

АДАПТАЦИЯ ПОЛИГОНАЛЬНОЙ СЕТКИ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Удалов А.Д., Панов А.В.

МИРЭА - Российский технологический университет, 119454, Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78, e-mail: a.d.udalov@outlook.com

В данной статье рассматривается метод адаптации полигональной сетки, который позволяет осуществлять визуализацию широкого спектра физических материалов и объектов от абсолютно упругих твердых тел до высокопластичных вязких жидкостей. Данный метод является комбинацией симуляции методом конечных элементов, динамической адаптации полученной сетки в зависимости от остаточных напряжений объекта и действия внешних сил и алгоритма полной перестройки сетки в соответствии с информацией о равновесном состоянии объекта.

Ключевые слова: визуализация, упругая деформация, пластическая деформация, трехмерная графика, полигональная сетка, метод конечных элементов.

MESH ADAPTATION FOR ELASTOPLASTIC DEFORMATION VISUALIZATION

Udalov A.D., Panov A.V.

MIREA - Russian Technological University, 119454, Moscow, 78 Vernadskogo Avenue, Russia, e-mail: a.d.udalov@outlook.com

This article explores a polygonal mesh adaptation method that allows to implement the visualisation of a broad range of physical materials and objects, from perfectly elastic bodies to highly viscous liquids. The method is a combination of the simulation by the finite element method, the dynamic mesh adaptation depending on the residual stresses of an object and external forces, and the algorithm of remeshing from scratch based on equilibrium state of an object.

Keywords: visualization, elastic deformation, plastic deformation, 3D graphics, mesh, finite element method.

Введение

Задача визуализации различных физических явлений является комплексной задачей по представлению различных вариантов воздействия и взаимодействия физических сил, явлений и законов различных областей физики. Ее решение включает в себя как моделирование самих физических процессов, так и решения проблем корректного отображения результатов моделирования. В базовом случае визуализация упругопластических деформаций является представлением изменения формы абсолютно упругих физических тел, но таких объектов не существует в реальном мире, поэтому симуляция пластичности является одним из самых важных элементов реалистичной визуализации.

Методы решения задачи визуализации деформаций

В настоящее время для решения задачи визуализации таких физических явлений, как разрушение, упругая, упругопластическая или пластическая деформация, то есть процессов, при которых полигональная сетка объекта изменяется с течением времени, наибольшей популярностью пользуется метод конечных элементов.

Существует несколько методов решения задачи визуализации упругопластических деформаций. Для визуализации упругих и слабопластичных объектов обычно применяется метод конечных элементов [2]. В базовом случае метод конечных элементов ограничен пространством возможных деформаций, обусловленных начальной полигональной сеткой. При визуализации умеренных деформаций не сложно создать модель с приемлемым разрешением, достаточным для представления физических процессов, происходящих с объектом, и в то же время обеспечить удовлетворительную производительность перестройки полигональной сетки. Однако, для визуализации значительных деформаций, представляющих собой скручивание, изгиб или растяжение, необходимо использовать очень мелкую полигональную сетку для корректного взаимодействия деформированных и недеформированных частей визуализируемого объекта, что требует использования большого количества вычислительных ресурсов. Особенно затратным этот метод является в случае, когда

заранее неизвестно в каких местах и насколько мал должен быть размер сетки для приемлемого качества визуализации. Помимо прочего, этот метод обладает низкой вычислительной устойчивостью в случае симуляции больших пластических деформаций. Существуют алгоритмы повышения вычислительной устойчивости, например использование мультипликативной модели, но они позволяют визуализировать существенно ограниченные деформации.

При решении задачи для сильно пластичных объектов, например вязкоупругих жидкостей, часто используются алгоритмы расчета деформации на основе метода Эйлера, которые реализуются, помимо прочего, через преобразования координат из мирового пространства в локальное пространство объекта, что приводит к существенному накоплению вычислительных ошибок, которые становятся хорошо видимыми при визуализации менее пластичных объектов [4].

Другим подходом визуализации упругопластических деформаций является применение метода Лагранжа в комбинации с алгоритмом полного обновления полигональной сетки с нуля при необходимости [1]. Преимущество такого подхода в том, что в нем учитываются остаточные механические напряжения объекта, то есть при отсутствии действия внешних сил при достижении объектом своей равновесной формы, сохранение внутренних механических напряжений позволит более корректно провести последующую визуализацию будущего действия внешних сил. Недостатком является существенная искусственная диффузия, благодаря которой могут появляться визуальные артефакты в абсолютно или сильно упругих частях визуализируемого объекта.

При визуализации поведения жидкости обычно используется уравнение Эйлера для описания гидродинамики на тетраэдральной сетке. Для таких расчетов необходимо часто перестраивать сетку с нуля, что может приводить к появлению искусственной диффузии в жидкости, возникающей из-за повторной выборки. Существуют методы предотвращения появления искусственной диффузии, которые учитывают объем и момент инерции жидкости, например метод, основанный на материальных точках [3].

Для решения вышеперечисленных проблем можно использовать метод динамической адаптации полигональной сетки. За счет динамического построения сетки данный метод позволяет визуализировать физические объекты в различных состояниях – от абсолютно упругого твердого тела до высокопластичных вязких жидкостей, при этом сохраняя высокое качество сетки и ограничивая накопление и распространение вычислительных ошибок.

В рассматриваемом методе динамической адаптации сетки используется стандартная для решения подобных задач тетраэдральная модель, то есть весь объем визуализируемого объекта разбивается на неструктурированные тетраэдры, при этом видимой частью является только совокупность внешних граней множества тетраэдров, также называемая полигональной сеткой. Количество тетраэдров определяется эмпирически исходя из требований качества визуализации и затраченных вычислительных ресурсов.

В рамках данного метода для каждого визуализируемого объекта создается и используется две отдельные тетраэдральные сетки: одной в локальном пространстве объекта и одна в мировом пространстве, которые имеют одинаковую топологию. Для описания сетки, уравнения движения, мер деформации и тензора напряжения используется модель Лагранжа. Локальная сетка меняет свой вид при визуализации упругих деформаций, но изменяется при пластических. За счет модификации локальной сетки для измененных тетраэдров, упругие части визуализируемого объекта не меняют свою равновесную форму. Адаптация производится на минимально возможном количестве тетраэдров для сокращения накопления вычислительных ошибок.

Перестройка сетки при необходимости происходит как в локальном, так и в мировом пространстве. Хотя абсолютно упругие деформации не изменяют сетку в локальном пространстве, при сильных пластических деформациях какой-либо части объекта может потребоваться адаптация сетки упругих частей объекта для корректного представления всего объекта. Также, в процессе перестройки сетки для экономии затрачиваемых вычислительных ресурсов сетка укрупняется там, где это оправданно. Кроме того, значения деформаций и напряжений, хранящиеся в сетке, при перестройке переносятся на новую сетку, из-за чего неизбежно накопление ошибок интерполяции, поэтому вызов полной перестройки сетки используется максимально редко, основная работа по изменению сетки происходит в рамках ее адаптации. Также, сохраняется исходная форма объекта, чтобы в процессе расчетов была информация об истинном множестве координат тетраэдральной сетки объекта в равновесной форме для корректной перестройки сетки.

Комбинация алгоритмов визуализации упругих деформаций, локальной динамической адаптации тетраэдральной сетки и полной перестройки сетки позволяет визуализировать широкий спектр физических объектов от абсолютно упругих твердых тел до вязких жидкостей.

Дальнейшим улучшением рассматриваемого метода является добавление алгоритмов улучшения адаптированной сетки, так называемых алгоритмов очистки, то есть проведения таких преобразований с

полученной сеткой, которые будут заменять локальные группы тетраэдров на другие тетраэдры лучшего качества с уменьшением количества тетраэдров в группе. В качестве таких алгоритмов можно использовать различные алгоритмы сглаживания вершин и удаления ребер [5].

Пример визуализации методом динамической адаптации полигональной сетки представлен на рисунке 1. На примере представлено взаимодействие пластичного стержня с высоким коэффициентом упругости и абсолютно упругого тора.

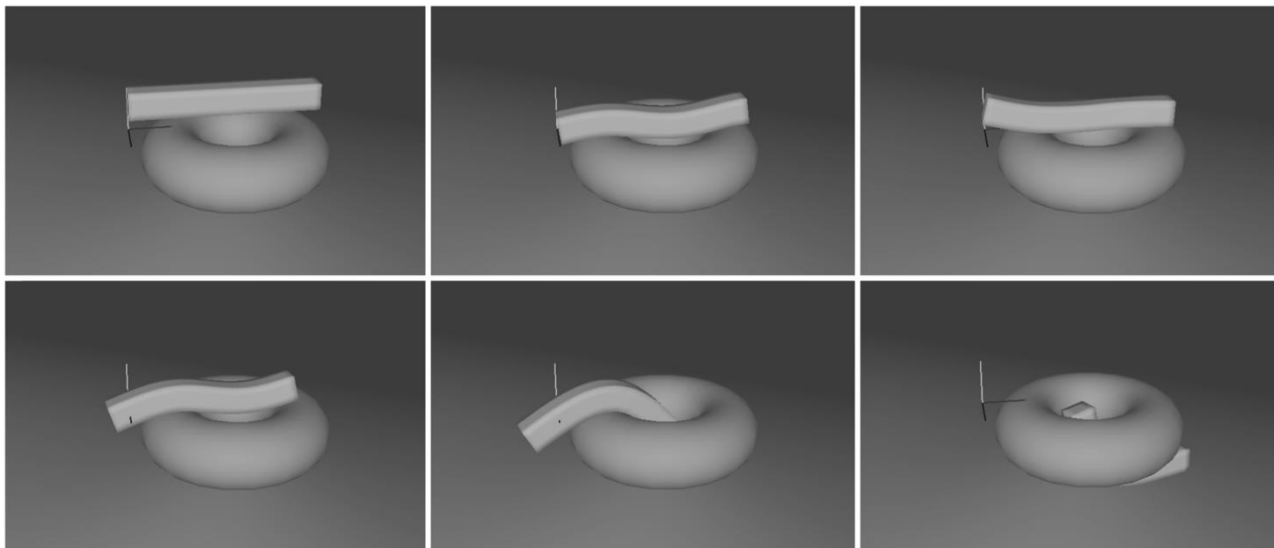


Рисунок 1 – Пример визуализации методом динамической адаптации полигональной сетки

Алгоритмы оптимизации адаптивной сетки

Большим недостатком предложенного метода, как и классических методов решения задачи визуализации углепластических деформаций, например метода конечных элементов, или метода, основанного на материальных точках, является его большая вычислительная ресурсоемкость. Данные методы не позволяют осуществлять визуализацию за приемлемое время при решении с помощью общедоступных вычислительных машин. Для решения этой проблемы имеет смысл применять различные методы оптимизации.

Самым очевидным алгоритмом оптимизации является сокращение количества вычисляемых тетраэдров в сетке. Этого можно достигнуть несколькими способами: общим уменьшением числа тетраэдров во всей сетке, то есть ее укрупнение, и уменьшением значения адаптации сетки. При уменьшении числа тетраэдров во всей сетке велика вероятность появления визуальных артефактов, что резко негативно скажется на качестве визуализации. Такой подход оправдано применять в случае слабого действия внешних сил на визуализируемый объект, тогда значения деформаций будут малы, и форма объект практически не будет меняться, в следствие чего качество визуализации будет зависеть только от качества изначальной полигональной сетки. Также, этот подход будет эффективным при визуализации нескольких физических объектов в рамках одной сцены и применении алгоритмов видозависимой детализации объекта [6]. В таком случае в ситуациях, когда объект размещен на заднем плане, можно пожертвовать качеством его полигональной сетки для экономии вычислительных ресурсов на визуализацию более важных объектов.

Другим способ оптимизации является использование графических ускорителей. Это возможно при решении рассматриваемой задачи по нескольким причинам: расчет результата приложения физических сил, а именно гравитационных, сил упругости и механического напряжения можно осуществлять параллельно для каждого элемента тетраэдральной сетки объекта. То есть исходную задачу можно разбить на меньшие простые подзадачи применения тензора деформации к тетраэдру, а также задачу агрегации полученных результатов и их отображения. Другой причиной является то, что полученные при разбиении подзадачи являются относительно простыми, и при их решении будет использоваться минимальное количество условных переходов и циклов, что является одним из критериев эффективности использования графических ускорителей [7]. За счет аппаратных особенностей графических ускорителей, а именно существенно большего количества вычислительных ядер, чем у центрального процессора, с помощью них эффективнее решать множество относительно простых задач, коими и являются рассматриваемые подзадачи. В случае использования этого метода возникает проблема распределения задач между центральным и графическим процессором. Для решения этой проблемы необходимо

разработать алгоритм диспетчера задач, который будет выполнять работу по вызову подпрограмм, выполняемых с помощью графического процессора. В связи с тем, что графический процессор может оперировать данными только из собственной памяти, диспетчеру задачи также необходимо заниматься подготовкой, наполнением и очисткой входных буферов памяти графического процессора, а также записью данных из его выходных буферов в оперативную память вычислительной машины, на которой он запущен, для дальнейшей работы других компонентов информационной системы.

Исходя из этого визуализация с помощью метода адаптации полигональной сетки состоит из следующих подзадач:

1. Определение начальных условий и построение стартовой сцены визуализации.
2. Построение видимой полигональной и невидимой тетраэдральной сетки для каждого объекта сцены исходя из его равновесной формы и отсутствия действия внешних сил.
3. Вызов подпрограммы графического процессора по расчету применения тензора деформации к каждому тетраэдру в сетке каждого объекта.
4. Получение и агрегация результатов выполнения подпрограмм.
 - a. в случае необходимости вызов процедуры адаптации сетки для необходимых тетраэдров.
 - b. в случае необходимости вызов процедуры полной перестройки сетки для объекта.
5. Изменение видимой полигональной сетки в соответствии с результатами применения физических сил к тетраэдральной сетке.
6. Выполнение алгоритмов улучшение полигональной сетки с целью оптимизации количества полигонов.

Для выполнения вычислительных задач на графическом процессоре, то есть произвольных подпрограмм, а не задач по обработке трехмерных или двумерных изображений существует несколько популярных технологий. Две основные из них – это технологии CUDA и OpenCL, преимуществами первой является использованием аппаратных особенностей графических ускорителей NVidia, а главным преимуществом OpenCL является большое количество поддерживаемых аппаратных архитектур и платформ.

Заключение

Таким образом, представленный метод адаптации полигональной сетки позволяет создавать визуализацию приемлемого качества различных физических объектов от абсолютно упругих твердых тел до высокопластичных вязких жидкостей. Данный метод является комбинацией симуляции методом конечных элементов, динамической адаптации полученной сетки в зависимости от остаточных напряжений объекта и действия внешних сил и алгоритма полной перестройки сетки в соответствии с информацией о равновесном состоянии объекта. Рассматриваемый метод позволяет использовать различные алгоритмы, улучшающие качество визуализации, а также разнообразные алгоритмы оптимизации, такие как использование видозависимой детализации объекта, или выполнение определенной части решаемых задач на графическом ускорителе.

Список литературы

1. Голованов А.И. Моделирование больших упругопластических деформаций оболочек. Теоретические основы конечно-элементных моделей // Проблемы прочности и пластичности. — 2010. — № 72. — С. 5-17.
2. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Учебное пособие. Часть 1. Н.Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2012. 71 с.
3. Guo Q. The Material Point Method for Solid and Fluid Simulation [Электронный ресурс] / escholarship.org - Режим доступа: <https://escholarship.org/uc/item/0379b41t> // (дата обращения: 08.04.2021).
4. Goktekin T. G., Bargaiteil, A. W., O'Brein, J. F. A method for animating viscoelastic fluids // ACM Transactions on Graphics. — 2004. № 23. — P. 75-85.
5. Wojtan C., Thurey N., Gross M., Turk G. Deforming meshes that split and merge // ACM Transactions on Graphics. — 2009. № 28. — P. 1-10.
6. Плессер П.Л., Ильинский Н.И. Видозависимая тесселяция 3D-объектов как инструмент управления динамическим уровнем детализации // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2011. — № 3. — С. 81-87.
7. Удалов А.Д., Панов А.В. Применение графического ускорителя для оптимизации решения задач визуализации в реальном времени с использованием Unity // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. — 2020. — С. 169-170.

1. Golovanov A.I. Modeling large elastic-plastic deformations of shells. Theoretical foundations of finite element models // Problems of strength and plasticity. — 2010. — № 72. — P. 5-17.
2. Makovkin G.A., Likchacheva S.Y. Application of FEM to solving problems of solid mechanics. Part 1. N.Novgorod: NNGACU, 2012. 71 p.
3. Guo Q. The Material Point Method for Solid and Fluid Simulation / escholarship.org - Available at: <https://escholarship.org/uc/item/0379b41t> // (accessed 13 March 2021).
4. Goktekin T. G., Bargteil, A. W., O'Brein, J. F. A method for animating viscoelastic fluids // ACM Transactions on Graphics. — 2004. № 23. — P. 75-85.
5. Wojtan C., Thurey N., Gross M., Turk G. Deforming meshes that split and merge // ACM Transactions on Graphics. — 2009. № 28. — P. 1-10.
6. Plesser P.L., Ilyinsky N.I. Species-dependent tessellation of 3D objects as a tool for managing the dynamic level of detail // Information technologies in design and production. — 2011. — № 3. — P. 81-87.
7. Udalov A.D., Panov A.V. The use of a graphics accelerator to optimize the solution of visualization problems in real time using Unity // Priority areas of innovation in industry. — 2020. — P. 169-170.