Реконструкция структурированных изоповерхностей по 3D данным компьютерной томографии

Михаил Михайлович Новожилов
Институт информационных технологий, математики и механики
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
michael.novogilov@gmail.com

Решается задача реконструкции изоповерхностей в трехмерном скалярном поле данных компьютерной томографии с целью их дальнейшей параметризации и персонификации модели в цифровой медицине. Наиболее популярным для реконструкции в виде полигональной поверхности является алгоритм Marching Cubes. В данной работе предлагается реструктурировать результат Marching Cubes и получить изоповерхность в форме регулярной сетки, образованной наборами сечений изоповерхности плоскостями ортогональными осям X,Y,Z. Сетка сечений рассматривается как граф. Выявление топологической структуры полученного графа поверхности (границ, контуров, граней), в том числе анализ нарушений топологии, является этапом алгоритма. Полученный посредством обхода граней двойственный граф позволяет объединять грани в сегменты в соответствие с выбранными критериями минимизации искажений. Исследованы два алгоритма обхода граней: по ребрам и по вершинам. Предложенный алгоритм позволяет за линейное время построить структурированную референсную поверхность, снабженную метрикой кривизны, на которой далее можно строить различные параметризации поверхности. Рассмотрен пример параметризации с использованием криволинейных PN-треугольников.

Ключевые слова: *Компьютерная томография, Marching Cubes, полигональная изоповерхность, цифровая медицина*

Reconstruction of structured isosurfaces by the 3D CT data

Mikhail Novozhilov
Institute of Information Technology, Mathematics and Mechanics
Nizhny Novgorod State University, Nizhni Novgorod, Russia
michael.novogilov@gmail.com

Considered problem of isosurfaces reconstruction in three-dimensional scalar field of computed tomography data for the personification of human models in digital medicine. The most popular for the reconstruction of a polygonal surface is the Marching Cubes algorithm. In this paper proposed to restructure the result of Marching Cubes and get the isosurface in the form of a regular grid formed by sets of cross-sections isosurface by the planes which orthogonal X, Y, Z axes. Cross-sections grid considered as a graph. Identify the topological structure of the surface of the resulting graph (boundaries, contours, edges), including analysis of the topology violations is a step in the algorithm. Obtained by traversing the faces dual graph allows to combine faces to segments in accordance with the selected criteria to minimize distortion. Investigated two faces traversal algorithms: by the vertexes and by the edges. The proposed algorithm allows to build a structured reference surface at linear time, provided with a metric of curvature, on which further can build various surface parameterizations. Considered an example of parameterization using the curved PN triangles.

***Keywords**: computed tomography, Marching Cubes, polygonal isosurface, digital medicine*

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача реконструкции решается в интересах построения персональной геометрической модели органов человека по данным трехмерных медицинских исследований. На вход алгоритма реконструкции поступают данные компьютерной томограммы, представляющие собой значения плотности среды в узлах трехмерной прямоугольной сетки. Используя интерполяцию, можно вычислить значение плотности в точках между узлами. Множество точек с одинаковым значением плотности образуют изоповерхность.

Для полигональной реконструкции изоповерхностей широко используется алгоритм Marching Cubes [1], позволяющий реконструировать поверхность произвольной топологии. Его классическая реализация [2], использующая lookup таблицы для триангуляции вокселя, позволяет получить на выходе набор примитивов поверхности, заданных координатами вершин. Однако, гораздо более интересно получить структурированную каким-либо образом поверхность, которую удобно параметризовать, и управлять затем ее формой, изменяя параметры.

Усовершенствованная версия алгоритма Marching Cubes позволяет получить на выходе треугольники с индексированными вершинами, что даёт информацию о соседних вершинах и инцидентных им примитивах. Таким образом, получаем одно из возможных представлений полигональной поверхности, пригодное для параметризации.

Обзор методов параметризации для полигональных поверхностей приведён в работе [3]. Основная идея данных методов заключается в том, что исходная поверхность разрезается на сегменты для уменьшения её сложности. С увеличением сегментов растут погрешности аппроксимации и падает точность параметризации. Необходим баланс между размером сегментов и погрешностями. Сегментация поверхности может происходить, например, на основе анализа кривизны [4] с учетом упрощения (усложнения) элемента поверхности [5].

Интересным для параметризованной реконструкции является алгоритм [5], позволяющий получать на выходе регулярные сетки (Рис. 1), которые можно рассматривать как граф поверхности. Данный граф, в общем случае, не является планарным. Но любой замкнутый путь, в графе поверхности, делит её на два множества, становясь при этом общей границей этих множеств. Множество, состоящее только из своей границы, будем называть гранью. Поскольку поверхность, в общем случае, не гомеоморфна плоскости, необходима её сегментация. Сегмент представляет собой объединение смежных граней. Для формирования сегмента, необходим двойственный граф, который строится алгоритмами обхода граней. Формирование укрупненных сегментов на такой регулярной сетке весьма удобно для параметризации поверхности, особенно, если построена оценка кривизны в узлах сетки. При этом сетка остается как референсная поверхность для оценки точности параметризации.

2. РЕКОНСТРУКЦИЯ ГРАФА ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривая томограмму как трехмерное скалярное поле заданное на регуляной сетке, мы имеем возможность рассматривать три набора секущих плоскостей, ортогональных осям X, Y и Z. В каждой из этих плоскостей восстанавливаются линии сечений, принадлежащие поверхности. Линии сечений фактически включают в себя подходящие ребра полигонов изоповерхности, получаемой методом Marching Cubes. Точки пересечения линий сечений являются узлами полученного графа поверхности. Алгоритм построения данного графа подробно описан в [6]. На рис. 1, 2 приведены этапы работы данного алгоритма.

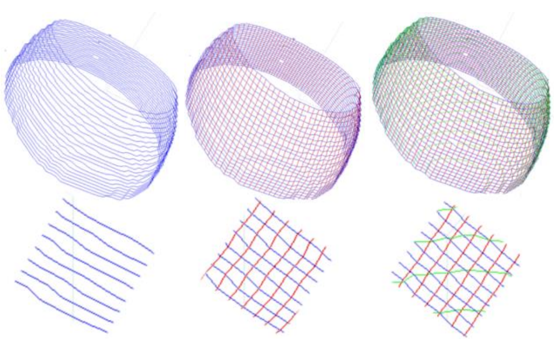

Рис 1: Этапы построения графа поверхности.

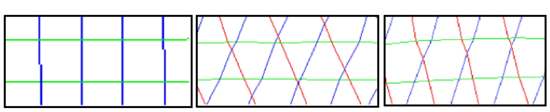

Рис 2: Фрагменты сетки, содержащие 3, 4, 5 и 6-угольники.

3. ОБХОД ГРАНЕЙ ПО ВЕРШИНАМ

Необходимое условие, для работы данного алгоритма – ограниченность степени грани. Минимально возможная степень грани – 3. Покажем, что для графа изоповерхности максимальная степень грани равна 6. Рассмотрим ячейку трёхмерной прямоугольной сетки – куб (поскольку алгоритм базируется на Marching Cubes). Для однозначной реконструкции необходимо, чтобы проходящая через куб поверхность пересекала каждую его грань не более одного раза (Рис. 3).

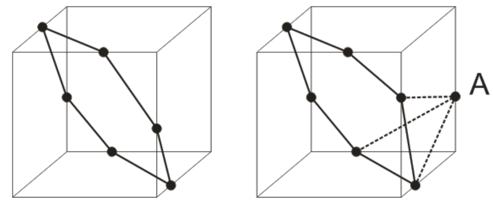

Рис 3: Однозначное прохождение поверхности через куб (слева) и неоднозначное (справа), вызванное появлением точки А.

Таким образом, степень грани графа поверхности ограничивается количеством граней куба. Разрешение неоднозначностей рассматривается отдельно, например, в [2]. Грани, степень которых выше заданной максимальной степени, будем считать внешними. Также, будем считать, что каждая вершина должна иметь не менее трёх соседей.

Алгоритм выполняет построение замкнутых путей. Для этого он строит все пути фиксированной длины $L = 3$ из текущей вершины v, и помечает замкнутые. Для этой операции введём понятие идентификатора грани I для вершины v_i и двух её соседних вершин, принадлежащих грани:

$$I: \{(v_{i-1}, v_i, v_{i+1})\} \to N$$

Где i – номер вершины грани. Таким образом, когда алгоритм обнаруживает замкнутый путь, он помечает каждую его вершину уникальным идентификатором грани. После этого рассматриваются пути длиной $L + 1$ и так далее до максимальной степени грани.

Каждая вершина содержит список инцидентных ей граней. Когда их количество совпадает с количеством соседних вершин, вершина помечается как обработанная. При поиске замкнутого пути, для предотвращения повтора, необходимо проверять идентификатор грани вершин.

Поиск замкнутых путей с возрастающей длиной гарантирует нахождение правильных граней, инцидентных вершине v. Однако, если v принадлежит внешней грани, то возможен замкнутый путь, не совпадающий с ней. Но в этом случае, хотя бы одна вершина пути минимальной длины будет содержать идентификатор грани, инцидентной вершине v, что можно показать для произвольной окрестности вершины (Рис. 4).

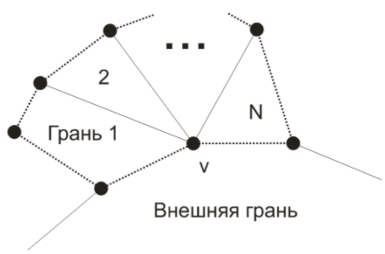

Рис 4: Путь минимальной длины, проходящий через вершину v и её соседние вершины, но не совпадающий с внешней гранью

Алгоритм выполняет обход граней для каждой вершины один раз, следовательно, его сложность линейно зависит от количества вершин. Однако для каждой вершины выполняется перебор путей с проверкой на замкнутость, таким образом, для каждой вершины получаем сложность C^M, где C – максимальная степень вершины и M – максимальная степень грани. Данная трудоёмкость может плохо сказаться на производительности с увеличением M. Далее в таблице приводится время полной реконструкции для данного алгоритма, с максимальной длиной пути 6 (процессор Intel Core i7 3820 3.6 GHz, 8Gb RAM):

Количество вершин	Время (сек.)
40617	1.72452
83458	2.90716
118574	4.05437
176668	5.54842
259546	7.81929
300297	9.38676

4. ОБХОД ГРАНЕЙ ПО РЁБРАМ

Поскольку граф поверхности образован путём объединения ломаных в ортогональных плоскостях, его рёбра можно разделить на три типа: лежащие на плоскости, ортогональной оси X, Y или Z. Как было показано в разделе 3, рёбра грани графа лежат на гранях некоторого куба. Следовательно, граничное ребро будет принадлежать одному кубу, внутреннее – двум. Данные геометрические свойства можно использовать для оптимизации обхода граней.

Таким образом, для полученного графа поверхности отсутствует необходимость перебора соседей для каждой вершины. Достаточно рассмотреть каждое ребро один раз. Исходя из координат его вершин и шага сетки, выполняется построение двух кубов, на общей грани которых лежит данное ребро графа. Далее выбираются ребра, входящие в рассматриваемый куб. Они образуют, в последствие, замкнутый путь.

Для предотвращения повтора, аналогично алгоритму в разделе 3, для вершин полученной грани необходимо проверять идентификатор.

Аналогично алгоритму из раздела 3, сложность данного алгоритма линейно зависит от числа вершин. Однако вершины в данном алгоритме будут обрабатываться быстрее:

Количество вершин	Время (сек.)
40617	1.56572
83458	2.53168
118574	3.48609
176668	4.70937
259546	6.21409
300297	7.35757

5. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Получив двойственный граф поверхности, появляется возможность формировать сегменты поверхности посредством группировки смежных граней. Для этого можно использовать критерии, позволяющие минимизировать искажения при отображении сегмента на область плоскости [3].

В данной работе для повышения производительности сегментации предлагается использовать сегменты, образованные при сечении поверхности плоскостями (Рис. 5).

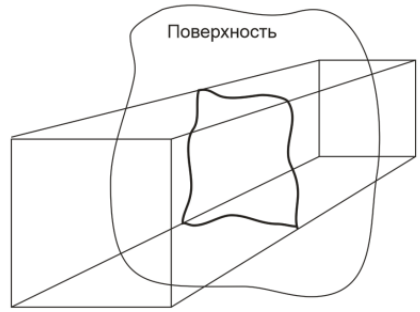

Рис 5: Сегмент, образованный секущими плоскостями

В качестве критерия для формирования сегмента можно использовать кратность номера секущей плоскости, оценку кривизны и количество ограничивающих плоскостей. При несоблюдении критерия, выполняется подразбиение текущей области посредством уменьшения кратности.

Использование сегментов, ограниченных тремя или четырьмя плоскостями, наиболее удобно для отображения сегмента на область плоскости (Рис. 6).

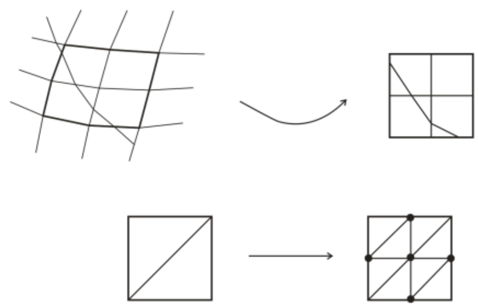

Рис 6: Отображение сегмента на плоскость и его подразбиение

Поскольку в каждом узле графа известна нормаль к поверхности, крупный сегмент параметризуется в барицентрических координатах с помощью аппарата криволинейных PN-треугольников [7].

Данная параметризация может быть использована, например, для управления уровнем детализации посредством подразбиения (Рис. 6).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен алгоритм решения задачи реконструкции изоповерхностей в трехмерном скалярном поле данных компьютерной томографии с целью их дальнейшей параметризации. Алгоритм основан на реструктуризации результата Marching Cubes с тем, чтобы получить изоповерхность в форме регулярной сетки, образованной наборами сечений изоповерхности плоскостями ортогональными осям X,Y,Z. Сетка сечений рассмотрена как граф, для которого прежде всего выявляется топологическая структура в виде его границ, контуров, граней. Получаемый затем посредством обхода граней двойственный граф позволяет, укрупнить сетку, объединяя исходные грани в сегменты в соответствии с выбранными критериями минимизации искажений. Исследованы два алгоритма обхода граней: по ребрам и по вершинам. Предложенный алгоритм позволяет за линейное время построить структурированную референсную поверхность, снабженную метрикой кривизны, на которой далее можно строить различные параметризации поверхности. Рассмотрен пример параметризации с использованием криволинейных PN-треугольников.

Первый из рассматриваемых алгоритмов обхода выполняет обход граней по вершинам, основываясь только на определении грани для графа поверхности и может быть применён независимо от положения вершин. Однако более интересным представляется алгоритм обхода по ребрам, поскольку даёт преимущество в производительности почти в 3 раза с увеличением количества вершин.

Предложенная структуризация поверхности дает удобную референсную поверхность с регулярной сеткой на ней, возможность выбора удобной пары сечений в любой области изоповерхности, возможность управления размерами сегментов в зависимости от кривизны поверхности, вычисленной на сетке. В качестве примера реконструированной изоповерхности демонстрируется поверхность черепа (Рис. 7).

Аналогичная задача, решаемая с помощью классического алгоритма Marching Cubes, потребовала бы процедуры индексации вершин, что повлекло бы существенные затраты по времени или памяти в зависимости от реализации.

В работе [5] сегментация сетки осуществляется посредством её упрощения до некоторой базовой ячейки, аппроксимирующей исходную поверхность. Данный подход минимизирует искажения, однако изменяет связи в исходной сетке и требует несколько итераций работы. В отличие от [5], примитивы сетки в предложенном алгоритме позволяют формировать сегменты, образованные секущими плоскостями. Это упрощает вычисление отображения, поскольку почти вся поверхность может быть представлена трёх или четырёхугольными сегментами. Полученный сегмент представлен структурой данных, ссылающейся на свои примитивы. Таким образом, связи в исходной сетке не изменяются и каждый примитив участвует в обработке лишь один раз.

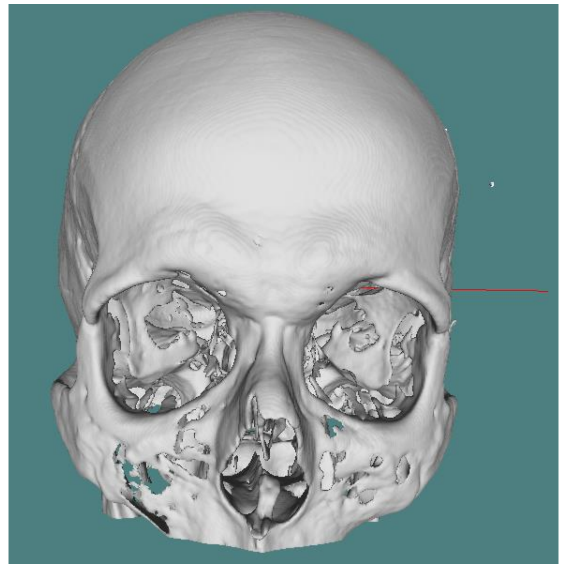

Рис 7: Реконструированная поверхность черепа

7. ССЫЛКИ

[1] Lorensen W. E., Cline H. E. Marching Cubes: A high Resolution 3D Surface Construction Algorithm // Computer Graphics. 1987. Vol. 21, No. 4. P. 163–169

[2] Lewiner T., Lopes H., Vieira A.W., Tavares G. Efficient Implementation of Marching Cubes' Cases with Topological Guarantees // Graphics Tools. 2003. Vol. 8, No. 2. P. 1-15.

[3] Sheffer A., Praun E., and Rose K. Mesh parameterization methods and their applications. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. 2006. Vol. 2, No. 2. P. 105-171.

[4] Milroy M. J., Bradley C., Vickers G. W. Segmentation of a wrap-around model using an active contour // Computer-Aided Design. 1997. Vol 29, No. 4. P. 299-319.

[5] Zhang Liyan, Liu Shenglan, Wu Xi, Zhou Laishui. Segmentation and Parametrization of Arbitrary Polygon Meshes. Proceedings of the Geometric Modeling and Processing 2004 (GMP’04). 2004. P. 143 - 152.

[6] Новожилов М.М., Кочуков М.П. Параллельный метод реконструкции в ортогональных плоскостях. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016) труды международной научной конференции. 2016. С. 629-641.

[7] Vlachos A., Peters J., Boyd C., Mitchell J. L. Curved PN Triangles. ACM Symposium on Interactive 3D Graphics 2001. P. 159-166.

Об авторе

Михаил Михайлович Новожилов – аспирант ИТММ ННГУ.

Его адрес michael.novogilov@gmail.com.