

УДК 004.925

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ СЕРДЦА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ-МЕДИКОВ

В.В. Попов, Е.В. Трофименко, И.В. Хмельва

Представлен программный продукт визуализации трехмерной модели сердца, которая построена с использованием триангуляции Делоне. Графический вывод реализован с помощью графической библиотеки OpenGL.

Ключевые слова: моделирование; трехмерная модель сердца; триангуляция.

THE DEVELOPMENT OF THREE-DIMENSIONAL COMPUTER VISUALIZATION OF THE HEART MODEL FOR TEACHING MEDICAL STUDENTS

V.V. Popov, E.V. Trofimenko, I.V. Khmeleva

The software product was developed for visualization of three-dimensional model of the heart. In which three-dimensional model was constructed using triangulation Delone. Graphical output was implemented using OpenGL graphics library.

Keywords: modeling; three-dimensional model of the heart; triangulation.

В практике обучения молодых специалистов и диагностике сердечно-сосудистых заболеваний задача визуального представления структуры живого сердца имеет огромное значение [1, 2].

Трехмерная компьютерная модель сердца позволяет наглядно представить геометрию, анатомические отделы и изменения тканей сердца при протекании различных заболеваний [3].

Проблема диагностики сердечно-сосудистой системы – в сложности ее функционирования, что позволяет только опытным специалистам ставить точный диагноз. Поэтому построение и визуализация геометрической модели сердца, отвечающей требованиям адекватности средствами компьютерной графики, является актуальной научной задачей, решение которой позволит вывести диагностику состояния сердечно-сосудистой системы на качественно новый уровень.

Для моделирования трехмерной формы объектов используются различные методы, отличающиеся трудоемкостью и количеством исходных данных. Выбор метода моделирования зависит от той информации, которую техническое средство визуализации способно предоставить исследователю об объекте [4].

С точки зрения синтеза изображения, сердце представляет собой сложный графический трех-

мерный объект, описание формы которого трудно поддается формализации, а реализация модели требует от компьютера высокой производительности и больших вычислительных затрат.

Известно несколько разработанных программ программного моделирования, среди них: ECGSim, система “КАРДИОВИЗОР” и CARTO XP.

Система ECGSim. Это интерактивная программа моделирования, которая позволяет изучать отношения между электрической активностью миокарда и результирующими потенциалами на грудной клетке [5]. При моделировании и визуализации электрической активности желудочков в ECGSim, используется визуальная трехмерная модель сердца (рисунок 1). Цветом обозначено распределение электрических потенциалов по поверхности. Для определения геометрии сердца используется аппарат МРТ.

Система ECGSim является бесплатной и предназначена для обучения студентов медиков, а не для целей диагностики.

Недостатком данной системы является не соответствующая требованиям реалистичности модель, не предусмотрена возможность взаимодействия с пользователем в виде возможного вращения модели по осям координат и увеличения, уменьшения ее размеров.

Система “КАРДИОВИЗОР” представляет собой скрининг-анализатор экспресс-оценки состо-

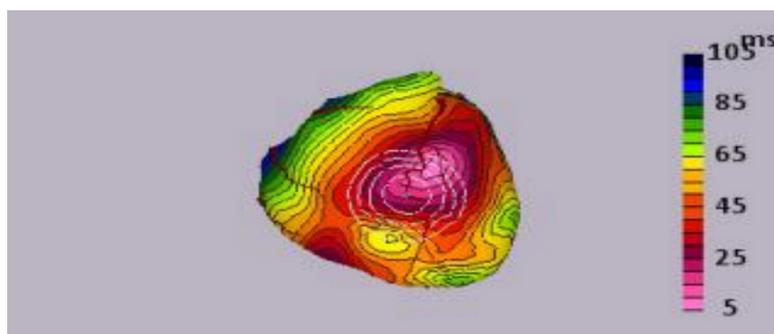


Рисунок 1 – Визуальная модель сердца построенная в ECGSIM

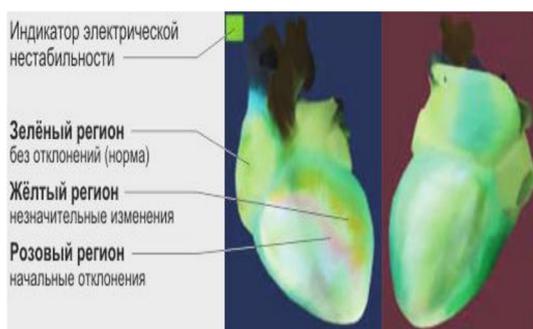


Рисунок 2 – Модель сердца, представленная в системе “Кардивизор”

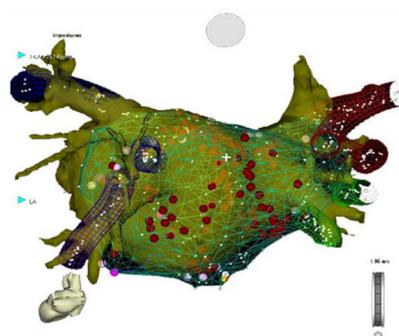


Рисунок 3 – Модель сердца, представленная программой CARTO XP

яния сердца по электрокардиограмме сигналов от конечностей, снимаемых четырьмя прикрепленными электродами (рисунок 2) [6].

Данная система проста в обращении. Получаемые трехмерные модели сердца имеют реалистичный вид, что позволяет наблюдать пациента в процессе госпитального лечения, а также быстро и неинвазивно собирать информацию о небольших изменениях процессов электрического возбуждения миокарда.

Система CARTO XP. Система внутрисердечной навигации CARTO XP позволяет в реальном времени получать трехмерные цветные карты сердца (рисунок 3) [7]. Схемы визуализации позволяют увидеть сложные пространственные взаимоотношения структур сердца, показывают данные электрограмм, которые накладываются на анатомические карты и отображаются при помощи цветовой шкалы.

Недостатком этих систем является высокая стоимость и наличие целого комплекса вспомогательного оборудования, что затрудняет использование их в процессе обучения.

Система визуализации сердечно-сосудистой системы в процессе обучения предполагает построение реалистичного трехмерного изображения

сердца с возможностью сечения произвольными плоскостями и визуализацией внутреннего строения сердца.

Поверхность сердца не имеет аналитического описания (с помощью аналитических поверхностей можно схематично представить различные отделы сердца, но это будет достаточно грубое приближение, не отвечающее требованиям реалистичности) [8, 9]. Поэтому синтез реалистичной модели начинается с формирования массива “опорных точек”, отражающих с достаточной детализацией форму сердца. Под ними понимается набор точек трехмерного пространства, заданных координатами (x, y, z) и принадлежащих поверхности сердца. Количество точек определяется детальностью представления поверхности. Так как сердце является сложным криволинейным объектом, то чем больше имеется опорных точек, тем точнее можно восстановить криволинейные участки поверхности. После формирования массива опорных точек осуществляется аппроксимация поверхности модели сердца. Графический вывод реализован с помощью графической библиотеки OpenGL.

В работе реализован алгоритм построения трехмерной реконструкции сердечно-сосудистой

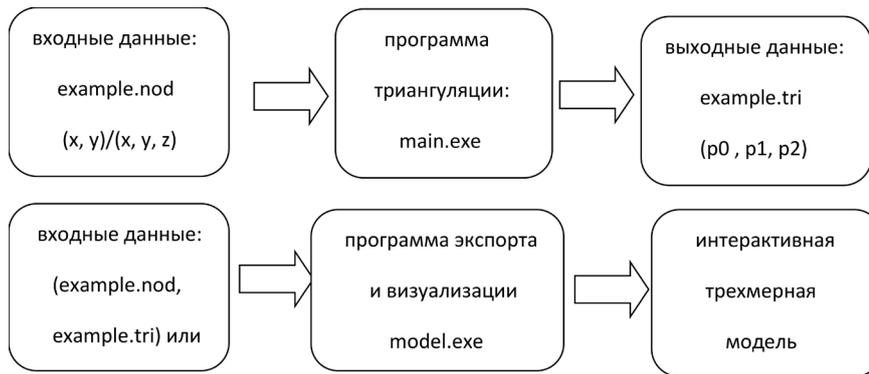


Рисунок 4 – Схема работы приложений

системы реального пациента и разработана система компьютерной визуализации, которая позволяет студентам-медикам использовать современные системы в процессе обучения, не прибегая к инвазивному вмешательству.

Вначале было осуществлено построение триангуляции Делоне [10] по набору опорных точек трехмерного объекта, а затем произведен экспорт и визуализация трехмерных моделей, построенных как в графических редакторах, так и полученных путем триангуляции по опорным точкам. Схема работы приложения представлена на рисунке 4.

Такая последовательность была обусловлена независимостью выбора средств визуализации полученных данных, как с помощью графических библиотек, так и с помощью различных инструментов разработки трехмерных приложений. В будущем возможен переход в веб пространство или на мобильные платформы.

Для формирования входных данных могут применяться различные способы компьютерной диагностики, такие как эхокардиография, томография и ультразвуковая эхоскопия [11]. На их основе строятся массивы опорных точек, которые заносятся в файл и подаются на вход программы. Данные хранятся в определенном формате, для каждой вершины указывается набор ее координат по трем осям, разделенных через запятую.

Программа триангуляции на входе получает один аргумент, текстовый файл с расширением “.nod”, содержащий координаты точек, разделенные запятой. Данные могут содержать как (x, y) координаты, так и (x, y, z), хотя z координата не используется в расчетах. На выходе программа возвращает файл со списком треугольников. Файл с треугольниками создается в той же директории, что и входной файл, но с расширением “.tri”. То есть если файл example.nod был триангулирован, то результаты сохраняются в example.tri в той же

директории. Результаты триангуляции предоставлены в виде набора индексов вершин треугольников, разделенные запятой и для каждого треугольника записанные с новой строки.

Для этого разработана соответствующая структура и типы данных. Так для представления в памяти компьютера координат опорных точек, поступающих на входе, были созданы два класса db12 и db13. Они, в общем схожи. Их главное различие в описании координат исходных точек для случая двух- или трехмерного пространства.

Класс db12 выглядит следующим образом:

```

class db12
{ private: int id;
public: double x, y;
public:
    db12(void);
    db12(int, double, double);
    void Set(int, double, double);
    void Set(db13*);
    void Center(db12* p0, db12* p1);
    db12 &operator=(const db12 &that);
    int GetID(void){ return id;}
    double GetX(void){ return x;}
    double GetY(void){ return y;}
    void SetID(int i){ id = i; } ;
  
```

В нем представлены поля и методы для случая двумерного пространства. Все функции в основном предназначены для инициализации или передачи координат точки. Класс db13 имеет похожую структуру, единственное отличие – это поле, добавленное для описания координат по оси OZ.

Для работы с данными, полученными на выходе программы, разработан класс dtri, который описывает вершины треугольников и методы по работе с ними.

```

class dtri
{ private:
int id;
  
```

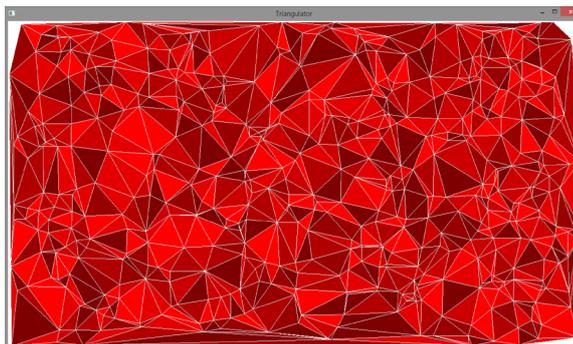


Рисунок 5 – Триангуляция на плоскости

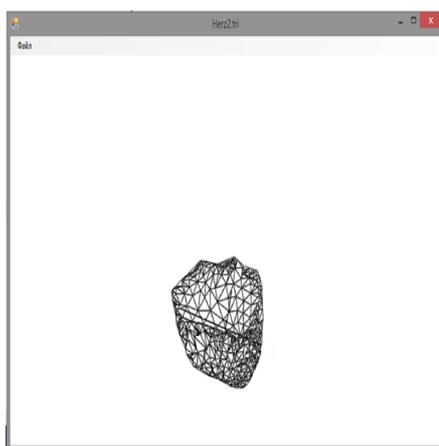


Рисунок 6 – Каркасная модель сердца в трехмерном пространстве

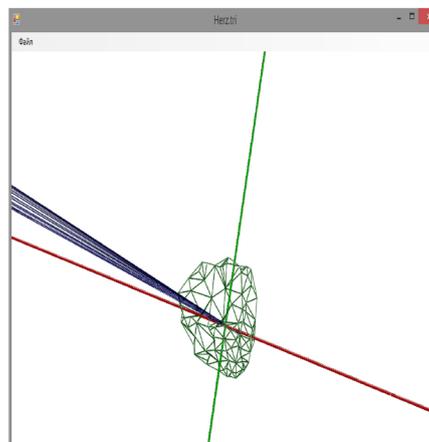


Рисунок 7 – Каркасная модель сердца с осями координат

```

int point[3];
public:
    int GetID(void) { return id; }
    int GetPnt(int i) { return (0 > i || 3 <=
i) ? -1 : point[i]; }
    void SetID(int n) { id = n; }
    void Set(int n, int p0, int p1, int p2) {
id = n; point[0] = p0; point[1] =
p1; point[2] = p2; }
    void Set(int p0, int p1, int p2) {
Set(id, p0, p1, p2); } };

```

Для обеспечения удобства работы и описания алгоритма были разработаны вспомогательные классы Circle2 и lin2.

Класс Circle2 представляет объект окружность, описывающий зону поиска новых точек, соседей по алгоритму прямой триангуляции. И таким образом представляет собой поля и методы для описания окружности и нахождения новых точек в ее пределах [8,10].

Класс lin2 также является вспомогательным при создании триангуляции и используется для

построения зоны поиска соседних точек и расчета шага увеличения радиуса окружности, охватывающей все большее количество точек.

Результаты работы выводятся в окно программы визуализации. На рисунке 5 показана триангуляция Делоне пятисот точек произвольного набора, выполненная программой триангуляции на случай двумерного пространства.

На рисунке видно, что получившиеся треугольники стремятся быть равносторонними, а наличие сильно вытянутых треугольников наблюдается только в областях, граничных с выпуклой оболочкой, т. е. на границе, описывающей весь набор точек.

Построение трехмерной модели сердца по набору опорных точек также производится в окне приложения для визуализации.

На рисунках 6 и 7 представлены трехмерные каркасные модели сердца, построенные на опорных точках с применением алгоритма триангуляции Делоне. Представленная модель сердца не включает аорту, полую вену, легочную артерию и предсер-

дие, на ней показана непосредственно сердечная мышца. Приложение является полностью интерактивным и дает пользователю три степени свободы, позволяя вращать модель по трем осям – x, y, z. Также имеется возможность увеличивать или уменьшать рассматриваемую модель и переключаться в полноэкранный режим. Все это вместе позволяет получить доступ к любой области на поверхности модели и выбрать нужный угол обзора.

Представленные на двух рисунках модели отличаются количеством опорных точек, на которых они построены. В первом случае взято около пятисот точек, во втором – около ста точек. Это дает возможность менять детализацию показываемой модели. Также имеется опция по добавлению к сцене визуализации отображения трех осей координат, что может улучшить восприятие трехмерного пространства.

Программа также работает с моделями, построенными в графических редакторах. Производится экспорт модели путем считывания данных о ней из файла и вывод изображения в окно приложения.

Предложенный способ трехмерной реконструкции и визуализации модели живого сердца на основе каркасного представления, позволил реализовать учебную интерактивную модель для студентов медицинских направлений, в виде наглядного информационного приложения для отображения анатомических особенностей строения сердца, как в целом, так и в случае для конкретного пациента.

Литература

1. Бодин О.Н. Использование современных компьютерных технологий в подготовке студентов-медиков / О.Н. Бодин, И.П. Бурукина, А.Н. Митрошин // Университетское образование. 2004: сб. трудов VIII межд. научно-метод. конф. Пенза, 2004.
2. Бодин. О.Н. Разработка визуальной модели сердца для обучения студентов медиков / А.Н. Митрошин, А.В. Кузьмин, О.Н. Бодин // Известия вузов. Поволжский регион. Медицинские науки. 2007. №2. С. 3–10.
3. Бодин. О.Н. Синтез реалистичной поверхности модели сердца / А.В. Кузьмин, О.Н. Бодин // Медицинская техника. 2006. № 6.
4. Тихомиров Ю.И. Программирование трехмерной графики / Ю.И. Тихомиров. СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 1998. 256 с.
5. Программа моделирования электрической активности миокарда. [Электронный ресурс] URL:<http://www.ecgsim.org>
6. Комплекс для экспресс-диагностики сердца. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cardiovisor.ru>
7. Система внутрисердечной навигации. [Электронный ресурс] URL: <http://www.en.wikipedia.org/wiki/CARTO>
8. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование / Н.Н. Голованов. М.: Физматлит, 2002.
9. Петровский Б.В. Краткая медицинская энциклопедия. 2-е изд. / Б.В. Петровский. М.: Советская энциклопедия, 1989.
10. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение / А.В. Скворцов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с.
11. Божко А.Н. Компьютерная графика: учеб. пособие для вузов / В.Б. Магичев, М.Д. Жук, А.Н. Божко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 392 с.