

УДК 004.021

## Методы построения поверхности по изображениям КТ для создания модели челюстно-лицевого скелета с применением 3D печати.

М. Д. Сафонов<sup>1</sup>, Д. Д. Новиков<sup>2</sup>, М.В. Привалов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ГОУ ВПО Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая Народная республика  
<sup>1</sup>[msafonovmail@gmail.com](mailto:msafonovmail@gmail.com), <sup>2</sup>[novikov.d92@mail.ru](mailto:novikov.d92@mail.ru), <sup>3</sup>[maxim.privalov@gmail.com](mailto:maxim.privalov@gmail.com)

*Сафонов М. Д., Новиков Д. Д., Привалов М. В. Методы построения поверхности по изображениям КТ для создания модели челюстно-лицевого скелета с применением 3D печати. В работе рассмотрена задача построения пригодной для печати 3D модели на основе снимков челюстно-лицевой области (ЧЛО). Проведен анализ различных методов построения поверхности объекта с целью определения метода, более подходящего для решения данной задачи. Показаны особенности применения существующих методов к частям объекта, требующим различного уровня детализации.*

**Ключевые слова:** поверхность, триангуляция, 3D печать, метод, имплантат.

### Введение.

В челюстно-лицевой хирургии и имплантологии часто приходится решать задачу создания предоперационных шаблонов и имплантатов для дальнейшего проведения операции. Эффективность решение данной, довольно сложной, задачи можно повысить путем применения средств компьютерного моделирования и проектирования.

В первую очередь стоит задача построения 3D модели ЧЛО для наглядного выделения области поражения, определения её параметров и построения модели предоперационного шаблона. Помимо компьютерной модели точность такого шаблона повышается за счёт внесения различных дополнительных корректировок на основании физической модели ЧЛО, которую возможно получить с помощью современных технологий 3D печати. Для подготовки объекта к 3D печати необходимо провести триангуляцию поверхности.

### Постановка задачи.

Основой для построения поверхности, пригодной для печати, является создание воксельной модели и триангуляция. Целью триангуляции является создание планарного графа по заданному набору координатных точек, который впоследствии разбивал бы объект исследования на треугольники и внешнюю поверхность. Существует много различных методов для выполнения триангуляции 3D поверхности, каждый из которых имеет свои положительные и отрицательные свойства применительно к работе с медицинскими

изображениями. Андреем Семенихиным проведено сравнение работы методов триангуляции на объектах различной сложности (целостные и плавные, имеющие большое количество разрывов) [1].

Для сравнения различных методов триангуляции были использованы следующие критерии:

- количество генерируемых треугольников;
- качество генерируемых треугольников.

Сравнение производилось следующим образом: на вход методам подавались тестовые поверхности, заданные на регулярной сетке 30x30x30. Для каждой поверхности просчитывалось количество треугольников, вектор качества треугольников.

Вектор качества треугольников (ВКТ) определяется следующим образом:

$$\text{ВКТ} = \{a_1, a_2, \dots, a_{10}\}, a_i \in [0, 100], \sum_i a_i = 100$$

При этом,  $i$ -ый элемент ВКТ определяется как процентное содержание треугольников с мерой качества  $V$ , во множестве сгенерированных треугольников, где  $V$  удовлетворяет следующему неравенству:

$$\frac{i-1}{10} \leq V < \frac{i}{10}, i \neq 10 \\ V \geq 0.9, i = 10$$

Средняя мера качества треугольников считалась как среднее арифметическое мер правильности всех треугольников [1].

### Методы триангуляции.

Для решения поставленных задач

существуют ячеечные и мозаичные методы триангуляции.

**Ячеечные методы (cell-based).** Основа методов данного типа, независимая триангуляция каждой ячейки с помощью таблиц триангуляции, является одновременно их сильной и слабой стороной. Высокая скорость работы этих методов делает их наиболее привлекательными по отношению к другим методам [2] и дает возможность использовать их в интерактивных приложениях, но большим минусом считается их относительная индифферентность к поведению функции вне выбранного множества точек.

Данный класс оптимален для работы с мелкими объектами, такими как мелкие кости в челюстной области черепа, или зубы, однако возможны трудности в связке нескольких смежных объектов между собой.

**Мозаичные методы (pre-tessellation methods & particle-based methods)** применимы только при визуализации полей, определенных в каждой точке той части пространства, которое нас интересует [3]. Большим плюсом таких методов можно считать их зависимость от локального искривления функции – при реализации таких методов мелкие детали объекта не будут упущены. Данный класс методов является более оправданным для работы с крупными и/или цельными объектами, такими как кости черепа, предоперационные шаблоны.

Заметное различие между ячеечными и мозаичными методами заключается еще и в том, что первые часто довольно просты в реализации. Например, создать регулярную сетку на основе нерегулярной значительно проще, чем восстановить функцию в каждой точке пространства. Это же относится и к проблеме восстановления поверхности по срезам, возникающей в томографии.

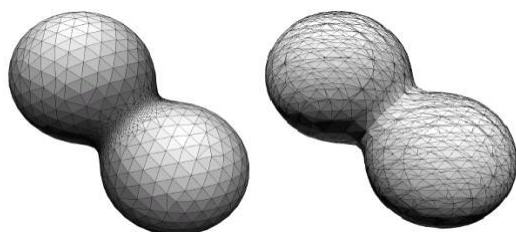


Рис 1. Поверхность слева получена - с помощью метода Стюарта (predictor-corrector), справа с помощью метода марширующих кубов (cell-based)

Таким образом, необходимо выполнить обоснование и выбор ячеечного метода для построения 3D модели ЧЛЮ и мозаичного метода

для построения предоперационного шаблона.

Ячеечные методы триангуляции позволят нам триангулировать поверхность челюстно-лицевой области. Различные модификации этих методов позволяют уменьшить вероятность ошибки аппроксимации, увеличить скорость работы за счет уменьшения количества сгенерированных треугольников и увеличения их качества, также используя современные технологии время выполнение работы данных методов уменьшается за счет использования параллельных и распределенных систем [4]. Анализ будем проводить по количеству сгенерированных треугольников и по качеству полученной поверхности. Выделим два ячеечных метода, метод Канейро и марширующих кубов.

Методы Канейро и марширующих кубов относятся к ячеечным методам. Преимущества, описанные ранее, позволяют нам утверждать, что с помощью данных методов лучше строить поверхность челюстно-лицевой области для дальнейшего выделения области поражения.

Алгоритм марширующих кубов, предложенный Лоренсенем, который можно разбить на два этапа [2]:

1. Разбиение области  $G$  пространства  $R^3$  на конечное множество ячеек, поиск ячеек пересекаемых искомой поверхностью [5].

2. Аппроксимация поверхности в найденных ячейках.

Отдельного внимания заслуживает первый этап, который является основополагающим в нашем анализе.

Основные проблемы этого этапа заключается в следующем:

1. Разбить область  $G$  на ячейки.

2. Выбрать ячейки, которые пересекаются с искомой поверхностью.

После того как область  $G$  будет разбита на ячейки, значения функции, в общем случае задающей поверхность, будут известны только в вершинах этих ячеек. Таким образом, ячейка является главной структурной единицей во всех методах на этом этапе.

При разбиении области следует учесть, что если размер ячейки будет очень большим, то возможна большая потеря точности.

При большом размере ячейки некоторые части искомой поверхности просто не будут видны. Однако сильное уменьшение размера ячейки может сильно сказаться на скорости построения полигональной поверхности (зависит от используемого оборудования).

Метод Канейро, основанный на разбиении пространства на треугольные пирамиды, как и метод марширующих кубов,

состоит из двух этапов [6]:

1. Разбиение пространства на конечное множество ячеек, поиск ячеек пересекаемых искомой поверхностью.

2. Аппроксимация поверхности в найденных ячейках.

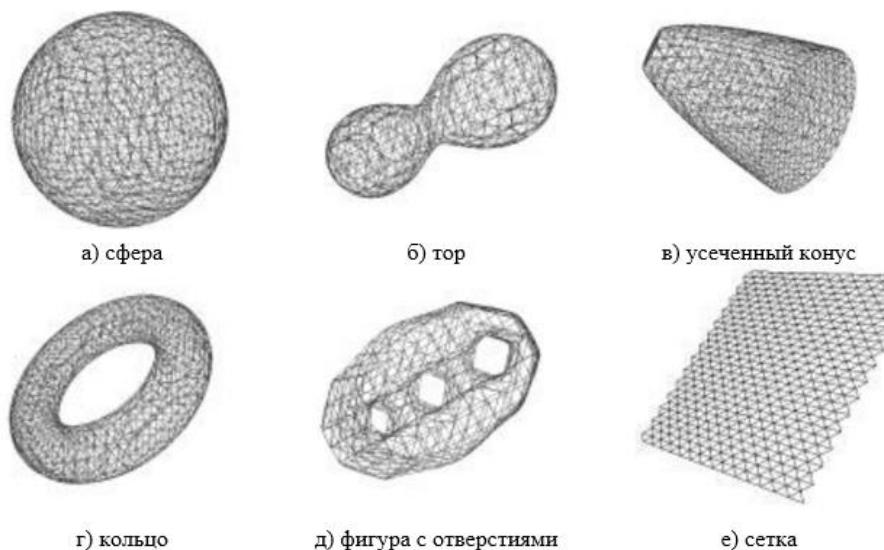
Как уже было сказано, метод использует в качестве ячеек треугольные пирамиды. Для этого пространство разбивается на

параллелепипеды в соответствии с сеткой, на которой задана функция, а затем каждый параллелепипед разбивается на треугольные пирамиды.

Однако при подобном разбиении швы разрезов не всегда совпадают. Другими словами, стороны треугольников, полученных в результате триангуляции соседних ячеек, могут совпадать, что повлечет за собой появление дыр.

**Таблица 1.** Сравнение методов триангуляции по рисунку 2.

Поверхность	Количество треугольников				Средняя мера качества треугольников					
	Скала	Т6	Канейро	.К.	Скала	Т6	Канейро	.К.		
Сфера (а)	6000	1	0000	8	000	,54	,47	4	0,5	,52
Тор (б)	500	5	500	2	900	,54	,47	1	0,5	,53
Усеченный конус (в)	1500	1	900	5	950	,56	,46	4	0,5	,58
Кольцо (г)	4500	1	500	7	000	,53	,46	3	0,5	,56
Произвольная фигура с отверстиями (д)	100	4	000	2	200	,57	,47	2	0,5	,53
Сетка (е)	000	3	500	1	500	,7	,7		0,7	,7



**Рис. 2.** Различные изображения триангулированных поверхностей

Анализируя результаты, полученные в ходе исследований (табл. 1), можно сделать следующие выводы:

- метод Скалы генерирует неоправданно большое количество треугольников (к примеру, при визуализации поверхности тора этот метод произвел в 5 раз больше треугольников, чем метод марширующих кубов).

- метод марширующих кубов генерирует значительно меньшее количество треугольников, чем другие методы, а качество сгенерированных

треугольников является оправданным для построения поверхности, что позволяет подготовить объект к печати, не прибегая к высокоточному и дорогостоящему оборудованию.

**Выводы.**

Таким образом, можно сказать, что метод марширующих кубов имеет лучшие показатели качества по критериям количества и качества генерируемых треугольников для

построения триангулированной поверхности ЧЛО.

Несмотря на существование топологической неточности в генерируемой поверхности, метод марширующих кубов широко используется на практике, т.к. вероятность проявления ошибок такого рода достаточно мала, а реализация данного метода с использованием параллельных и распределенных вычислений позволит работать с поверхностью с минимальными задержками во времени (практически в реальном времени) [4].

Целесообразнее использовать метод марширующих кубов для построения поверхности ЧЛО, а для построения предоперационного шаблона метод Канейро. Это позволит минимизировать время выполнения триангуляции объектов и затраты на ресурсы компьютерной системы, создать поверхность без потери данных (мелких объектов, или фрагментарно отсутствующих элементов), а также позволит создать предоперационный шаблон, пригодный для печати на 3D принтерах среднего ценового диапазона. Направлением дальнейших исследований является оптимизация методов триангуляции для работы со снимками ЧЛО в реальном времени, что позволит ускорить процесс определения и выделения области поражения, а также модификация методов создания предоперационного шаблона, с учетом необходимости расчета прочностных характеристик, пригодного для изготовления конечного имплантата.

#### Литература

1. Андрей Семенихин. Сравнительный анализ методов интерактивной триангуляции сеточных функций. Компьютерная графика и мультимедиа. Выпуск №2 (2) /2004 cgm.graphicon.ru

2. Bernardo P. Carneiro, Arie E. Kaufman, SIGGRAPH'96, pp. 205-210

3. Y. Ohtake, A. G. Belyaev, Proceedings of the International Conference on Shape Modeling & Applications, Page: 74, 2001.

4. А.С. Резниченко, М.В. Привалов Повышение производительности методов реконструкции поверхности за счет применения параллельных вычислений. Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг (ІУСКМ–2013)/Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. - Донецьк, ДонНТУ — 2013, Том 1.

5. Yutaka Ohtake, Alexander G. Belyaev, ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, pp. 171 - 178, 2002.

6. Andre Gueziec, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 1, Issue 4, pp. 328 - 342, December 1995

7. Tasso Karkanis, A. James Stewart, IEEE Computer Graphics and Applications, v.21 n.2, p.60-69, March 2001

8. B. Crespın, P. Guitton, C. Schlick. Proceedings of CSG'98, 1998

9. Marshall Bern and David Eppstein, Computing in Euclidean Geometry Eds. World Scientific, 1992, pp. 23-90

10. C. Rocchini, P. Cignoni, F. Ganovelli, International Conference on Shape Modeling & Applications, 2001.

11. Adriano Lopes, Ken Brodlie, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, pp 16-29, 2002

12. Sergey V. Matveev, Proceedings IEEE Visualization '94, pp. 288-292

13. Andrew P. Witkin, Paul S. Heckbert, Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp: 269 - 277, 1994.

*M. D. Safonov, D. D. Novikov, M.V. Privalov. Methods of surface building by CT images for creation of the maxillofacial skeleton model using 3D printing.* Article deals with the task related to buildup of 3D model of the maxillofacial skeleton applicable for printing. Performed analysis of the variety of surface building methods with purpose of method selection that is most suitable for described task. Details and specifics of application of existing methods to different parts of the objects being modeled have shown.

**Keywords:** implant, surface, triangulation, 3D printing, cell.

Статья поступила в редакцию 12.2.2017  
Рекомендована к публикации д-ром тех. наук В.Н. Павлышом