

УДК 004.925.8

Д.Г. ШОВГЕЛЯ, Н.О. СОКОЛОВА

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ HALF-EDGE DATA STRUCTURE

Цифровые трехмерные модели являются ключевыми компонентами в большом количестве промышленных и научных секторов, таких как разработка и производство продукции, игр и имитационного моделирования, культурное наследие и археология, медицина, биоинформатика и фармацевтические науки. В большинстве случаев визуализация является лишь одним из многих этапов, составляющих жизненный цикл цифровой 3D-модели, которые анализируются и обрабатываются с помощью передовых алгоритмов, которые обычно имеют жесткие требования к качеству и целостности входных данных. На практике (например, при 3D-печати) эти требования часто не удовлетворяются в моделях, которые происходят из разных источников. Таким образом, адаптация несовершенных 3D-моделей к указанным требованиям имеет большое значение. Данная работа посвящена исследованию проблем связанных структур данных, а также возможностей обнаружения дефектов при манипуляции полигональными 3D-сетками, построенными на основе Half-Edge Data Structure. Инструментом исследования является библиотека с исходным кодом OpenMesh, реализующая исследуемую структуру данных. Основное внимание этой статьи направлено на выявление сингулярных (комплексных) дефектов, что являются первопричинным источником несогласованности связей между элементами, которые не могут быть воссозданы из-за ограничений внутренней топологии структуры данных, и приводят к образованию дефектов нового типа. Проводимые исследования направлены на разработку и реализацию алгоритма, использование которого позволит создавать модели из исходных данных со всеми присущими в них дефектами, без образования новых дефектов, нехарактерных для создаваемой модели. Предложенные алгоритмы позволяют производить анализ модели на наличие дефектов, что ранее не поддерживались данной структурой, а также реализовать обобщенные алгоритмы для восстановления мешей, которые описаны в этой статье. Результаты апробации рассматриваемых методов подтвердили эффективность предложенных алгоритмов при обнаружении дефектов. Для сравнительной оценки разработаны соответствующие инструменты и приведен результат их работы.

Ключевые слова: полигональные сетки, Half-Edge Data Structure, 3D-моделирование, дефекты.

Д.Г. ШОВГЕЛЯ, Н.О. СОКОЛОВА

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ТРИВИМІРНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЯХ, ЯКІ ПОДАНІ НА ОСНОВІ HALF-EDGE DATA STRUCTURE

Цифрові тривимірні моделі є ключовими компонентами у великій кількості промислових і наукових секторів, таких як розробка та виробництво продукції, ігор та імітаційного моделювання, культурна спадщина та археологія, медицина, біоінформатика та фармацевтичні науки. У більшості випадків візуалізація є лише одним

із багатьох етапів, з яких складається життєвий цикл цифрової 3D-моделі, яка аналізується і обробляється з використанням передових алгоритмів, які зазвичай мають жорсткі вимоги до якості та цілісності вхідних даних. На практиці (наприклад, у 3D-друці) ці вимоги часто не задовольняються в моделях, що надходять з різних джерел. Таким чином, адаптація недосконалих 3D-моделей до вказаних вимог має велике значення. Дана робота присвячена дослідженню проблем зв'язаних структур, а також можливостям виявлення дефектів при маніпулюванні полігональними 3D сітками, побудованими на основі Half-Edge Data Structure. Інструментом дослідження є бібліотека з вихідним кодом OpenMesh, яка реалізує досліджувану структуру даних. Основна увага в цій статті приділяється виправленню синхронних (складних) дефектів, які є первинними джерелами невідповідності зв'язків між елементами, які не можуть бути обрані з обмежених внутрішніх топологій структури даних, і призводять до утворення дефектів нового типу. Проводяться дослідження з розробки та реалізації алгоритму, використання якого дозволить створити модель з вихідних даних з усіма дефектами, без утворення нових дефектів без змін для створення моделі. Запропоновано алгоритми, що дозволяють аналізувати моделі на наявність дефектів, які раніше не підтримувалися цією структурою, а також реалізувати алгоритми відновлення мешей, описані в цій статті. Результати досліджень методів, які розглядаються, підтвердили ефективність запропонованих алгоритмів у виявленні дефектів. Для порівняльної оцінки розроблені відповідні інструменти та наведені результати їх роботи.

Ключові слова: полігональні сітки, Half-Edge Data Structure, 3D-моделювання, дефекти.

D.H. SHOVELIA, N.O. SOKOLOVA
Oles Honchar Dnipro National University

DETECTION OF DEFECTS IN THREE-DIMENSIONAL GEOMETRIC MODELS THAT ARE PRESENTED ON THE BASIS OF HALF-EDGE DATA STRUCTURE

Digital 3D models are key components in a large number of industrial and scientific sectors, such as product development and production, gaming and simulation, cultural heritage and archeology, medicine, bioinformatics and pharmaceutical sciences. In most cases, visualization is just one of many stages that comprise the lifecycle of a digital 3D model, which are analyzed and processed using advanced algorithms that typically have stringent requirements for the quality and integrity of input data. In practice (for example, with 3D printing), these requirements are often not met in models that come from different sources. Thus, adaptation of imperfect 3D models to such requirements is of great importance. This paper is devoted to the study of the problems of connected data structures, as well as the possibilities of detecting defects when manipulating polygonal 3D grids constructed on the basis of the Half-edge data structure. The research tool is the OpenMesh source library, which implements the research data structure. The main attention of this article is directed at the identification of singular (complex) defects, which are the primary source of inconsistency between the elements that can not be recreated because of the limitations of the internal topology of the data structure and lead to the formation of defects of a new type. The conducted researches are directed on development and realization of the algorithm, the use of which will allow to create models from the initial data with all inherent defects in them, without creating new defects uncharacteristic

for the created model. The proposed algorithms will allow to analyze the model for the presence of defects that were not previously supported by this structure, as well as implement the generalized mesh recovery algorithms that are described in this article. The results of approbation of the considered methods confirmed the effectiveness of the proposed algorithms in detecting defects. For a comparative assessment, appropriate tools are developed and the result of their work is presented.

Keywords: polygal networks, Half-Edge Data Structure, 3D-modeling, defects.

Постановка проблемы

3D-печать является одной из самых быстроразвивающихся технологий, которая захватила большое число сфер жизнедеятельности человека и стала незаменимым их ядром, в частности, таких как архитектура, медицина, машиностроение и прочие. Основой для 3D-печати является модель. Примитивные модели не могут отобразить все разнообразие печатаемой продукции, а моделирование более сложных моделей на основе простейших может вызвать ряд дефектов, что приведет к невозможности существования такой модели в реальном мире, поэтому актуальным есть вопрос о своевременном обнаружении таких дефектов.

Анализ последних исследований и публикаций

Для моделирования объектов используют специализированные CAD системы, каждая из которых базируется на той или иной внутренней структуре представления модели, и при попытке переноса объекта из одной системы в другую, изменение их представления может быть абсолютно непредсказуемо, что ведет к возникновению топологических дефектов, которые преобразуются в геометрические дефекты [4], без каких-либо возможностей их идентификации. Подобная ситуация недопустима, так как приводит к нарушению целостности печатаемого объекта.

Наряду с моделированием объекта "с нуля" при 3D-печати применяют метод трехмерного сканирования, что позволяет "переносить" объекты реального мира в компьютерную систему. Однако такой подход может сопровождаться множеством дефектов, которые по большей части классифицируются как геометрические.

Marco Attene и др. [1] провели детальный анализ имеющихся алгоритмов по восстановлению всех типов дефектов для полигональных сеток и разделяют их по эффективности.

Wang Zengbo в своей статье [5] приводит алгоритмы по быстрому восстановлению треугольных сеток, что импортируются из STL файлов.

Jixin Tan и Jianxun Chen в своих исследованиях [2] описывают обобщенные алгоритмы для устранения сингулярных дефектов. Описанный ими подход предполагает разделение моделей, соединенных сингулярными вершинами или комплексными ребрами, на два независимых объекта.

Однако следует учесть тот факт, что Half-Edge Data Structure из-за своей топологии не позволяет создавать сингулярные дефекты, что приводит к образованию дефектов другого типа и невозможности определения начальных.

Цель исследования

Цель данной работы – описание разработанного метода, позволяющего определять сингулярные дефекты на Half-Edge Data Structure, которые возникают при трансфере моделей между различными CAD системами или моделировании сложных объектов. Метод не должен нарушать общий принцип топологии в структуре, а также влиять на ее эффективность. Для этого были разработаны алгоритмы дополнения уже имеющейся

<https://doi.org/10.32782/2618-0340-2019-3-14>

структуры данных с возможностью сохранения связей между сингулярными элементами и целостности неманифолдных мешей.

Изложение основного материала исследования

OpenMesh – это общая и эффективная структура данных для представления и манипулирования полигональными сетками. OpenMesh разработана в группе Computer Graphics, RWTH Aachen, и была профинансирована Министерством образования и науки Германии (BMBF).

Она была разработана с учетом следующих целей:

- *Гибкость*: обеспечивает основу для множества различных алгоритмов без необходимости адаптации.
- *Эффективность*: максимальная экономия времени при минимальном использовании памяти.
- *Простота использования*: оберните сложную внутреннюю структуру в простой в использовании интерфейс.

Half-Edge Data Structure (рис. 1) базируется на принципе расщепления ребра на две разнонаправленные половины. Каждая из таких половин является базовым элементом и хранит в себе топологию, что позволяет манипулировать полигональной сеткой. Согласно определению данной структуры [3], модель не должна содержать сингулярных вершин и/или комплексных ребер, поскольку создание связи между такими элементами невозможно при базовой интерпретации.

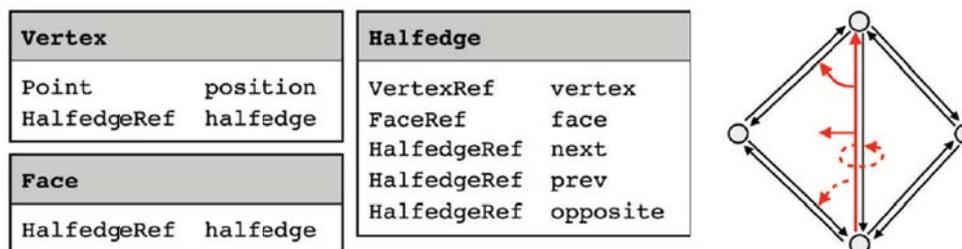


Рис. 1. Программная реализация Half-Edge Data Structure.

Сингулярные дефекты зачастую возникают в следующих ситуациях:

1. Процесс сворачивания вершин (рис. 2).
2. Булевы операции над объектами (рис. 3).
3. Ошибки алгоритмов тесселяции (огранки твердотельной модели).
4. Изменение структуры представления с более примитивной (вершинное представление) на более сложную (Half-Edge Data Structure).
5. Устранение дубликатов в тривиальных структурах данных.

При наличии подобных дефектов, дальнейший анализ такой модели покажет наличие дефектов, которых попросту не было в исходном объекте. Зачастую к ним относятся дыры и островные элементы, поскольку в основе каждой CAD системы лежит принцип сохранения исходной информации, что, в случае неудачного создания элемента, приведет к его отсоединению от цельной модели (рис. 4а).

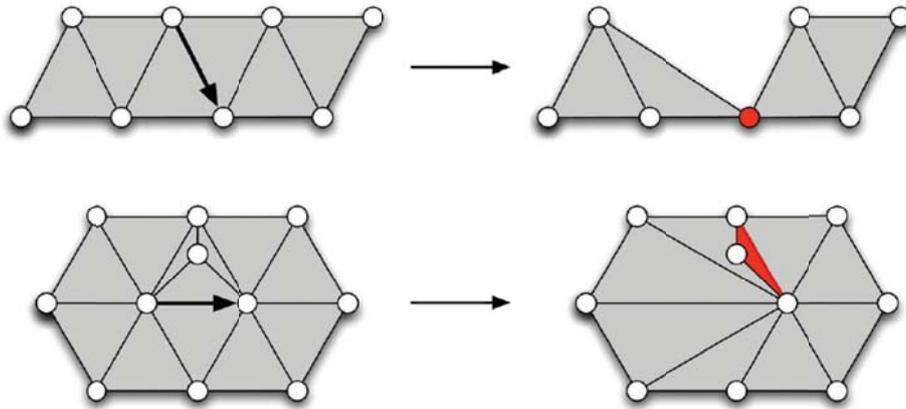


Рис. 2. Возникновение сингулярных дефектов в процессе сворачивания вершин.

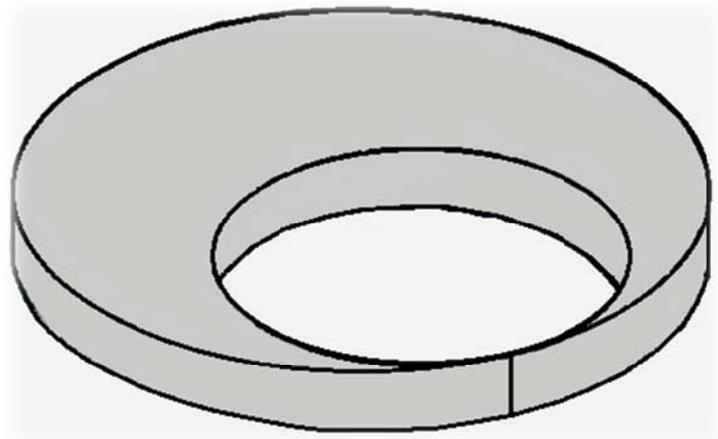


Рис. 3. Возникновение сингулярных дефектов в результате булевых операций над твердотельными объектами.

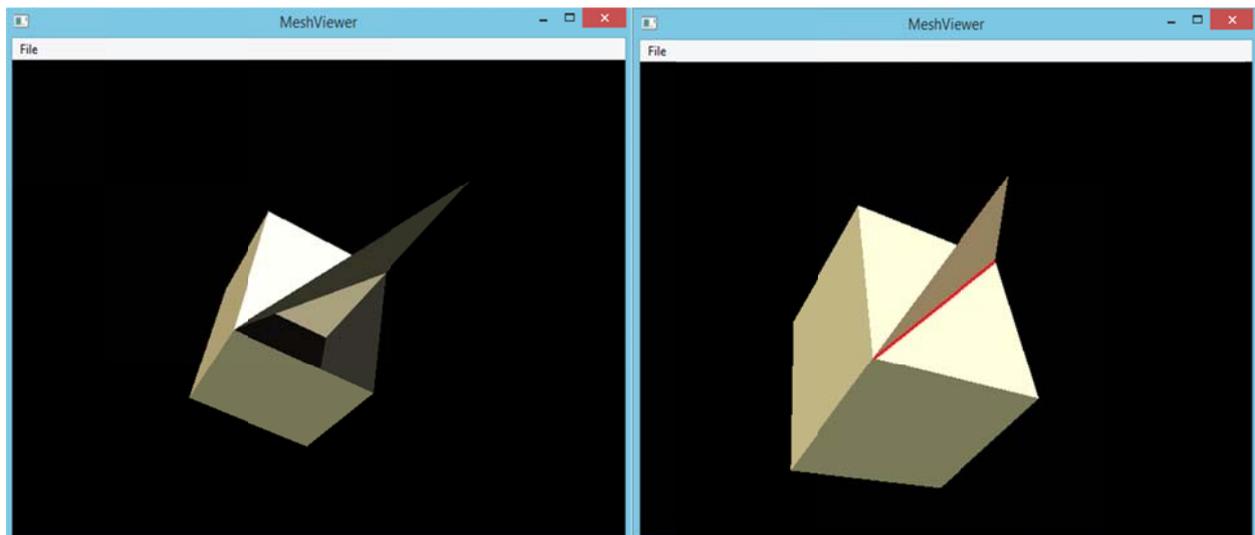


Рис. 4. Результат создания модели, которая содержит сингулярное ребро, при помощи:
а) классической реализации Half-Edge Data Structure, б) Half-Edge Data Structure и реализованным мостом.

Для обеспечения целостности и предоставления возможности последующего анализа модели необходимо обеспечить связь между сингулярными элементами. Разработанный нами метод предполагает, что исходное ребро будет знать о всех своих претендентах, что позволит итерироваться между ними. В таком случае хранилище будет содержать внешний half-edge каждой грани, соединенной с данным ребром. Каждая пара разнонаправленных half-edge'й может быть использована для формирования базовых отношений. Однако даже нахождение внешнего half-edge в данном контейнере не лишает его свойств граничных элементов, что следует учесть в алгоритмах обхода по границам.

Такой подход позволяет идентифицировать сингулярные ребра на основе алгоритма, предложенного Jixin Tan и Jianxun Chen в своих исследованиях [2] (рис. 4).

Сингулярное ребро зачастую формирует от 3 до 5 граней. Все другие вариации встречаются очень редко. Согласно этому программная реализация поиска пары является тривиальным алгоритмом и не влияет на общую эффективность.

Следует отметить, что данный метод позволяет сохранять связь между полигонами, имеющими разное направление обхода, что согласно базовой интерпретации структуры также является недопустимым из-за особенностей топологии.

Как видно из рис. 4б, в реализации нашего метода при попытке добавить новый треугольник к существующему ребру, что приводит к созданию сингулярного ребра, другие элементы не были отделены от модели, и благодаря мосту, удалось обнаружить этот дефект. Сингулярное ребро выделено красным цветом.

Выводы

Результатом предложенного подхода является сохранение связи в топологии при формировании дефектов на полигональных сетках, что позволяет обнаружить таковые и в тоже время дает возможность осуществления разного рода манипуляций.

Недостатком такого подхода являются большие затраты памяти для хранения связи.

Дальнейшие исследования будут посвящены усовершенствованию алгоритма для обеспечения связи между всеми топологическими элементами и его программной реализации.

Список использованной литературы

1. Attene Marco, Campen Marcel, Kobbelt Leif. Polygon Mesh Repairing: An Application Perspective. *ACM Computing Surveys* (scheduled to appear). 2013. Vol. 45. Issue 2. P. 1–38.
2. Jixin Tan, Jianxun Chen. Research and Application on Model Repairing Algorithm of 3D Modelling Technology. *Proceedings of the 6th International Conference on Mechatronics, Computer and Education Informationization*. Vol. 130 Advances in Intelligent Systems Research. (China, Shenyang, 2016, November 11-13). Amsterdam / Paris: Atlantis Press, 2016. P. 226–231.
3. Botsch Mario, Kobbelt Leif, Pauly Mark at al. *Polygon Mesh Processing*. Natick, Massachusetts: A K Peters, Ltd., 2010. 243 с.
4. Ju Tao. Fixing Geometric Errors on Polygonal Models: A Survey. *Journal of Computer Science and Technology: English*. 2009. Vol. 24. Issue 1. P. 19–29.
5. Zengbo Wang. Fast topological reconstruction algorithm for a STL file. *Journal of Computer Applications*. 2014. Vol. 34. Issue 9. P. 2720–2724.

References

1. Attene, Marco, Campen, Marcel, & Kobbelt, Leif. (2013) Polygon Mesh Repairing: An Application Perspective. *ACM Computing Surveys* (scheduled to appear). **45**, 2, 1–38.
2. Jixin, Tan, & Jianxun, Chen. (2016) Research and Application on Model Repairing Algorithm of 3D Modelling Technology. *Proceedings of the 6th International Conference on Mechatronics, Computer and Education Informationization*. Vol. 130 *Advances in Intelligent Systems Research*. (China, Shenyang, 2016, November 11-13). Amsterdam / Paris: Atlantis Press, pp. 226–231.
3. Botsch, Mario, Kobbelt, Leif, & Pauly, Mark at al. (2010) *Polygon Mesh Processing*. Natick, Massachusetts: A K Peters, Ltd.
4. Ju, Tao. (2009) Fixing Geometric Errors on Polygonal Models: A Survey. *Journal of Computer Science and Technology: English*. **24**, 1, 19–29.
5. Zengbo, Wang. (2014) Fast topological reconstruction algorithm for a STL file. *Journal of Computer Applications*. **34**, 9, 2720–2724.