалистичная визуализация атмосферных осадков в приложениях реального времени. Статья посвящена вопросу визуализации атмосферных осадков при моделировании природных сцен в режиме реального времени. Рассмотрены методы моделирования осадков и их взаимодействия с окружающей средой. Предложена реализация на основе системы частиц, а так же способы снижения затрат вычислительных ресурсов без существенной потери реалистичности.

Введение

Моделирование природных сцен – одно из основных направлений в компьютерной графике, являющееся предметом исследований многих ученых. С увеличением вычислительной мощности компьютеров, совершенствованием архитектуры графических процессоров, увеличением их быстродействия и переходом к программируемым графическим процессорам, поддерживающим шейдеры, реалистичность игрового окружения нередко становится одним из основных критериев успешности игры.

Если говорить о компьютерных играх реального времени, рендеринг осадков должен найти баланс между реалистичностью и скоростью визуализации.

Огромное количество капель дождя и снежинок – тяжелое бремя для компьютерного расчета. Помимо этого, каждая капля обладает многими свойствами: размер, масса, скорость, ускорение. Поэтому реалистичное и эффективное представление сцен с атмосферными осадками при увеличении скорости отрисовки и уменьшении затрат ресурсов – непростая задача.

Анализ исследований и публикаций

В настоящее время существует множество алгоритмов динамического моделирования атмосферных осадков. Руссо [1] предложил метод моделирования дождя в реальном времени с использованием графического процессора для имитации эффекта преломления внутри дождевой капли, а также для отображения непрерывного

изменения капли дождя, вызванного оптическими свойствами окружающей среды.

Основываясь на физических характеристиках дождя, Ван [2] в своих исследованиях сосредоточились на моделировании формы капель дождя и его интенсивности в различных погодных условиях. Он использовал гибридный подход, основывающийся на использовании фотографий дождевых осадков для увеличения реалистичности моделируемого природного явления. В работе автор используют расчет освещения дождевых капель по методу PRT – precomputed radiance transfer, основывающийся на предварительном вычислении коэффициентов освещения, которые затем с помощью шейдеров суммируются и смешиваются со средой освещения. Такой метод позволяет получить близкий к реальному эффект освещения сцены с осадками в режиме реального времени.

Ниньян [3] в своей работе использовал наложение текстуры на двойной конус, центрированный над камерой. Ривз и др. [4] предложили систему частиц, состоящую из большого количества частиц неправильной формы, случайно распределенных в моделируемой сцене. Распределение частиц в предложенных авторами природных дождевых сценах похоже на нормальное распределение.

Ли и соавторы [5] предложили способ моделирования осадков с использованием, так называемой, ультра-энтропии, которая вводится для того, чтобы модифицировать распределение капель дождя и тем самым лучше имитировать естественный дождь. Цю и др. [6] предложил так называемый алгоритм «роя частиц», который предполагает моделирования нерегулярного хаотичного движения частиц. Придавая при этом

каждой частице фрактальный эволюционный процесс, авторы добились высокой реалистичности изображения дождевых осадков.

В современных компьютерных играх часто используются методы создания динамических осадков, основанные на прокручиваемых текстурах и геометрии, центрированной на камере, что обеспечивает быстроту визуализации, но нередко в ущерб реалистичности.

NVIDIA предложила новый способ визуализации дождя с использованием только графического процессора, что позволяет существенно повысить эффективность и скорость моделирования по сравнению с использованием традиционных систем частиц.

В дополнении к разработкам в области скорости рендеринга дождя, в последние годы все большее количество исследований посвящено повышению реалистичности и освещению дождя.

В частности, Гарг [7] проводил исследования по созданию фотореалистичного дождя в приложениях реального времени, основанных на физических характеристиках дождя и освещения капель дождя.

Катцуми и соавторы [8] совместили систему частиц с физической моделью движения дождевых капель без использования графического ускорителя.

Фэн др. [9] предложил алгоритм визуализации дождя, включающий систему обнаружения столкновений в режиме реального времени с использованием графического процессора. Их метод также основан на использовании при моделировании системы частиц.

Моделирование снегопада и накопления снега на поверхностях других объектов – одна из областей имитационного моделирования, где сохраняется огромная разница между результатами офф-лайн моделирования и моделирования в реальном времени. В своей работе Пол Ферингс [10] предлагает модель, описывающую накопление снега на различных поверхностях, поведение снега в зависимости от скорости ветра, а так же структуры самого снега. Модель также описывает поведение снега в неустойчивых физических районах при опадении его в виде лавин.

Хотя такая модель является исчерпывающей с точки зрения физических свойств снега как природного явления, она не пригодна для использования в приложениях реального времени в виду огромного количества производимых расчетов.

Примером реализации снежных сугробов в реальном времени является работа Хагганда и Андерсона [11]. Основная идея заключается в том, что для хранения текущей глубины снега используется матрица высот. Значения высоты

используются для триангуляции области накопления снега, а рендеринг треугольников осуществляется с использованием затенения Гуро, которое само по себе является довольно быстрым. Авторам удалось добиться эффекта медленно накапливающегося на поверхности снега. Сначала у снежного слоя высокая прозрачность, так как снежных покров тонкий, со временем снег становится непрозрачным, и “растет” во время моделирования.

Цели и задачи статьи

Цель данной статьи – исследовать методы и алгоритмы моделирования атмосферных осадков и найти оптимальное соотношение реалистичности изображения атмосферных осадков в реальном времени и затрат ресурсов.

Предложенный в статье метод визуализации основан на использовании системы частиц. Процесс моделирования ускоряется за счет использования наложения текстур. Использование этого метода является очень эффективным при низких требованиях к оборудованию, высокой скорости моделирования и реалистичном изображении.

Моделирование осадков

Визуализация атмосферных осадков должна строиться на основе физических характеристик этого явления.

Осадки различаются по физическому состоянию: могут быть жидкими (дождь, морось) и твердыми (град, снег). По характеру выпадения различают морозящие, обложные и ливневые осадки [12].

Морось – жидкие осадки, выпадающие из слоистых облаков или густого тумана. Представляет собой очень мелкие капельки, диаметром не превышающие нескольких сотых долей миллиметра, взвешенные в воздухе. Более крупные капли выпадают на землю в виде дождя, общее количество таких осадков незначительно. При низких температурах осадки, подобные мороси, выпадают в форме снежных зерен. Во время тумана может наблюдаться изморозь – отложение льда на ветвях деревьев.

Дождь – преобладающая форма жидких осадков. Выпадает преимущественно из кучево-дождевых и слоисто-дождевых облаков. Диаметр капель составляет около 0,5 мм.

Наиболее частым видом твердых осадков является снег. Снег представляет собой осадки в виде ледяных кристаллов разнообразной формы. Снег может выпадать как в виде отдельных снежинок, так и снежных “хлопьев”, которые образуются вследствие склеивания отдельных снежинок при температуре, близкой к 0 °C [13].

Источник снежного покрова – снежинки. Опускаясь через слои воздуха к Земле, под влиянием различий в температуре и влажности, снежинки меняются: растут, слипаются, дробятся. За счет этого образуется разнообразие форм снежных кристаллов.

На поверхности Земли снежинки образуют снежный покров, который к концу зимы достигает толщины в метр и состоит из нескольких слоев снега, образовавшихся при различной температуре. Под действием ветров, оттепелей, солнечной радиации на поверхности снежного покрова возникает наст. Снежный покров отражает больше половины лучистой энергии солнца, а свежеснеженный сухой снег – до 90% солнечных лучей [12].

Снежная крупа – один из вариантов снега, осадки, выпадающие в виде матово-белых ядер округлой формы размером от 1 до 15 мм. Чаще всего выпадает из кучево-дождевых облаков при температуре, близкой к 0° С.

Град – твердые осадки, выпадающие из развитых по вертикали кучево-дождевых облаков в виде частичек плотного льда в теплое время года.

Осадки также значительно различаются по характеру выпадения. Морозящие осадки выпадают в виде мороси или ее твердых аналогов. Обложные осадки выпадают непрерывно или с короткими перерывами от нескольких часов до суток с равномерной интенсивностью. Выпадают они из слоисто-дождевых или высоко-слоистых облаков.

Ливневые осадки – осадки высокой интенсивности, но малой продолжительности. Выпадают из кучево-дождевых облаков как в жидком, так и в твердом виде. Характеризуются быстрым нарастанием интенсивности в начале выпадения и резким прекращением выпадения. Часто сопровождаются грозвыми явлениями, быстрыми изменениями облачности, усилением ветра с порывами и шквалами [13].

Поскольку осадки представляют собой множество капелек и кристалликов, падающих на землю, визуализировать их стандартными методами слишком сложно: моделировать каждую каплю или снежинку – лишняя трата времени. Поэтому при моделировании таких физических явлений как дождь, снег, туман, дым, песок будем применять технологию, называющуюся системой частиц.

Система частиц – это способ визуализации в компьютерной графике большого количества подобных объектов, представляющих в совокупности объект, не имеющий четких геометрических границ. Системы частиц могут быть реализованы как в двумерной, так и в трехмерной графике [14].

На данный момент не существует единого стандарта по реализации системы частиц. Тем не менее, этот механизм стал неотъемлемой частью любой компьютерной игры и все современные игровые движки предлагают собственную реализацию системы частиц, которая может быть гибко настроена в зависимости от потребностей разработчиков.

При моделировании осадков будем использовать текстуры снежинок и капель дождя. На рисунке 1 представлена текстура, используемая при моделировании снежинок, на рисунке 2 – текстура дождевых капель.

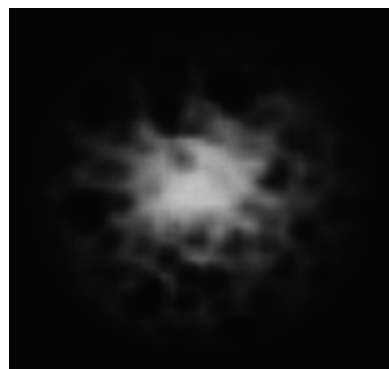


Рисунок 1 – Текстура снежных кристаллов

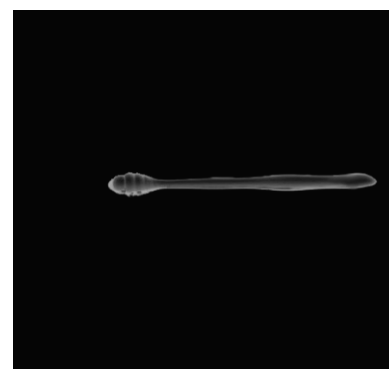


Рисунок 2 – Текстура дождевых капель

Каждая такая частица математически представляет собой материальную точку с назначенными атрибутами, например, скоростью, цветом и т.д. Каждая частица по мере выполнения программы изменяет свое состояние по определенному закону, общему для всех частиц в системе, например, частицы могут менять скорость или размер. Обычно для каждой частицы задается максимальная продолжительность жизни, по истечении которой частицы исчезают. Кроме того, при визуализации системы частиц может быть изменено и общее количество самих частиц, что позволяет создавать имитацию различных по интенсивности видов осадков.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты работы программы при различном количестве частиц в системе.



Рисунок 3 – Результаты моделирования дождя



Рисунок 4 – Результаты моделирования ливневых осадков

Использование системы частиц также позволяет легко менять размер моделируемых частиц. Это можно использовать, например, при визуализации различных видов твердых осадков: снежной крупы и снежных хлопьев. Результаты моделирования снежных осадков представлены на рисунках 5 и 6.



Рисунок 5 – Визуализация твердых осадков «снежная крупа»



Рисунок 6 – Визуализация снежных хлопьев

В 3D приложениях реального времени обычно используется упрощенная модель визуализации частиц: считается, что частицы не отбрасывают тени на окружающую геометрию и друг на друга, не поглощают свет. Без этих допущений обсчет системы частиц требует значительного количества ресурсов.

Использование системы частиц для моделирования атмосферных осадков можно оптимизировать, если принять во внимание то, как человек видит осадки в реальной жизни. Наблюдатель различает отдельно только те капли или снежинки, которые находятся в непосредственной близости от него. На заднем плане осадки сливаются и воспринимаются как равномерная белая пелена. Применяя это при моделировании, можно значительно сократить количество частиц. Система частиц прикрепляется к камере, а на заднем плане добавляется туман, который может быть реализован с помощью шумовой функции. А шумовая функция, в свою очередь, может быть легко реализована на графическом процессоре с помощью шейдеров. Для сравнения, на рисунке 7 представлена сцена с добавлением тумана на заднем плане, а на рисунке 8 – та же сцена, но без него.



Рисунок 7 – Сцена с туманом



Рисунок 8 – Сцена без тумана

При визуализации атмосферных осадков также встает вопрос об отслеживании

столкновений падающих капель дождя или снежинок с поверхностью земли. Игровые движки предусматривают отслеживание взаимодействия нескольких 3d-объектов в пространстве с помощью технологии обнаружения столкновений (Collision detection).

Collision detection – это способ, с помощью которого анализируется 3D-пространство сцены на предмет столкновений между объектами. Объектам присваивается компонент Collider, который размещает вокруг него невидимую сетку - коллайдер, имитирующий форму объекта и информирующий о наличии столкновений с другими объектами. Информация о столкновении коллайдеров передается в физический движок игрового движка, где происходит обсчет дальнейшего поведения, основанного на скорости объектов, их направлении и силе удара [15].

Использование коллайдеров, точно повторяющих форму меша моделей, а также увеличение количества объектов приводит к увеличению затрат на их вычисление. Поэтому использование такого подхода при моделировании осадков является слишком ресурсозатратным.

Учитывая большое количество используемых при визуализации частиц, отслеживать точное место соприкосновения каждой из них с землей нецелесообразно. В случае с жидкими осадками гораздо проще использовать еще одну систему частиц, форма которой будет напоминать брызги. А для выпадения осадков на водную поверхность – наряду с дополнительной системой частиц в некоторых местах сетки деформировать геометрию водной поверхности, имитируя разводы на воде. Текстура, используемая для визуализации брызг дождевых капель на поверхности, представлена на рисунке 9, а результат моделирования – на рисунке 10.

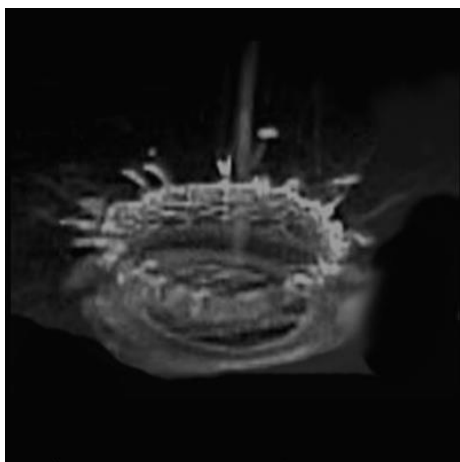


Рисунок 9 – Текстура брызг воды

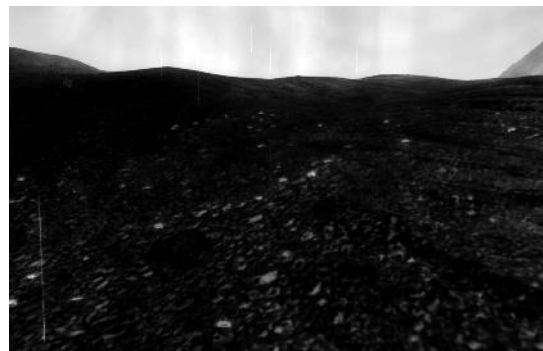


Рисунок 10 – Результат моделирования брызг дождевых капель

Для визуализации снежных наносов и сугробов можно воспользоваться методом мультитекстурирования поверхности.

Мультитекстурирование – это метод визуализации при помощи шейдеров с использованием нескольких текстур за минимальное количество проходов.

Пиксельные шейдеры могут получать на вход до восьми текстур, т.е. для каждого пикселя может быть до восьми источников данных о цвете. Для получения итогового цвета пикселя значения цвета пикселей из всех текстур складываются с каким-либо параметром смешивания. При этом значение цвета для каждой текстуры может быть изменено в шейдере произвольным образом. Метод мультитекстурирования отличается от других способов создания многослойных текстур отсутствием необходимости хранить итоговую текстуру в памяти, так как она динамически строится в шейдере непосредственно в процессе визуализации [16].

Алгоритм построения двухслойной текстуры с помощью шейдера предполагает последовательное получение:

- текстурных координат пикселя;
- цвета пикселя первой текстуры;
- цвета пикселя второй текстуры;
- коэффициента смешивания текстур для каждого пикселя, который может быть задан заранее или динамически вычислен в процессе выполнения шейдера;
- итогового цвета пикселя, который вычисляется по формуле:

$$c = c1 * (1 - k) + c2 * k \quad (1)$$

где c – итоговый цвет;
 $c1$ – цвет пикселя из 1-й текстуры;
 $c2$ – цвет пикселя из 2-й текстуры;
 k – коэффициент смешивания.

Постепенно увеличивая вклад в конечный цвет белой снежной текстуры, можно добиться эффекта постепенного накопления снега на

поверхности. На рисунках 11 и 12 показаны результаты моделирования снежных наносов на поверхности объектов с помощью мультитекстурирования поверхности.



Рисунок 11 – Мультитекстурирование поверхности



Рисунок 12 – Мультитекстурирование поверхности

Выводы и перспективы исследований

Реализация рассмотренного метода визуализации атмосферных осадков и их взаимодействия с окружающей средой позволяет создавать реалистичное изображение этого погодного явления. Рассмотренные способы оптимизации использования вычислительных ресурсов при моделировании системы частиц позволяют применять метод в приложениях реального времени. Полученные результаты будут использованы для создания динамического игрового 3D окружения.

Литература

1. Rousseau P., Jolivet V., Ghazanfarpour D. Realistic real-time rain rendering. *Computers & Graphics*, № 30(4), 2006, pp. 507-518.

2. Wang, C., Wang, Z., Zhang, X. et al. Real-time modeling and rendering of raining scenes. *The Visual Computer*, № 24(7-9), 2008, pp. 605-616.
3. Niniane, W., Wade, B. Rendering falling rain and snow. *ACM SIGGRAPH 2004 Sketches* (p. 14).
4. Reeves, W. T. Particle systems – A technique for modeling a class of fuzzy objects. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 17. *Journal of Software* 113 Vol. 10, № 1, 2015, pp. 359-375.
5. Li, D., Meng, H., Shi, X. Membership clouds and membership cloud generators. *Journal of Computer Research and Development*, № 32(6), pp. 15-20.
6. Qiu, X., Liao, F. A fractal evolutionary particle swarm optimizer. *Journal of Computers*, № 8(5), 2013, pp. 1303-1308.
7. K. Garg, S. K. Nayar. Photorealistic rendering of rain streaks. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers. SIGGRAPH '06*. ACM, New York, NY, pp. 996-1002.
8. T. Yoshihiko, K. Kensuke, T. Katsumi. A method for rendering realistic rain-fall animation with motion of view. In *IPSJ SIGNotes Computer Graphics and CAD Abstract*, 2001, pp. 105–005.
9. Z.-X. Feng, M. Tang, J.-X. Dong, S.-C. Chou. Real-time rendering of raining animation based on the graphics hardware acceleration. In *Proceedings of the 9th Int'l Conf. on Computer Supported Cooperative Work in Design*, Vol 2, 2005, pp. 734–739.
10. Paul Fearing. Computer modelling of fallen snow. *SIGGRAPH*, № 27, 2000, pp. 618–625.
11. Mattias Andersson, Hakan Haglund, Anders Hast. Snow accumulation in real-time. *SIGRAD* (2002), 2002. [Electronic resource]: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.146.3757&rep=rep1&type=pdf>.
12. Современная географическая наука. Атмосферные осадки. [Электронный ресурс]: http://www.geoglobus.ru/info/review28/physiography_002.php
13. География. Свойства снежного покрова. [Электронный ресурс]: <http://www.geoknow.ru/dmws-993-1.html>
14. Система частиц. [Электронный ресурс]: http://library.kiwix.org/wikipedia_ru_all_09_2013/A/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%86.html
15. Основы геометрического моделирования в Unity3d : методические указания / сост.: З. В. Степчева, О. С. Ходос. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 33 с.
16. Федорищев Л.А. Мультитекстурирование с помощью шейдеров. // *Программные продукты и системы*, № 1, 2013, pp. 58-61.

Карабчевський В.В., Лунтовська А.А. Реалістична візуалізація атмосферних опадів у додатках реального часу. Стаття присвячена питанню візуалізації атмосферних опадів при моделюванні природних сцен в режимі реального часу. Розглянуті методи моделювання опадів та їх взаємодії з оточуючим середовищем. Запропонована реалізація на основі системи частинок, а також способи зменшення витрат обчислювальних ресурсів без суттєвої втрати реалістичності зображення

Ключові слова: явища природи, атмосферні опади, система частинок, візуалізація в режимі реального часу, моделювання на основі фізичних властивостей

Karabchevskiy V., Luntovskaya A. Realistic precipitation visualization in real-time applications. This paper is devoted to the real-time visualization of atmospheric precipitation in natural scenes. Article contains a review of precipitation simulation methods and methods of modeling precipitation interaction with an environment. Natural scenes simulation is one of the main directions in computer graphics research. Number of studies devoted to improve realism of natural phenomena visualization and rendering speed in dynamic natural scenes is growing every year. These questions are especially relevant in game development where realistic game environment often becomes the main criteria of game success. If talking about real-time games, rendering of weather events such as atmospheric precipitation should find a balance between realism and rendering speed. A huge number of raindrops and snowflakes is a heavy burden for computer calculation. In addition, every drop has many properties, such as size, weight, speed, acceleration etc. Therefore, a realistic and effective representation of scenes with precipitation by increasing the rendering speed and reducing computational expense is not an easy task. The goal of this article is to explore methods and algorithms of atmospheric precipitation simulation and to find the optimal ratio of realistic imaging of precipitation in real time and computational expense. Rendering method proposed in the article is based on the particle system usage. Simulation process is accelerated by using methods of texture mapping and multitexturing, running on the graphics processing unit. Precipitation simulation is made in view of its physical properties, which are also discussed in the article. Obtained modeling results will be used to create dynamic real-time gaming environment.

Keywords: natural phenomena, precipitation, particle system, real-time rendering, physically based modeling

Стаття поступила в редакцію 20.09.2015
Рекомендована к публікації д-ром техн. наук В.Н. Павльшом