

Реконструкция поверхности по точкам контуров в ортогональных сечениях томограммы

М.М. Новожилов¹, М.В. Дубровская¹
michael.novogilov@gmail.com|maria.v.dubrovskaya@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*В настоящее время существует много средств и методов решения задачи реконструкции полигональной поверхности по контурам, образованным при сечении поверхности параллельными плоскостями. Использование этого арсенала для реконструкции анатомических изоповерхностей по данным томографии предполагает послойное формирование последовательности параллельных контуров. Последующие этапы: детектирование когерентных контуров и триангуляция поверхности. Для оценки когерентности предложено строить контуры в плоскостях, ортогональных первоначальному контурам, если исходные данные позволяют выполнить такое построение. Задача поиска точек пересечения контуров, в общем случае, имеет сложность $O(N*N)$, где N - количество точек. Показано, как можно решить данную задачу за линейное время, предложен эффективный алгоритм триангуляции полученного графа поверхности. Работоспособность алгоритма демонстрируется на примере реконструкции поверхности сердца.*

Ключевые слова: обработка данных томографии, реконструкция изоповерхности, контур, граф.

Surface reconstruction by contour points in orthogonal cross-sections of tomogram

M.M. Novozhilov¹, M.V. Dubrovskaya¹
michael.novogilov@gmail.com|maria.v.dubrovskaya@gmail.com

¹ Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

*Nowadays there are a lot of tools and methods for solving the problem of polygonal surface reconstruction from contours, created by surface cut using parallel planes. The use of this arsenal for the reconstruction of anatomical isosurfaces from tomography data suggests the layerwise formation of a sequence of parallel contours. Subsequent steps: detection of coherent circuits and triangulation of the surface. To estimate the coherence, it is proposed to construct contours in planes orthogonal to the original contours, if the initial data allow such a construction. The problem of intersection points search in common case has complexity $O(N*N)$, where N is a number of points. It is shown how it is possible to solve this problem in linear time, an effective algorithm for triangulation of the obtained surface graph is proposed. The efficiency of the algorithm is demonstrated by the example of reconstruction of the heart surface.*

Keywords: Surface reconstruction, contour, graph.

1. Введение

Задача реконструкции поверхности по контурам является широко распространённой в областях, связанных с геометрическим моделированием и обработкой трехмерных медицинских данных, прежде всего данных томографии. Исходные контуры должны быть заданы набором точек, и получены в результате их сегментации на изображениях слоев томограммы. В работе [1] приводится обзор базовых подходов к сегментации медицинских изображений, в результате применения которых исследуемый орган помечается определённым цветом, что позволяет реконструировать на каждом срезе контур по границе органа.

Существует много публикаций, предлагающих общее решение задачи реконструкции поверхности по контурам. В работе [2] исходный набор контуров представлен в виде последовательности бинарных изображений, которые преобразуются в набор точек в R^3 . Далее, для вычисления нормали в каждой точке создаётся бинарный объём, ограниченный исходными контурами, применяется фильтр Гаусса и в точках исходных контуров вычисляются градиенты. Таким образом, задача реконструкции поверхности по контурам сводится к более общей задаче реконструкции поверхности по точкам.

В работе [3] предлагается гладкое решение проблемы сшивки когерентных контуров, заданных последовательностью их точек. Также, приводится подробный обзор решений проблем: соответствия точек

когерентных контуров; триангуляции (tiling) поверхности на когерентных контурах; ветвления контуров.

Алгоритм [4], подобно [2], также принимает на вход последовательность бинарных изображений. В данном методе, для улучшения качества поверхности выполняется построение промежуточных контуров посредством адаптируемой схемы уточнения. При этом, на каждой стадии реконструкции используется большее двух сечений, что отличает данный метод от большинства других. В результате, как и в методе [2], получается гладкая поверхность.

В работе [5] приводится алгоритм разрешения неоднозначности в контуре (образование "замочных скважин"), а так же шаблон для триангуляции быстрых переходов.

В случае, когда медицинские изображения образованы данными компьютерной томограммы достаточного разрешения, реконструкцию поверхности можно выполнить методами, базирующимися на маршрутирующих кубах [6, 7]. Данные методы разделяют пространство на кубические ячейки и реконструируют поверхность отдельно в каждой из них. Однако в данных работах не рассматривается проблема объединения отдельных поверхностей в единую связную поверхность, что может привести к существенным вычислительным затратам. Данная проблема решается алгоритмом, предложенным в работе [8]. В данном методе рассматриваются регулярные сетки томограммы, ортогональные направлениям X , Y и Z . Для каждого ребра сетки проверяется условие его пересечения с поверхностью, и в случае его выполнения

фиксируется точка пересечения. Затем, на построенных точках формируется контур и объединяется с другими, находящимися в ортогональных плоскостях. Таким образом, формируется граф поверхности (рис. 1).

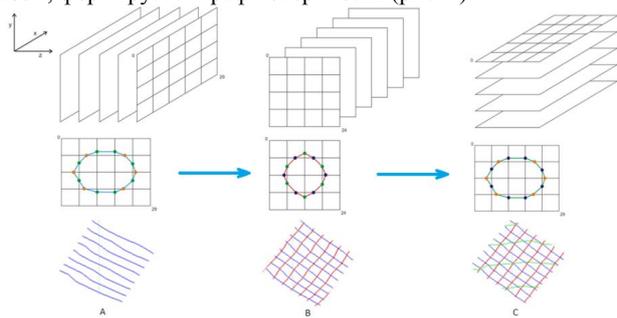


Рис. 1. Построение графа поверхности.

Преимущество данного подхода в том, что он эффективно решает проблему объединения поверхностей в соседних кубических ячейках, и при этом имеет линейное ускорение при распараллеливании. Однако недостатком приведённого алгоритма, а также базирующихся на маршрутирующих кубах методов является наличие неоднозначностей при реконструкции поверхности, поскольку поверхность восстанавливается локально в каждой области.

Один из способов разрешения неоднозначностей - реконструкция контура поверхности целиком (глобально) на срезе, исходя, например, из его геометрических свойств, особенностей изображения или заданной модели.

В данной работе предлагается подход, позволяющий глобально восстановить контуры поверхности в ортогональных плоскостях, и в то же время обладающий линейным ускорением при построении поверхности в параллельной реализации. Кроме того, данный алгоритм может использоваться в сочетании с подходами [2,4] в ортогональных плоскостях. При этом решается проблема соответствия точек и триангуляции.

2. Описание метода получения контуров

Для сегментации и выделения контуров в данной работе применяется метод Ray Casting [9] на каждом слое данных компьютерной томограммы. Одним из возможных решений здесь является испускание лучей радиально из области внутри сердца, близкой к его центру. Критерием выбора точек контуров является переход в этой точке, при движении вдоль луча, к отрицательным значениям (к перикарду, жировому мешочку толщиной порядка нескольких миллиметров, плотно окружающему сердце и основание прилегающих крупных сосудов).

Лучевой метод в качестве основы алгоритма построения контуров выбран благодаря его ориентации на параллельные вычисления и, как следствие, приемлемому времени работы по сравнению с аналогами. Более того, сегментация лучевым методом является в значительной степени автоматической и, следовательно, почти не требует сопровождения. При всей простоте, Ray Casting показывает результаты приемлемые для дальнейшей обработки.

3. Описание метода реконструкции поверхности

На вход алгоритма поступают контуры и кривые заданные последовательностью своих точек в R^3 , и как бы образованные при сечении реконструируемой поверхности ортогональными плоскостями. Предлагаемый подход основан на алгоритме [8], который принимает на вход данные компьютерной томограммы, строит контуры изоповерхности в ортогональных плоскостях и за линейное

время выполняет поиск точек их пересечений. Однако для применения этого алгоритма в задаче реконструкции поверхности по контурам не обязательно выполнять построение скалярного поля. Достаточно спроектировать каждый контур на регулярную сетку необходимого разрешения, как показано на рис. 2.

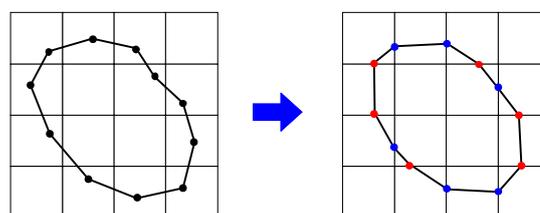


Рис. 2. Проекция контура на регулярную сетку.

При этом, в процессе обхода вершин текущего контура, для каждого его ребра, вычисляются точки пересечения с горизонтальными и вертикальными линиями сетки. Вычисление исходного контура происходит на одном этапе с обработкой соответствующей плоскости, что не нарушает масштабируемости алгоритма при параллельном исполнении.

Однако исходные контуры, вычисляемые в ортогональном направлении, могут не пересекаться с первоначальными контурами на одном ребре регулярной сетки, что необходимо для идентификации точки пересечения. Поэтому процедура дополняется возможностью, для соответствующего первоначального контура, рассматривать также соседние ребра регулярной сетки, на предмет наличия точки контура в ортогональном направлении. Затем, точки полученного контура смещаются в целях его сглаживания и соответствия рёбрам для первоначальных контуров. Сглаженный контур снова проектируется на регулярную сетку, для возможности дальнейшего эффективного получения графа поверхности.

После получения графа, выполняется перебор его граней и их триангуляция. Алгоритм состоит из следующих шагов:

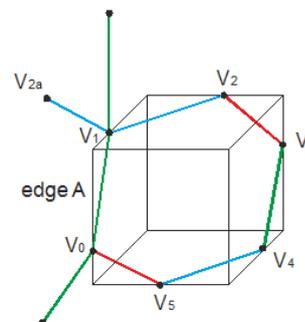


Рис. 3. Триангуляция графа поверхности.

1. Рассматриваются контуры поверхности, принадлежащие одной плоскости;
2. На текущем контуре, рассматриваются его рёбра (ребро A на рис. 3);
3. Вершины графа поверхности добавляются в список вершин грани. Вершины V_0 и V_1 можно добавить единственным образом;
4. Далее, мы рассматриваем две грани, вершины которых начинаются с $\{V_0, V_1, V_2\}$ и $\{V_0, V_1, V_{2a}\}$. На всех стадиях формирования грани мы добавляем в список вершину, ребро которой лежит на плоскости, ортогональной к плоскости рассматриваемого ребра;
5. Необходимо проверить существование грани, инцидентной первым трёх добавленным вершинам

- (например, посредством проверки списка граней для каждой вершины). В случае существования, обход грани завершается.
6. Добавляем следующую вершину V_n , лежащую на той же стороне от плоскости ребра (V_{n-1}, V_{n-2}) что и вершина V_{n-3} ;
 7. Если V_n совпадает с V_0 , обход грани успешно завершён. Иначе, алгоритм завершается, если количество итераций больше шести.
 8. В результате, получаем грань степени от 3 до 6, которая может быть легко триангулирована.

4. Заключение

Для получения исходного набора контуров мы воспользовались методом трассировки луча, применяя его к данным компьютерной томограммы сердца. В результате работы получена связанная сетка поверхности (рис. 4), и ускорение в параллельной реализации на процессоре Intel®Core™i5 750 2.66 GHz, для поверхности из 477057 примитивов, оказалось близким к линейному:

Стадия	Время (сек.)		
	1 ядро	2 ядра	4 ядра
Сегментация	20,96	10,80	5,72
Построение графа	5,64	2,37	1,32
Триангуляция	1,01	0,89	0,77

Некоторые области оказались не сегментированными, из-за чего в поверхности возникли отверстия. Тем не менее, данный подход, в отличие от упомянутых ранее, позволяет разрешить неоднозначности, например, при отделении поверхности сердца от диафрагмы. Планируется продолжить развитие данного метода сегментации.

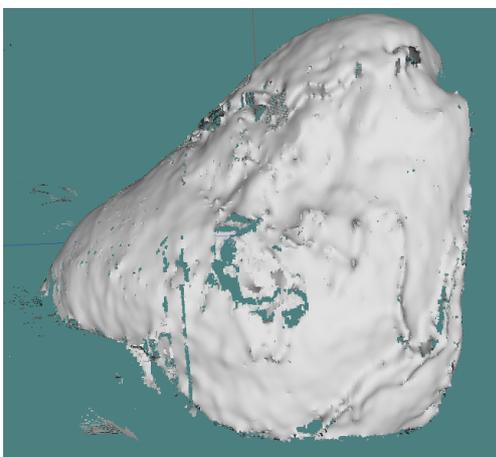


Рис. 4. Реконструированная поверхность сердца.

5. Литература

- [1] Alireza Norouzi, Mohd Shafry Mohd Rahim, Ayman Altameem, Tanzila Saba, Abdolvahab Ehsani Rad, Amjad Rehman & Mueen Uddin (2014) Medical Image Segmentation Methods, Algorithms, and Applications, IETE Technical Review, 31:3, 199-213.
- [2] Braude, I., Marker, J., Museth, K., Nissanov, J., Breen, D.: Contour-based surface reconstruction using MPU implicit models. GRAPHICAL MODELS 69, 2007.
- [3] Nurzyńska K. (2009) 3D Object Reconstruction from Parallel Cross-Sections. In: Bolc L., Kulikowski J.L., Wojciechowski K. (eds) Computer Vision and Graphics. ICCVG 2008. Lecture Notes in Computer Science, vol 5337. Springer, Berlin, Heidelberg.

- [4] Shay Kels, Nira Dyn, Reconstruction of 3D objects from 2D cross-sections with the 4-point subdivision scheme adapted to sets, Computers & Graphics, Volume 35, Issue 3, 2011, Pages 741-746.
- [5] Sunderland, Kyle; Woo, Boyeong; Pinter, Csaba; Fichtinger, Gabor. / Reconstruction of surfaces from planar contours through contour interpolation. Medical Imaging 2015: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling. Vol. 9415 SPIE, 2015.
- [6] Lewiner T. et al, 2003. Efficient Implementation of Marching Cubes' Cases with Topological Guarantees. Graphics Tools. Vol. 8, No. 2. pp. 1-15.
- [7] Sundaresan Raman and Rephael Wenger, May 26-28, 2008. Quality Isosurface Mesh Generation Using an Extended Marching Cubes Lookup Table. Proceedings of the 10th Joint Eurographics / IEEE - VGTC conference on Visualization. Eindhoven, The Netherlands, pp. 791-798.
- [8] Новожилов М.М. Реконструкция структурированных изоповерхностей по 3D данным компьютерной томографии. В сборнике: ГРАФИКОН'2016 Труды 26-й Международной научной конференции. 2016. С. 185-187.
- [9] Gavrilov, N. I., Turlapov, V .E. Novel approach to development of direct volume rendering algorithms based on visualization quality assessment // Programming and Computer Software, (2014) 40 (4), pp. 174-184. DOI: 10.1134/S0361768814040045.

Об авторах

Михаил Михайлович Новожилов – аспирант ИТММ ННГУ, michael.novogilov@gmail.com.

Мария Владимировна Дубровская – аспирант ИТММ ННГУ, maria.v.dubrovskaya@gmail.com.