

УДК 004.89:004.94

*П.В. Лукашевич, Б.А. Залесский, А.М. Недзьведь*

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск  
{ Pavel.Lukashevich, Zalesky, NedzvedA }@newman.bas-net.by

## Восстановление поверхности трехмерного объекта по обводкам его сечений

В статье предлагаются методы векторного восстановления поверхности и оценки объема медицинских и других трехмерных объектов по нескольким обводкам их поперечных сечений в пространстве. Обводки сечений в пространстве должны быть упорядочены, однако, в общем случае они могут быть не плоскими и не параллельными друг другу. Предложенные методы дают хорошие результаты при восстановлении выпуклых или близких к ним по форме поверхностей. Также предложен способ восстановления поверхности разветвляющихся объектов.

### Введение

Методы медицинского сканирования получили широкое распространение в последние десятилетия. Это такие методики как МРТ, КТ, УЗИ, и др. Однако, несмотря на значительное развитие технологий сканирования, увеличения разрешения сканеров и качества снимков, заключительный анализ и диагностику выполняет медицинский специалист, причем часто для этого используются неточные устаревшие методики.

Восстановление объемного образа объекта на медицинских изображениях чаще всего начинается с формирования контуров обводок (рис. 1), которое выполняется послойно. Существует два пути определения контура объекта – *автоматический* и *интерактивный*.

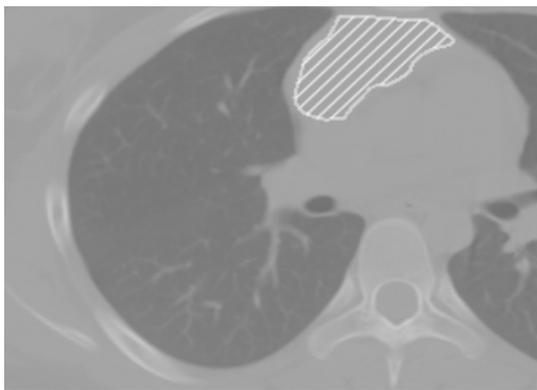


Рисунок 1 – Пример плоской обводки контура сечения объекта (заштрихованной фигурой обведены опухолевые массы на одном срезе КТ)

До сих пор многие задачи автоматического выделения контуров органов и тканей на данных медицинского сканирования не решены или не решены полностью. Автоматическая сегментация доступна для очень ограниченного набора органов и тканей, и часто достигается за счет введения контрастного вещества в кровь пациента.

Из существующих подходов к автоматическому восстановлению трехмерных объектов медицинского сканирования хорошо зарекомендовали себя растровые алгоритмы реконструкции объекта [1], алгоритмы,

использующие сплайновую аппроксимацию или интерполяцию [2,3], морфологические преобразования [4] и так далее. Но большинство из перечисленных алгоритмов не обеспечивает недостаточное качество реконструкции, или скорость обработки.

В последние годы предложены интересные способы восстановления, основанные на обобщенной модели объекта восстановления (model based reconstruction) [5], активные контура [6] и др. [7,8] обеспечивающие существенно более качественные результаты восстановления, однако эти алгоритмы гораздо более трудоемки в вычислительном плане и требуют адаптации для решения определенной задачи восстановления.

С другой стороны, интерактивное выделение контуров является очень трудоемким процессом, а качество обводок сильно зависит от навыков специалиста, выполняющего процедуру построения контуров. Предложенные алгоритмы особенно хорошо подходят именно для таких случаев, так как позволяют восстанавливать форму объекта по небольшому числу ручных обводок. Методы нацелены на снижение рутинной работы медицинских специалистов, и призваны если не избавиться полностью то хотя бы снизить затраты на выполнение ручных обводок границ органа при оценке его объема и визуализации.

В работе предложены методы векторного восстановления поверхности и оценки объема медицинских и других трехмерных объектов по нескольким в общем случае не параллельным и не плоским обводкам их поперечных сечений в пространстве. Также описаны способы установления соответствий между сечениями разветвляющихся объектов. Описанный подход использует простые модели для восстановления формы органа и оценки его объема.

Полученные результаты будут способствовать развитию диагностического программного обеспечения лучевых методов для правильного расчета данных по динамике регрессии опухолевых образований, оптимизации принятия решения по вопросам лечения.

## Восстановление поверхности объекта

Для восстановления трехмерной поверхности используется набор из 3-6 замкнутых контуров сечений объекта в пространстве (рис. 2а). Сечения объекта могут быть не плоскими и не параллельными, однако они не должны пересекаться друг с другом.

Такая постановка задачи восстановления хорошо согласуется со многими типами входных данных медицинского сканирования, в том числе и при трехмерном ультразвуковом сканировании «методом свободной руки» (Freehand 3D).

В предлагаемом методе трехмерная векторная поверхность объекта формируется треугольниками, вершины которых лежат на соседних контурах обводок сечений в пространстве. Для удобства реализации алгоритма пары треугольников, имеющих общую сторону, объединяются в фигуры (в общем случае не плоские) называемые в дальнейшем «четыреугольниками».

Итак, для построения боковой поверхности трехмерного объекта предлагается воспользоваться алгоритмом  $A_1$ :

[Шаг 1] Установить отношение порядка между контурами  $C_m$  из предоставленного набора  $C_1, C_2, \dots, C_k$

[Шаг 2] Разбить весь набор контуров на пары смежных контуров  $C_1C_2, C_2C_3, \dots, C_{k-1}C_k$

[Шаг 3] Для каждой пары контуров  $C_{m-1}C_m$  из набора разбить «нижний»  $C_{m-1}$  и «верхний»  $C_m$  контуры на одинаковое количество отрезков  $P_{m-1,1}, P_{m-1,2}, \dots, P_{m-1,n}$  и  $P_{m,1}, P_{m,2}, \dots, P_{m,n}$

[Шаг 4] Восстановить боковую поверхность  $S_{m-1}$  одной секции (поверхность между соседними контурами) посредством объединения поверхностей четырехугольников

$$S_{m-1} = \bigcup_{p=1}^n S_{\text{quad}}(P_{m-1,p}, P_{m-1,p+1}, P_{m,p+q}, P_{m,p+q+1}),$$

где  $q$  выбирается таким образом, чтобы минимизировать площадь поверхности одной секции  $S_{m-1}$ .

$$q = \arg \min(S_{m-1})$$

[Шаг 5] Для получения боковой поверхности объекта требуется объединить боковые поверхности  $S_m$  всех секций:

$$S_{\text{obj}} = \bigcup_{m=1}^{k-1} S_m$$

Следует заметить, что полученная в результате работы алгоритма поверхность легко триангулируется и допускает быструю аппаратную визуализацию при помощи библиотек OpenGL или Direct3D (рис. 2).

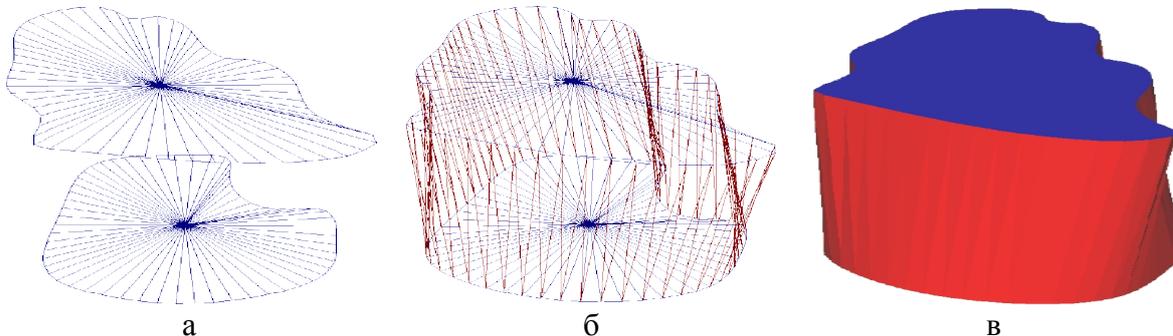


Рисунок 2 – Пример результата восстановления секции простого объекта:  
а) исходные контуры в пространстве; б) сеточная структура объекта; в) поверхность объекта

## Вычисление объема объекта

После восстановления замкнутой триангулированной поверхности объекта описанным выше способом становится легко вычислить его объем, который будет состоять из ориентированных объемов тетраэдров его составляющих, каждый из которых строится на одном элементе триангуляции и некоторой точки в пространстве.

Здесь можно провести аналогию с известным способом вычисления площади многоугольника  $P$ , построенного на упорядоченном наборе точек плоскости

$P_1, \dots, P_L$ , в котором общая площадь многоугольника формируется из ориентированных площадей вспомогательных треугольников:

$$S_P = \left| \sum_{t=1}^L \frac{1}{2} [OP_t \times OP_{t+1}] \right|,$$

где  $O$  – произвольно заданная точка плоскости, а  $OP_t \times OP_{t+1}$  – векторное произведение.

Как известно, объем тетраэдра равен  $V_{\text{тетр}} = \frac{1}{3} S_{\text{base}} h$ , где  $S_{\text{base}}$  – площадь грани тетраэдра,  $h$  – высота, опущенная на эту грань, но его также можно выразить и через смешанное произведение векторов, лежащих на его ребрах, что значительно удобнее для вычисления. Итак, для тетраэдра  $OABC$ , вершины  $ABC$  которого образуют элемент триангуляции, а  $O$  – некоторая произвольная точка в пространстве, справедливо выражение:

$$V_{\text{тетр}} = \frac{1}{6} \left| (\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC}) \right|,$$

где  $(\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC})$  – смешанное произведение векторов.

Таким образом, общий объем объекта будет вычисляться по формуле:

$$V_{\text{object}} = \frac{1}{6} \left| \sum_{\text{triangles}} (\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC}) \right|,$$

где  $ABC$  – элемент триангуляции, а  $O$  – некоторая произвольная точка в пространстве, причем, если в качестве точки  $O$  выбрать точку начала координат, то координаты векторов в приведенном выражении будут тождественно равны координатам вершин текущего элемента триангуляции.

## Восстановление сложных объектов

Описанный ранее метод хорошо подходит для восстановления простых по форме объектов (выпуклых или близких к ним), однако, во многих медицинских приложениях возникает необходимость восстановления более сложных, в том числе и разветвляющихся объектов (кровеносные сосуды, сложные новообразования и др.).

Задача восстановления древовидного объекта по слоям поперечного сечения сложна и в общем случае имеет множество решений. Однако, при определенных ограничениях на форму и гладкость реконструируемого объекта, можно предложить алгоритмы, обеспечивающие удовлетворительное качество восстановления поверхностей.

Для восстановления векторной поверхности объектов сложной формы предлагается усовершенствованный алгоритм. Как и в предыдущем случае, на вход алгоритма поступает набор поперечных сечений объекта. Однако теперь, на каждом из сечений может быть задано несколько замкнутых обводок. При восстановлении объекта также как и ранее будет использоваться критерий построения поверхности минимальной площади. Как показывают испытания, это предположение вполне оправдано и дает хорошие практические результаты.

Для простоты реализации и сокращения времени работы алгоритма на начальном этапе разработки предлагается не проводить глобальную оптимизацию по всей поверхности органа, а восстанавливать объект по частям, отдельно в каждой секции (участке объекта между соседними секущими плоскостями). Такой подход

позволяет существенно сократить вычислительную сложность алгоритма, убрав дополнительную степень свободы при оптимизации.

К сожалению «кусочное» восстановление органа оставляет стыки на границах секущих поверхностей, эта задача будет рассматриваться на следующих этапах разработки. Одним из компромиссных вариантов разрешения этой трудности будет обработка секций сечений органа по отдельности и последующая сшивка результатов восстановления при помощи сплайнов.

Таким образом, для поиска наилучшей конфигурации в секции, образованной двумя соседними сечениями, выполняется перебор всех возможных вариантов соединения контуров на соседних сечениях, и отбираются только те конфигурации, площадь боковой поверхности которых минимальна. Итогом такого полного перебора является искомая конфигурация секции.

Далее основные этапы работы предлагаемого алгоритма будут рассмотрены более подробно.

#### *Генерация допустимых конфигураций ветвления.*

Одной из проблем решения задачи ветвления является построение списка всех допустимых конфигураций ветвления для каждой секции объекта. Ограничения на допустимые конфигурации могут гибко формироваться в зависимости от решаемой задачи, априорной информации о форме восстанавливаемого объекта или другими требованиями к результату восстановления.

В предлагаемом алгоритме изначально не накладываются ограничения на вид разветвления в секции; задача решается в общем виде, и допускаются все типы ветвлений (рис. 3).

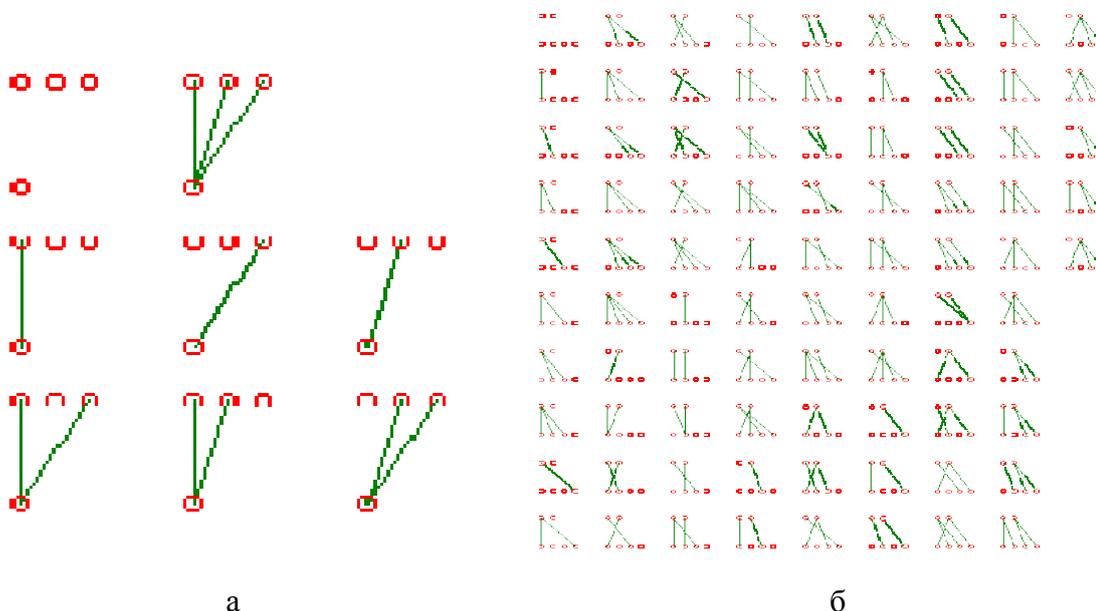


Рисунок 3 – Примеры всевозможных конфигураций ветвлений для:  
а) случая 3-в-1; б) случая 2-в-4

Для перечисления приведенных конфигураций был разработан специальный класс на языке C#. Для удобства использования методы класса были функционально разделены по типам: методы генерации всевозможных одинарных соединений (один

к одному); методы генерации множественных соединений (один ко многим); методы удаления повторяющихся конфигураций. Такая реализация позволяет гибко подойти к настройке допустимых конфигураций. Например, становится возможным управлять кратностью связей, регулировать количество *висящих узлов* – контуров, не участвующих в образовании поверхности объекта в секции и др.

Для удаления повторяющихся конфигураций используется функция вычисления контрольной суммы, конфигурации с повторяющимися контрольными суммами удаляются. Изменением функции вычисления контрольной суммы можно управлять общим количеством и видом допустимых конфигураций. Например, можно запретить конфигурации с висящими вершинами, или добавить возможность различать конфигурации с разным порядком следования вершин.

#### *Проверка полученных конфигураций*

После выделения множества всевозможных конфигураций необходимо определить наилучшую из них. Для выбора наилучшей можно использовать разные критерии, такие как форму поверхности, ее гладкость, силы поверхностного натяжения, деформирующие силы и др. В предлагаемом алгоритме используется критерий минимальной площади поверхности объекта. Т.е. объект с наименьшей площадью поверхности, проходящий через все контура сечений, считается наилучшим решением для каждого случая ветвления. Такой критерий уже хорошо себя зарекомендовал при восстановлении поверхности простого объекта, а также показал свою состоятельность на тестовых задачах восстановления разветвляющихся объектов.

Для адаптации описанного ранее подхода к восстановлению поверхности разветвляющихся объектов приходится использовать некоторые дополнительные правила, например, наложить ограничения на висящие (не участвующий в образовании поверхности объекта в секции) контуры объекта, в противном случае наилучшей конфигурацией всегда будет пустая конфигурация – конфигурация, состоящая только из висящих контуров. (Описанная проблема выбора пустой конфигурации легко решается введением дополнительного штрафа на висящие вершины, равного, например, площади шароподобной поверхности, построенной на контуре, соответствующем данному узлу.)

Стоит заметить, что вычисление площади поверхности каждой из возможных конфигураций может потребовать значительных вычислительных затрат, особенно при большом количестве контуров в секции. Так, например, существует 8 вариантов ветвления из одного контура в три – начиная от полного отсутствия связей и заканчивая полностью связанным вариантом (рис. 3а). Но для ветвления из 2-х в 4 их уже 85 (рис. 3б).

Для снижения вычислительной сложности алгоритма целесообразно выполнить предварительное отсеивание заведомо неверных конфигураций более простыми методами, не требующими полного восстановления фигуры. Один из таких методов описан далее.

#### *Выбор наилучших конфигураций упрощенным методом*

Для выбора оптимальной конфигурации на предварительном этапе предлагается вместо информации о площади поверхности восстановленного объекта использовать только информацию о среднем расстоянии между точками связанных контуров. В качестве штрафа за висящие узлы предлагается использовать диаметр

соответствующего контура. Подобное упрощение показало свою практическую применимость и позволило сильно сократить время работы алгоритма.

#### *Реализация процесса ветвления*

Итак, после вычисления всех допустимых конфигураций и выбора наилучшей из них приближенными методами, все множество контуров в секции можно представить объединением пустого множества (контур не участвует в образовании поверхности секции), множества без ветвлений (один контур переходит в один контур) и множества с ветвлениями (один контур переходит в два и более контура).

Про восстановление секций без ветвления уже говорилось ранее. Для осуществления ветвлений один-ко-многим разработана процедура, создающая промежуточные точки между слоями секции и соединяющая их с точками смежных контуров. Соответствующие друг другу точки верхнего и нижнего среза секции, как и ранее, определяются путем перебора, но если для выбора наилучшей конфигурации в случае без ветвления было возможно воспользоваться полным перебором, то при ветвлении, особенно при ветвлении на большое число составляющих, полный перебор становится очень дорогостоящим.

Для решения этой задачи предлагается использовать стохастический подход, например такой, как метод Монте-Карло. Наилучшее приближение задачи будет получаться в этом случае итерационно, а необходимое количество итераций будет зависеть от сложности выбранного варианта ветвления и необходимой точности решения (пример восстановления приведен на рис. 4).

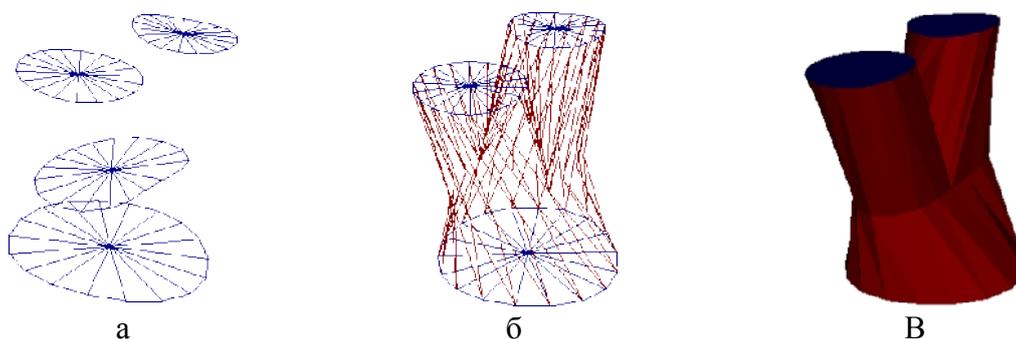


Рисунок 4 – Пример результата восстановления секции с ветвлением для случая 1-1-2: а) исходные контуры в пространстве; б) сеточная структура объекта; в) поверхность объекта

## Выводы

Данная работа посвящена восстановлению поверхности сложных объектов на медицинских изображениях и направлена на решение задачи восстановления и пространственной визуализации объектов сложной структуры по исходным данным, полученным в результате медицинского исследования. Разработанные алгоритмы позволяют повысить информативность данных первичной диагностики, обеспечить удобство для медицинских специалистов при анализе результатов обследования.

Полученные результаты будут способствовать развитию диагностического программного обеспечения, призванного корректно обрабатывать данные о динамике регрессии опухолевых масс и объеме остаточной опухоли, оптимизировать принятие решения о тактике и объеме терапии, в том числе органосохранного

хирургического лечения. Определение правильного пути лечения позволит существенно снизить расходы на лекарственные препараты и терапевтические процедуры.

Работы выполнялись при поддержке проекта ISTC В-1489.

## Литература

1. G. Treece. Volume Measurement and Surface Visualization in Sequential Freehand 3D Ultrasound. PhD thesis Univer. of Cambridge, Department of Engineering, 2000. 183 p.
2. C. Anderson, S. Crawford-Hines. Fast Generation of NURBS Surfaces from Polygonal Mesh Models of Human Anatomy. Technical Report, Department of Computer Science, Colorado State University, Fort Collins. February 9, 2000.
3. P. Lukashevich, B. Zalesky. Reconstruction of 3D Surfaces by Spline Technique. Proceedings of the 8-th International Conference "Pattern Recognition and Information Processing", Minsk, May 18-20, 2005. pp. 351-354.
4. A.L. Bogush, A.V. Tuzikov, S.A. Sheynin. 3D object reconstruction from non-parallel cross-sections. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, UK, 23-26 Aug, 2004. Vol. 3, pp. 542-545.
5. J. Boissonnat, P. Memari. Shape reconstruction from unorganized cross-sections. Proceedings of the Fifth Eurographics Symposium on Geometry Processing. Barcelona, Spain, July 04-06, 2007. pp. 89-98.
6. H. Delingette. General Object Reconstruction Based on Simplex Meshes. Int. J. Comput. Vision. 32 (2) (Aug.1999). p. 111-146.
7. F. Bernardini, et al. The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 5(4) (Oct. 1999). p. 349-359.
8. Q. Huang, B. Adams, M. Wand. Bayesian surface reconstruction via iterative scan alignment to an optimized prototype. Proceedings of the Fifth Eurographics Symposium on Geometry Processing. Barcelona, Spain, July 04-06, 2007. pp. 213-223.

*P.V. Lukashevich, B.A. Zalesky, A.M. Nedzved*

### **Reconstruction of 3D Surfaces by Spline Technique**

A new technique is presented in order to reconstruct 3D surface, represented in a vector form, from several closed, in general, non-planar curves, including contours that were outlined manually. Also approaches to reconstruct branching objects of complex forms are developed.

*П.В. Лукашевич, Б.А. Залескі, А.М. Недзьведь*

### **Відновлення поверхні тривимірного об'єкта за обведення його перерізів**

У статті пропонуються методи векторного відновлення поверхні та оцінки обсягу медичних та інших тривимірних об'єктів за кількома обведення їх поперечних перерізів в просторі. Обведення перетинів у просторі повинні бути впорядковані, проте, в загальному випадку вони можуть бути не плоскими і не паралельними один одному. Найкращі результати відновлення виходять для простих опуклих або близьких до них об'єктів, однак, також описані способи вирішення проблеми розгалуження для об'єктів більш складної форми.

*Статья поступила в редакцию 22.06.2010.*