

# АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЧЕРЕПА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Курочка К. С., Карась О. В.  
Кафедра информационных технологий,  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
Гомель, Республика Беларусь  
E-mail: olga.karas123@gmail.com

*Данная статья посвящена вопросу построения трехмерных моделей черепа человека на основе анализа данных компьютерной томографии. В статье рассмотрены основные методы сегментации КТ-изображений и генерации 3D моделей – алгоритмы Marching Cubes и Dual Contouring. Приведена последовательность шагов обработки данных КТ, включающая предобработку, сегментацию, извлечение слоев и построение полигональной сетки методами Marching Cubes или Dual Contouring. Описаны типичные ошибки получаемых моделей и способы их исправления. В заключение сформулированы рекомендации по улучшению качества 3D реконструкции.*

## ВВЕДЕНИЕ

Построение трехмерных моделей черепа на основе КТ является актуальной задачей в различных областях медицины и биологии. 3D-реконструкция позволяет детально визуализировать анатомию пациента для диагностики патологий, планирования хирургического вмешательства, изучения биомеханики черепа. Кроме того, на основе индивидуальных моделей возможно изготовление имплантатов методом 3D-печати.

### I. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРЕПА ЧЕЛОВЕКА

Компьютерная томография позволяет получить поперечные срезы черепа, которые могут содержать не только изображения костей, но также и других тканей. Поэтому необходимо выполнить предварительную обработку КТ-изображений, включающую, как правило, фильтрацию и сегментацию данных с целью выявления костных структур [1, 2], формирующих поверхность черепа человека.

Для сегментации, на практике часто используют метод водораздела [3], метод среднего сдвига [4], GrabCut [5] и др. Это позволяет выделить костную ткань и определить контуры черепа на каждом слое, которые, впоследствии, будут использованы для создания трёхмерной модели.

Наиболее популярными методами трехмерной реконструкции объектов являются алгоритмы: марширующих кубов (Marching Cubes) [6] и двойных контуров (Dual Contouring) [7].

Алгоритм марширующих кубов используется в компьютерной графике для построения полигональной сетки по скалярному полю. Применяется для визуализации и обработки медицинских данных.

Работает путем перебора вокселей в объеме, определяя их положение на поверхности. Основные шаги:

- деление объема на сетку вокселей со скалярными значениями;
- классификация вокселей и определение полигональных шаблонов;
- вычисление пересечений ребер вокселей с поверхностью;
- генерация треугольников по пересечениям;
- объединение полигонов в общую сетку.

Алгоритм марширующих кубов имеет ограничения в виде "ступенчатости" сетки при низком разрешении. Можно оптимизировать установкой углов треугольников и распараллеливанием вычислений.

Алгоритм Dual Contouring позволяет строить гладкие и точные 3D модели на основе объемных данных. В отличие от Marching Cubes, он генерирует меньше полигонов на плоских участках и создаёт более плавные поверхности. Это достигается вычислением градиента функции в узлах сетки и оптимальным размещением вершин модели внутри ячеек. Алгоритм находит точки пересечения ребер ячейки с поверхностью, вычисляет градиенты функции в них и ищет оптимальное положение вершины ячейки. Основная трудность – выбор положения вершины при коллинеарных или противоположных градиентах. Несмотря на сложности, алгоритм дает высокое качество реконструкции и используется в современных 3D приложениях [7].

После построения 3D-модели необходимо убрать ошибки на модели, которые появляются из-за несовершенства используемого алгоритма Dual Contouring, а также из-за особенностей процедуры КТ-сканирования.

Возможные ошибки модели:

- self-intersection faces – обозначает наличие пересекающихся не по граням полигонов в модели;
- non-manifold vertices – обозначает наличие в модели вершин, которые используются более чем двумя полигонами;

- наличие лишних объектов рядом с моделью черепа, из-за наличия на изображениях КТ-элементов сканера, таких, как рамка фиксации головы пациента.

Для удаления всех вышеперечисленных проблем меша используется следующий алгоритм:

1. итеративно вызывается метод MeshAutoRepair библиотеки geometry3Sharp [8]. Количество итераций на этом шаге равно пяти;
2. из меша выбираются все соединённые между собой структуры полигонов. Таким образом получается несколько структур полигонов, не связанных между собой. Самой крупной структурой является череп, а все остальное – лишние объекты, которые необходимо удалить. Таким образом в меше остаётся только структура с наибольшим количеством полигонов, а всё остальное – игнорируется;
3. производится ремешинг модели по средствам метода FastestRemesh библиотеки geometry3Sharp. Данный метод позволяет сгладить острые грани модели, а также исправить большинство ошибок геометрии;
4. производится симплификация модели, для упрощения дальнейшей работы с программами слайсерами.

Конечным результатом является трехмерная модель поверхности человеческого черепа:

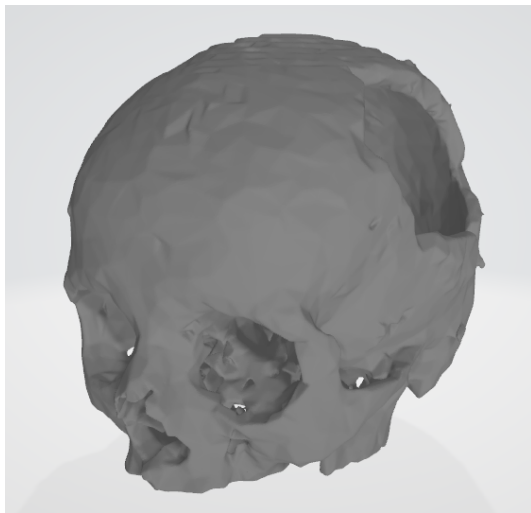


Рис. 1 – Поверхность черепа человека, построенная с помощью алгоритма Dual Contouring

Для улучшения результатов, полученных при использовании алгоритмов Marching Cubes и Dual Contouring, можно учесть следующие рекомендации:

- предварительно обрабатывать и улучшать входные данные для повышения точности;

- экспериментировать с различными пороговыми значениями для достижения желаемой детализации и точности;
- увеличивать разрешение данных;
- применять методы сглаживания (нормальная оценка, изменение положения вершин и лапласовское сглаживание) для уточнения поверхностей и удаления артефактов;
- применять адаптивные подходы, которые регулируют разрешение на основе особенностей локальных данных;
- оптимизировать реализацию для повышения производительности (параллельная обработка, использование памяти, аппаратное ускорение).

Следуя этим рекомендациям и учитывая конкретные требования приложения, можно повысить точность, качество и эффективность результатов, полученных с помощью алгоритмов Marching Cubes и Dual Contouring.

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая модификация алгоритма построения трёхмерной модели позволяет на основе DICOM файлов, содержащих результаты томографического исследования черепа человека, последовательно генерировать достаточно гладкие 3D-модели черепа, которые могут быть напечатаны на 3D-принтере.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurachka K. S., Tsalka I. M. Vertebrae detection in X-ray images based on deep convolutional neural networks // 2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics. – IEEE, 2017. – С. 194-196.
2. Kurochka K. S., Panarin K. A. An algorithm of segmentation of a human spine X-ray image with the help of Mask R-CNN neural network for the purpose of vertebrae localization // 2021 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST). – IEEE, 2021. – С. 55-58.
3. Прэнт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэнт. – М. Мир: 1982. – С. 502.
4. Машинное обучение: алгоритм кластеризации среднего сдвига [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://russianblogs.com/article/66831200448/>. – Дата доступа: 09.10.2023.
5. Гонсалес, Р. С. Цифровая обработка изображений / Р. С. Гонсалес, Р. Е. Вудс. – Москва: 2012. – С. 186.
6. Golovanov, N. Geometric Modeling: The Mathematics of Shapes / N. Golovanov. – Natick, MA: A.K. Peters, 2002. – pp. 89.
7. Warren, J. Dual Contouring: A New Method for Generating 3D Hexahedral Meshes / J. Warren. – Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2004. – pp. 123.
8. DMesh3: A Dynamic Indexed Triangle Mesh [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gradient-space.com/tutorials/dmesh3>. – Дата доступа: 09.10.2023.