

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра Системного Программирования

Метелева Алиса Андреевна

Программный комплекс для диагностики  
лица по 3D моделям из фотоснимков и 3D  
моделям из томографических снимков  
перед пластической операций

Дипломная работа

Научный руководитель:  
ст. преп. Немешев М. Х.

Рецензент:  
Петров А. Г.

Санкт-Петербург  
2017

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software Engineering Department

Meteleva Alisa Andreevna

Software package for face diagnosis by 3D  
models from photos and 3D models from  
tomography images before plastic surgery

Graduation Thesis

Scientific supervisor:  
M.H. Nemeshev

Reviewer:  
A.G. Petrov

Saint-Petersburg  
2017

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1. Постановка задачи</b>	<b>5</b>
<b>2. Обзор</b>	<b>6</b>
2.1. Система Phoenixcas 3D Viewer . . . . .	6
2.2. Золотое сечение в 3D . . . . .	7
2.3. Методы вычисления кривизны . . . . .	10
<b>3. Реализация вычислительных функций</b>	<b>13</b>
3.1. Карта кривизны . . . . .	13
3.1.1. Интеграция библиотеки . . . . .	13
3.1.2. Особенности реализации . . . . .	13
3.2. Метод золотого сечения . . . . .	15
3.2.1. Особенности реализации . . . . .	15
<b>4. Архитектура модуля</b>	<b>17</b>
4.1. Модуль для диагностики лица . . . . .	17
4.2. Интеграция модуля . . . . .	19
<b>5. Особенности реализации модуля</b>	<b>20</b>
<b>6. Апробация модуля</b>	<b>21</b>
<b>7. Результаты</b>	<b>23</b>
<b>Список литературы</b>	<b>24</b>

# Введение

Компьютерные системы широко применяются в медицине, в частности в области планирования пластических операций. Перед проведением оных пациента сканируют, строят его трехмерную модель, которая затем анализируется врачом, в некоторых случаях изменяется и обновленная демонстрируется пациенту, чтобы показать возможный результат операции. Только после согласования с пациентом желаемого результата врач проводит планирование операции, используя все ту же 3D модель.

На этапе анализа модели хирург должен провести какую-то диагностику, в результате которой будут выявлены те или иные дефекты у пациента. Для этого врачу необходимо получить какие-то показатели/метрики отклонения модели, которые могут помочь поставить диагноз. Так как наиболее привлекательными считаются лица, пропорции которых соотносятся с пропорцией золотого сечения, то значительная часть дефектов может быть выявлена при демонстрации нарушения пропорций [1].

Помимо нарушений пропорциональности, внешний вид могут портить любые деформации лица, которые в какой-то степени можно пронаблюдать с помощью карты кривизны поверхности. Она демонстрирует пользователю все ямочки, все выпуклости и вогнутости лица, и если у пациента есть что-то вроде шишки, то, не прибегая к вращению модели, можно приблизительно оценить насколько она выпирает над поверхностью и принять решение о ее ликвидации.

В компьютерной системе Phoenixcas 3D Viewer встроена возможность построения 3D модели лица по фотоснимкам и томографическим снимкам пациента, а также проведения измерений по получившимся трехмерным моделям, наложение текстур, различные способы сравнений моделей и т.д.. Чтобы расширить функциональность системы, было решено добавить в нее модуль для диагностики лица. В данной работе описывается разработка функций для выполнения диагностики и разработка модуля, применяющего в своей логике эти функции.

# 1. Постановка задачи

Целью данной дипломной работы является реализация методов для библиотеки анализа трехмерных моделей и демонстрация их применения на модуле диагностики лица в системе Phoenixcas 3D Viewer. Для достижения данной цели в рамках работы были сформулированы следующие задачи.

- Реализовать вычислительные функции для библиотеки методов обработки 3D-моделей
- Разработать архитектуру и реализовать модуль для диагностики лица
- Провести апробацию модуля

## 2. Обзор

### 2.1. Система Phoenixcas 3D Viewer

В системе планирования операций, для которой разрабатывается модуль, уже реализованы многие плагины (модули), решающие различные пользовательские задачи. Например вычисление площади поверхности, расчет деформации поверхности после каких-либо вмешательств, изменение формы носа и др.

Плагины не затрагивают работу друг друга, обращаясь только к тем внутренним алгоритмам и структурам данных, которые есть в общем доступе системы.



Рис. 1: Архитектура системы

Каждый из модулей состоит из двух частей: часть, связанная с визуализацией, так называемый пользовательский интерфейс, и часть, реализующая логику работы самого модуля. Графический интерфейс написан на Javascript, HTML и CSS, логика же реализована на языке C++.

Кроме алгоритмов, реализованных в рамках разработки системы, в Phoenixcas 3D Viewer подключены сторонние библиотеки, которые недоступны для вызова из модуля и могут быть использованы только при разработке внутренних, общих алгоритмов системы.

Таким образом, всю архитектуру системы можно разделить на три уровня (рис. 1).

Разработка Phoenixcas 3D Viewer ведется в Microsoft Visual Studio 2010.

## 2.2. Золотое сечение в 3D

Золотое сечение - гармоническая пропорция, в которой большая часть относится к меньшей части, как всё целое относится к большей.

$$a > b, \quad \frac{a}{b} = \frac{a+b}{a}$$

Эта пропорция выражается формулой

$$\Phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1.61802...$$

.

Так как понятие привлекательности лица субъективно, то для правильной диагностики необходимо было вывести какую-то универсальную формулу, получить норму, в случае соответствия которой лицо объективно считалось бы красивым.

В 1855 Цейзинг в своём научном труде "Эстетические исследования" [9] изучил применение соотношения золотого сечения на человеке. В дальнейшем Стивен Марквардтом на основе работ Цейзинга, Аристотеля и Пифагора была разработана "маска красоты" [4] (рис. 2), в которой все черты лица идеально гармоничны и относятся одна к другой как 1:1.618. Накладывая такую маску на фотографию человека, отмечая несоответствия, можно выявить те черты, которые нуждаются в коррекции.

Основными геометрическими фигурами, в которых соблюдаются про-

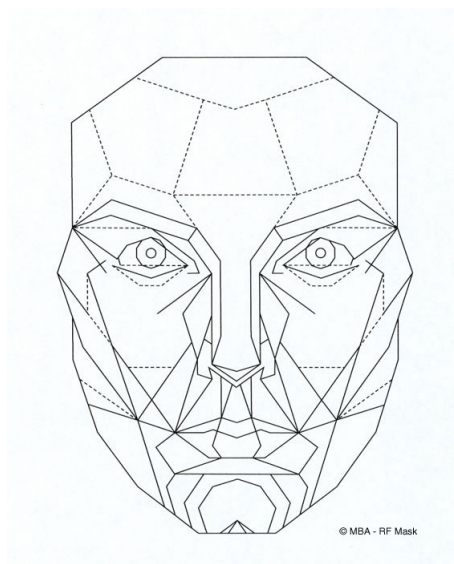


Рис. 2: Маска красоты [1]

порции золотого сечения и которые имеют некоторое отношение к геометрии человеческого лица [7], являются пентагон (правильный пятиугольник) и пентаграмма. В этих фигурах каждая точка пересечения ребер делит другие ребра в соответствии с золотым сечением (рис. 3).

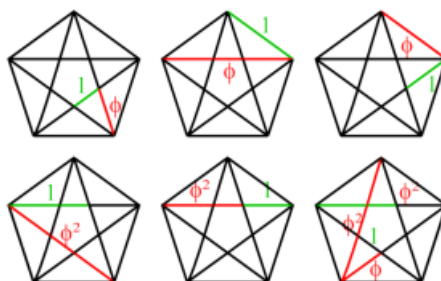


Рис. 3: Золотое сечение в пентаграмме [6]

Также популярным объектом, ассоциирующимся с золотым сечением, является спираль Фибоначчи. Ее часто используют для анализа пропорциональности объектов (рис. 4).

Но так как в данной работе опирались на работу Марквардта, то большее внимание уделяется соотношениям золотого сечения в пентаграммах, которые и использовались в патенте знаменитого хирурга.

Для построения маски Марквардт пользовался линиями и точками, полученными при различных пересечениях ребер пентагонов, которые,



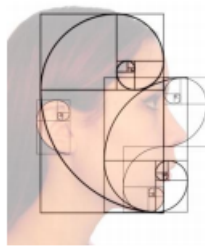


Рис. 4: Спираль фибоначчи в профиле человека [6]

как уже указывалось ранее, пересекаются в идеальной пропорции. Сами пентагоны строились исходя из расстояния между зрачками.

Ниже отображен алгоритм [6] для построения ключевых точек маски (рис. 5).

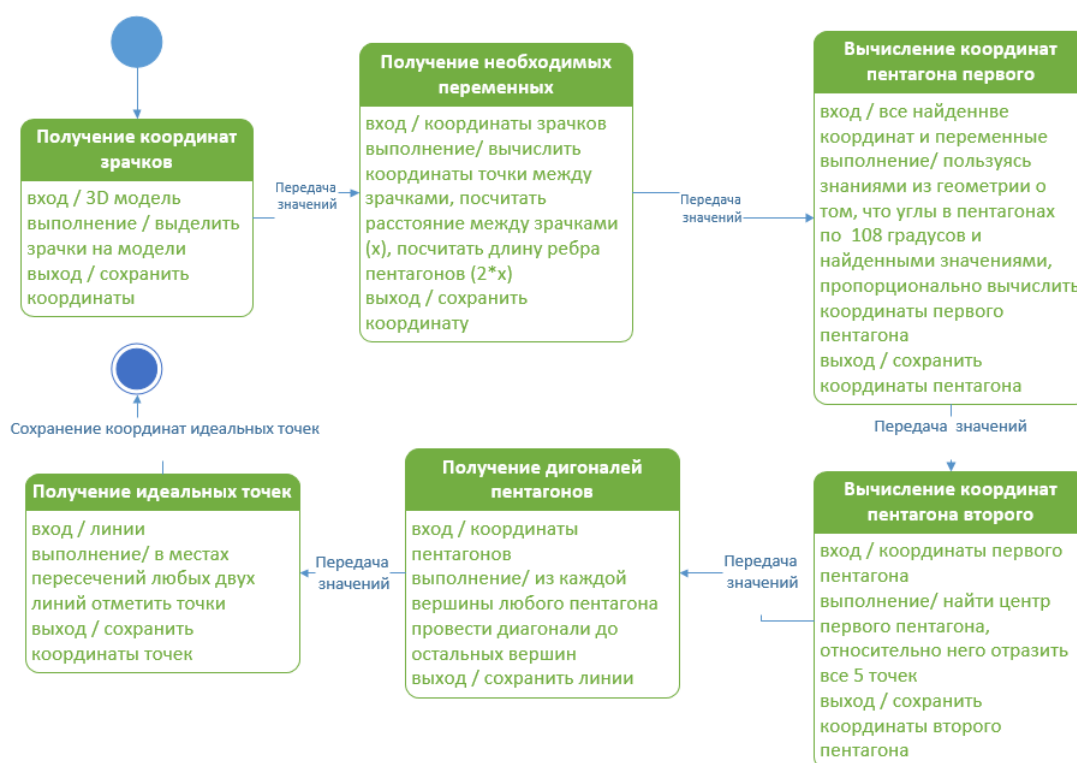


Рис. 5: Диаграмма состояний алгоритма построения маски золотого сечения

В результате работы данного алгоритма мы получаем диагонали пентагонов, которые пересекаются в точках идеальных черт лица.

## 2.3. Методы вычисления кривизны

В пластической хирургии карты кривизны полезны для определения асимметрии. Если в правой части лица у человека есть более выпуклый участок, чем в левый, значит стоит это подкорректировать. Также это помогает отслеживать исправление дефектов до/после операции.

Кривизна - величина, характеризующая отклонение кривой (поверхности) от прямой (плоскости) [8].

Нормальное сечение - кривая, полученная как пересечение плоскости, проходящей через нормаль и единичный вектор плоскости касательной к исходной поверхности в некой точке, с исходной поверхностью.

Нормальная кривизна - скалярное произведение нормали к точке и вектора кривизны нормального сечения, проходящего через эту точку. Нормальная кривизна равна кривизне нормального сечения (рис. 6).

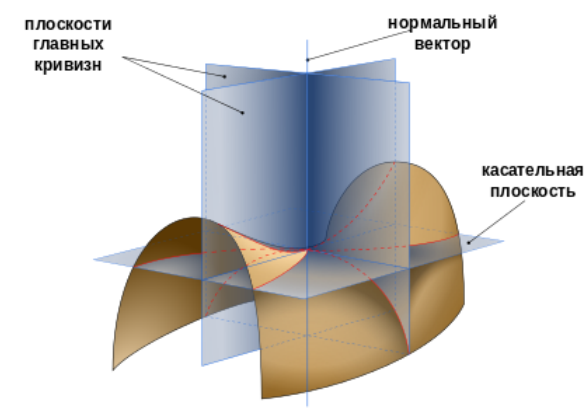


Рис. 6: Седловая поверхность с нормальными плоскостями в направлениях главных кривизн [8]

Карта кривизны - текстура на трехмерной модели, отражающая значения ее кривизн в каждой точке (вогнутости и выпуклости).

Для построения карты кривизны необходимо визуализировать колебания значений кривизны на трехмерной модели. Для этого необходимо вычислить значения кривизны в каждой точке модели и спроецировать эти значения на цветовую шкалу.

Основными формулами подсчета кривизны являются формулы кривизны по Гауссу (1) и формула средней кривизны (2) (рис. 7) [2]:

$$K = k_1 * k_2. \quad (1)$$

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2}. \quad (2)$$

$k_1, k_2$  - максимальные и минимальные нормальные кривизны (главные кривизны) в двух главных направлениях.

Также

$$H = \frac{k_a + k_b}{2}, \quad (3)$$

где  $k_a, k_b$  [3] - кривизны любых двух ортогональных секущих плоскостей, проходящих через нормаль к точке.

Аналогично для большего количества секущих плоскостей[3]:

$$H = \frac{k_a + k_b + k_c}{3}, \quad (4)$$

где  $k_a, k_b, k_c$  - кривизны любых трех секущих плоскостей, проходящих через нормаль к точке, располагающимися под углом 60 градусов друг к другу.

Если секущие плоскости не проходят через нормаль[3]:

$$H = \left(\frac{k_a + k_b}{2}\right) * \cos(\theta), \quad (5)$$

где  $k_a, k_b$  - кривизны любых трех секущих плоскостей, пересекающихся в прямой  $l$ ,  $\theta$  - угол между вектором нормали к точке и вектором прямой  $l$ .

Перечисленные выше формулы удобны, если исходная плоскость задана каким-то уравнением или параметрически, но в ситуациях, когда плоскость задается набором вершин и индексов (треугольников), т.е. триангулировано, то вычисления в каждой точке нормалей, секущих плоскостей и их кривизн осложняются дополнительными расчетами.

Адаптированно к триангулированным поверхностям посчитать кривизны можно по формулам [3] (рис. 7):

•

$$K(p) = \frac{3(2\pi - \sum \alpha_i)}{\sum A(f_i)}, \quad (6)$$

где  $\sum \alpha_i$  - сумма углов вокруг точки, относительно которой считаем кривизну,  $\sum A(f_i)$  - сумма площадей треугольников вокруг точки

•

$$H(p) = \frac{3 \sum \|e_i\| \beta_i}{4 \sum A(f_i)}, \quad (7)$$

где  $\sum \|e_i\|$  - сумма длин ребер, выходящих из точки,  $\beta_i$  - углы между нормальными смежных треугольников,  $\sum A(f_i)$  - сумма площадей треугольников вокруг точки



Рис. 7: Иллюстрации к формулам вычисления кривизны [3]

## 3. Реализация вычислительных функций

### 3.1. Карта кривизны

#### 3.1.1. Интеграция библиотеки

Для того, чтобы была возможность пользоваться функциями вычисления кривизн не только из модуля диагностики лица, но и в других плагинов, занимающихся, к примеру, задачами, связанными с поверхностями всего тела, было решено вынести функциональность на уровень внутренних библиотек (рис. 8). GearCurvature доступна для подключения в любом модуле.

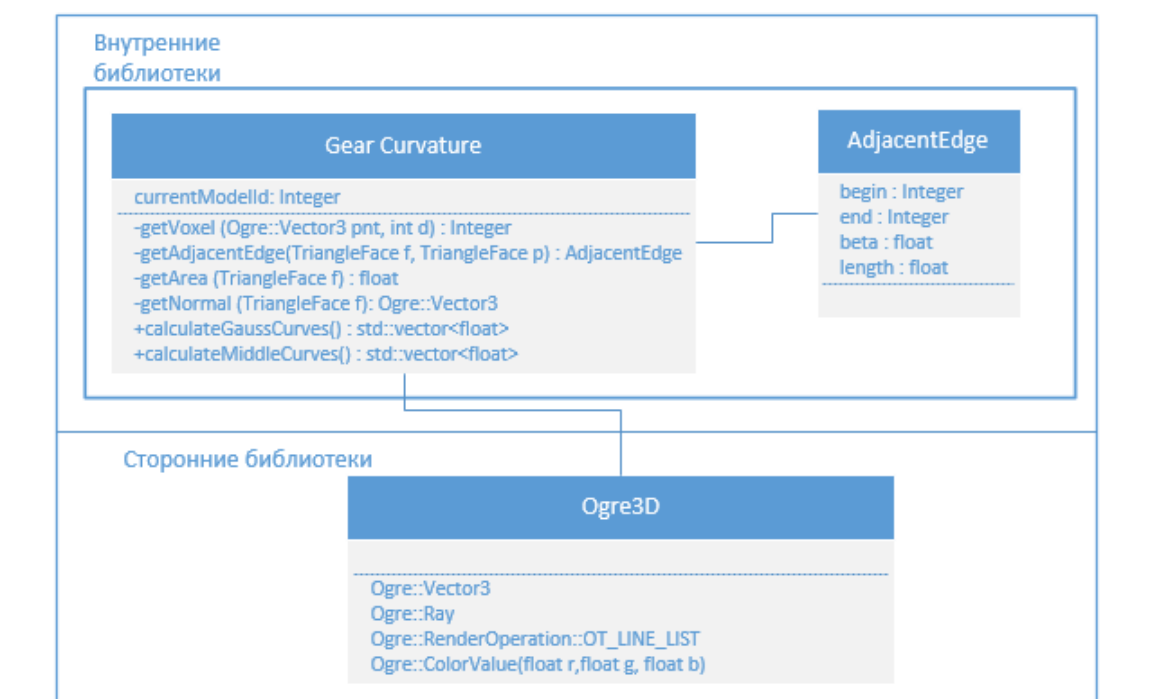


Рис. 8: Интеграция библиотеки кривизн

#### 3.1.2. Особенности реализации

Так как в системе Phoenixcas модели хранятся в виде набора вершин и индексов (треугольников), то были реализованы формулы подсчета кривизн, адаптированные для этого случая. Стоит отметить, что значения кривизны по Гауссу могут быть как положительными, так и

отрицательными, причем отрицательные значения говорят о том, что в данной точке плоскость вогнута. При этом, значения средней кривизны больше или равны 0, и чем больше значения, тем больше искривление плоскости в сторону выпуклости вверх или вниз.

Одним из главных ограничений является ограничение времени работы: расчеты не должны занимать больше 30 секунд. Поэтому одной из сложностей являлась задача вычисления кривизны по формуле средней кривизны (7). Необходимо считать длины смежных ребер и величины площадей смежных треугольников, но так как некоторые модели насчитывают от 100 000 полигонов, то реализовывать наивный способ с двумя вложенными циклами нельзя. Для этого использовался способ предварительного разбиения треугольников на воксели (рис. 9).

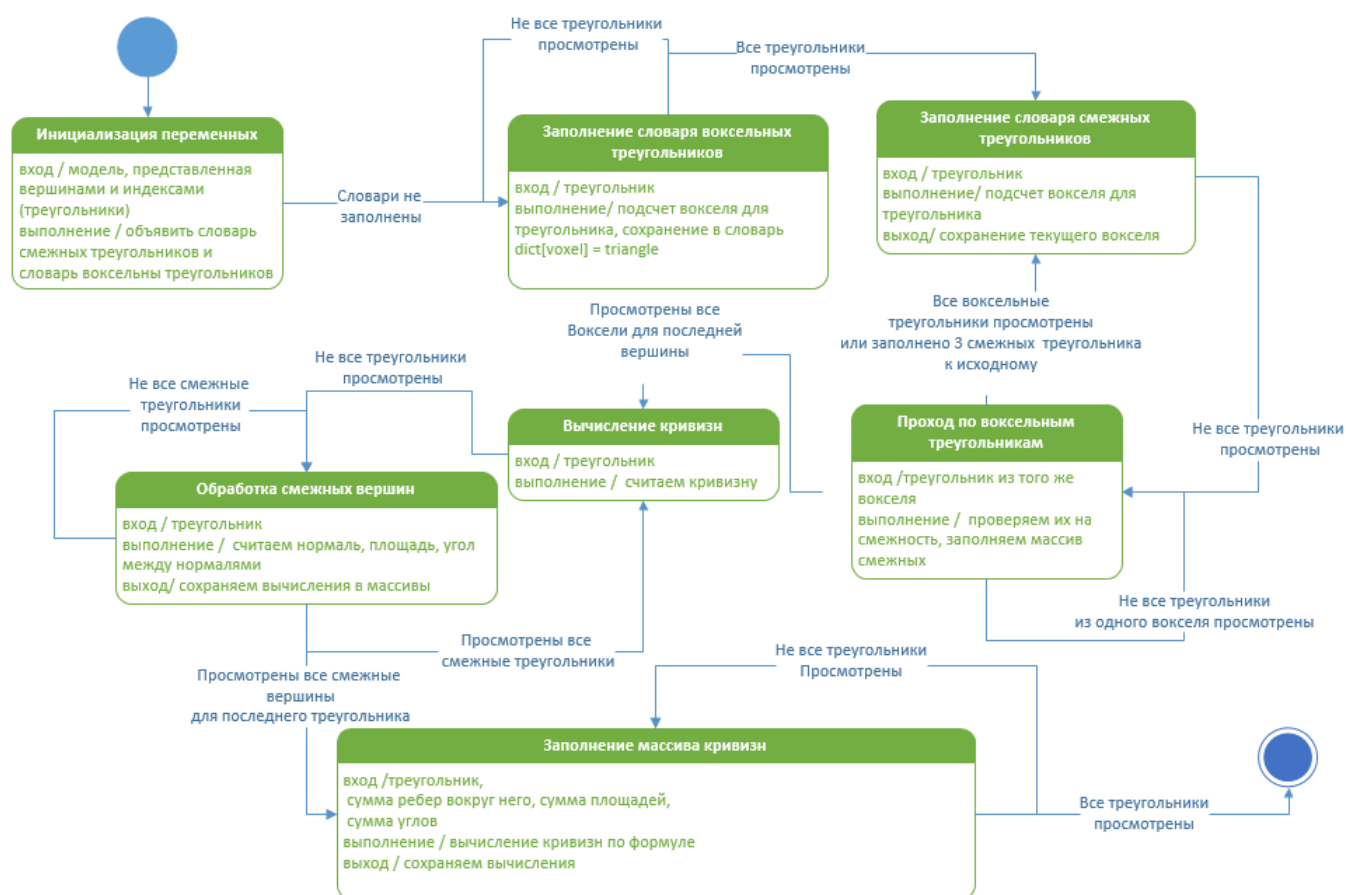


Рис. 9: Диаграмма состояний для алгоритма подсчета кривизн через воксели

За счет такого разбиения, а также с учетом того факта, что у треугольника не может быть больше 3 смежных треугольников, был получен значительный прирост по сравнению с наивным подходом: сложность наивного алгоритма  $O(n^2)$  (так как при наивном подходе смежные вершины мы ищем во вложенном цикле, проверяя смежность для каждой пары вершин), в то время как "воксельный" способ обрабатывает только для тех треугольников, которые находятся в тех же вокселях (таб. 1).

Число полигонов в модели	Наивный метод, с	Воксельный метод, с
100 000	234	13
60 000	92	6
2 000	1	1

Таблица 1: Иллюстрация ускорения алгоритма при использовании вокселей

## 3.2. Метод золотого сечения

### 3.2.1. Особенности реализации

Как уже было сказано ранее, большой вклад в диагностику лица приносит наличие инструмента, помогающего объективно оценивать внешние данные. Таким инструментом может служить золотое сечение.

Для реализации его на трехмерной модели был взят за основу метод, описанный в главе 2.2, дополненный необходимыми функциями для отработки на модели в пространстве.

Чтобы получить ключевые точки для трехмерной модели, необходимо спроецировать их на саму модель. Для этого сначала отрисуем точки на плоскости перед моделью (в алгоритм добавим еще одну фиксированную координату  $z$ ), затем спроецируем эти точки на модель, т.е. перенесем по оси  $z$ .

В итоге мы получаем расчерченную трехмерную модель лица, на которой отмечены все ключевые для диагностики точки (рис. 10).

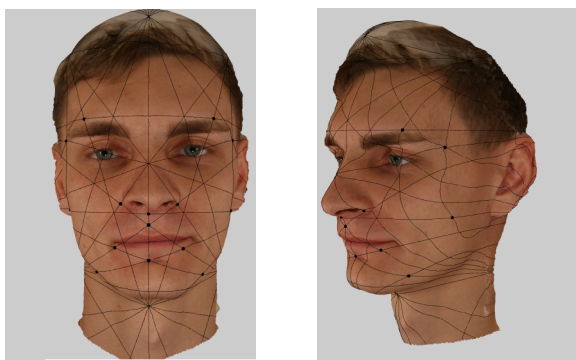


Рис. 10: Сетка золотого сечения в 3D

Это справедливо для предположения, что изначально модель развернута фронтально к камере.



## 4. Архитектура модуля

### 4.1. Модуль для диагностики лица

Модуль диагностики лица реализован как динамически подключаемая библиотека.

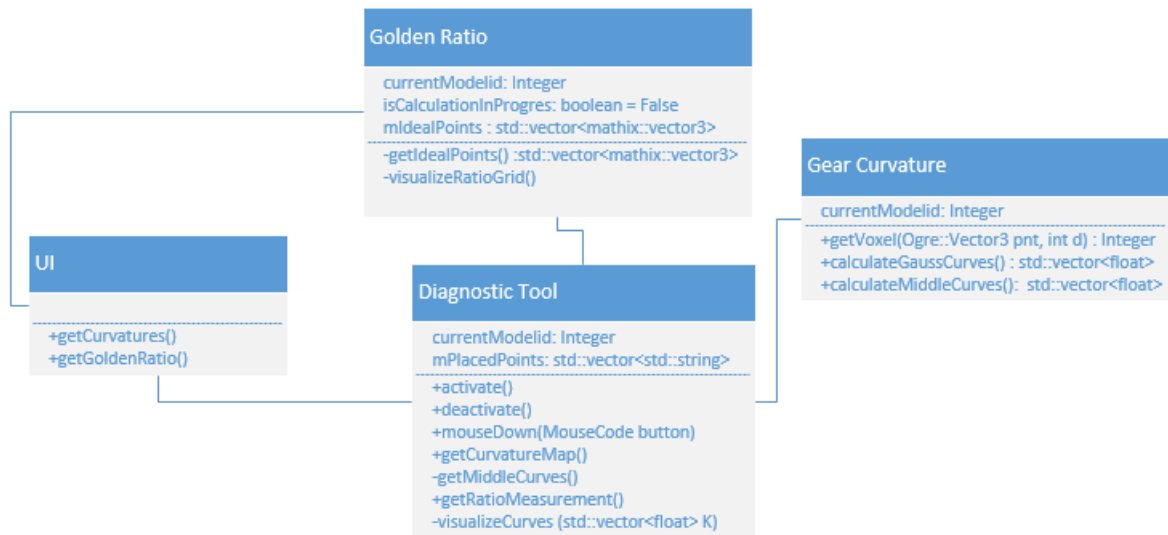


Рис. 11: Архитектура модуля

Главным классом модуля (рис. 11) является класс `DiagnosticTool`, в котором реализованы базовые методы входа/выхода в модуль, методы обработки сигналов, которые поступают с `UI` и др. Этот класс выступает в качестве контроллера, перенаправляя запросы на выполнение тех или иных действий в классы `GearCurvature` или `GoldenRatio`. Причем, если визуализация сетки золотого сечения происходит прямо в классе `GoldenRatio`, то визуализация кривизн реализована в главном классе.

Выделены следующие состояния модуля `DiagnosticTool` (рис. 12):

- Загрузка модуля

В это состояние пользователь попадает после запуска системы `Phoenixcas 3D Viewer` и последующего выбора модели, для которой будет прово-

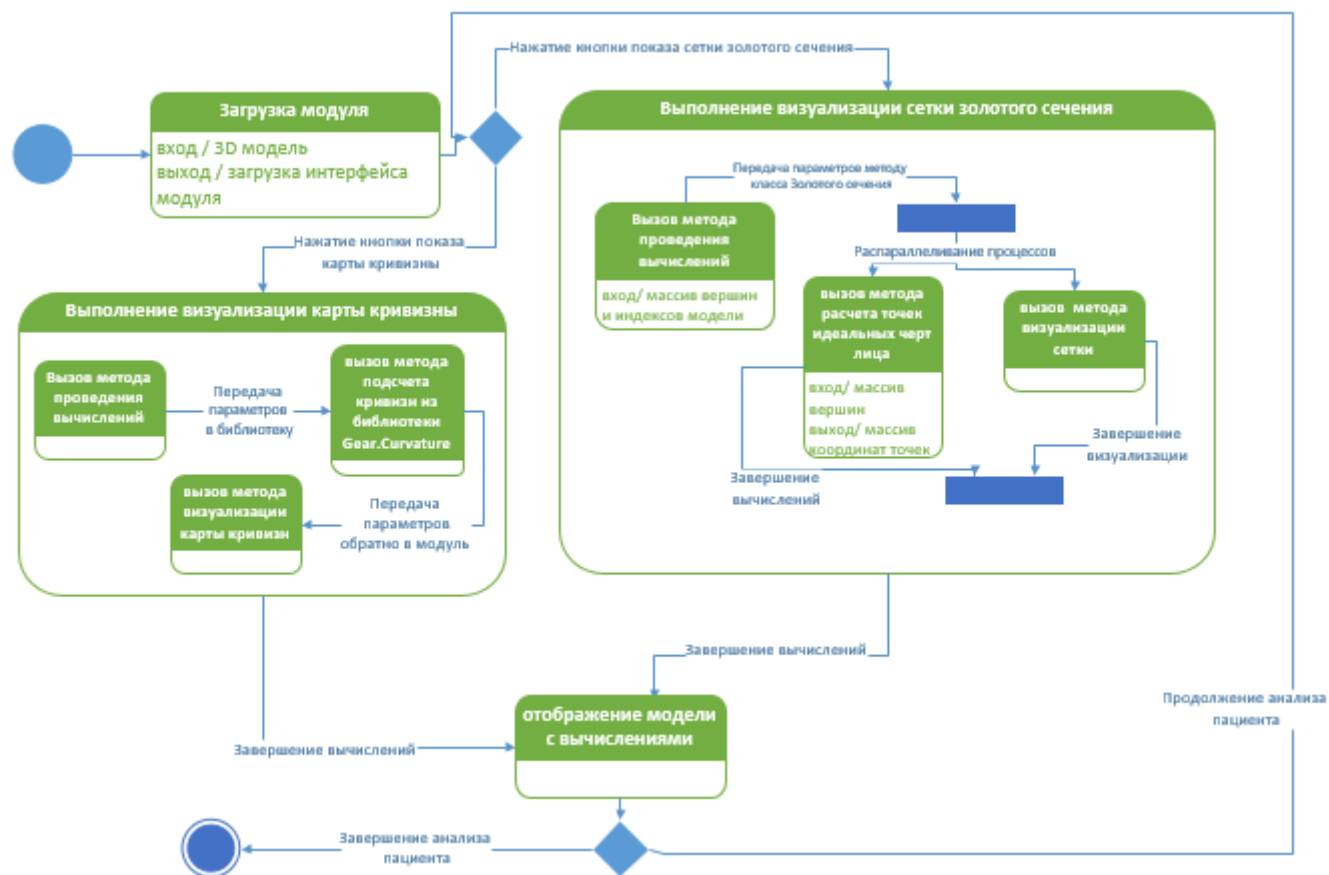


Рис. 12: Диаграмма состояний модуля

даться диагностика. Затем пользователь может выбрать или отображение карты кривизны на модели, или отображение золотого сечения:

- Выполнение визуализации сетки золотого сечения
- Выполнение визуализации карты кривизны

Каждое из этих состояний перенаправляет входной сигнал из главного класса модуля в классы внутренней библиотеки GearCurvature или в класс, предназначенный для расчетов, связанных с золотым сечением. Причем, если внутренняя библиотека после расчетов возвращается в главный класс (DiagnosticTool) для последующей визуализации, то вычисление золотого сечения и его визуализация происходят параллельно и ведутся прямо в классе GoldenRatio.

## 4.2. Интеграция модуля

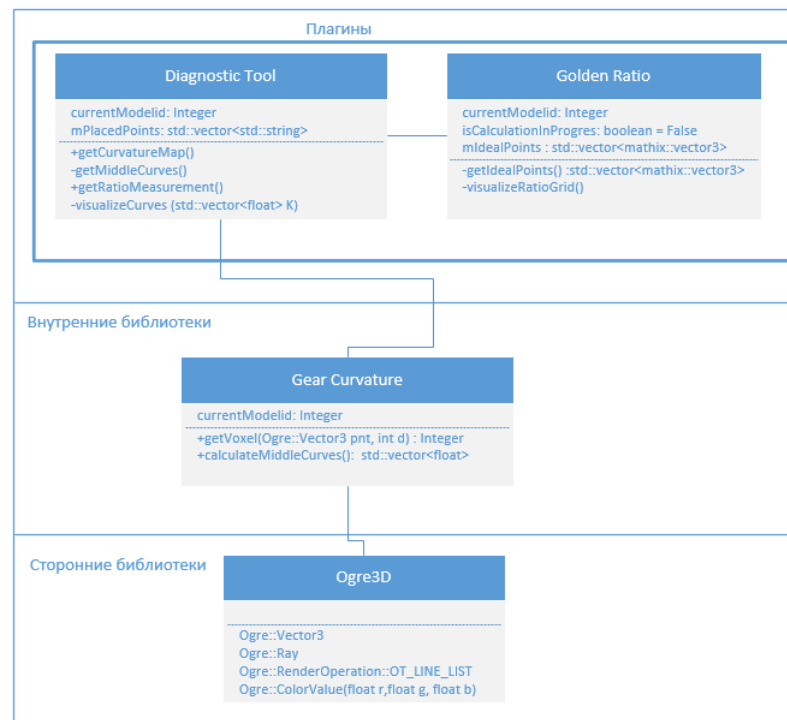


Рис. 13: Интеграция модуля в систему

Как уже упоминалось ранее, архитектура системы Phoenixcas поделена на 3 уровня. Модуль для диагностики лица встраивается на уровень плагинов. Он состоит из основного класса, обрабатывающего внешние сигналы и класса, проводящего все вычисления, связанные с золотым сечением. Из уровня внутренних библиотек плагин использует GearCurvature, отвечающий за расчет кривизн, из уровня сторонних библиотек активно используется Ogre3D [5].

## 5. Особенности реализации модуля

Среди ограничений, которые накладываются на модуль, можно выделить ограничение на время работы трехмерные модели имеют большую плотность сетки (порядка 100 000 вершин). Для ускорения работы алгоритмов использованы дополнительные структуры данных и распараллеливание.

К особенностям реализации можно отнести вынесение вычислений золотого сечения в отдельный поток. Это позволило скрыть задержку от пользователя, а так же ускорило выполнение работы алгоритма.

## 6. Апробация модуля

Для того, чтобы проверить работоспособность модуля диагностики лица использовались трехмерные модели, полученные из фотоснимков (рис. 14, 15) и томографических снимков (рис. 16). Причем для более наглядных результатов, было решено посмотреть на работу модуля с моделями как пропорциональных, так и не пропорциональных лиц.

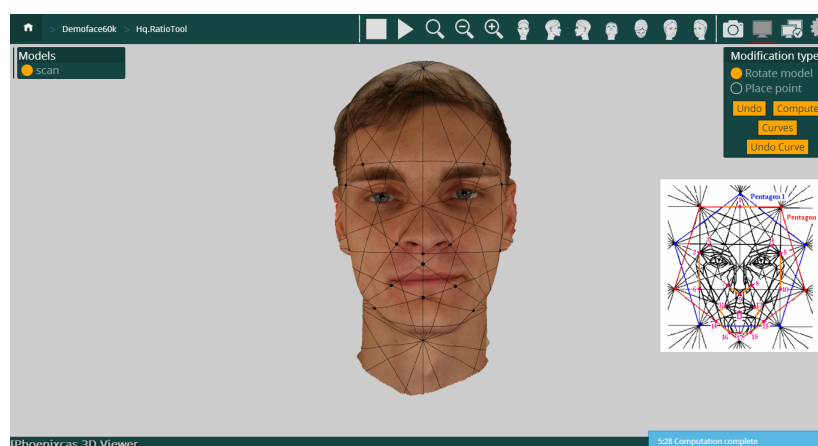


Рис. 14: Апробация модуля для модели из фотоснимков: золотое сечение [6]

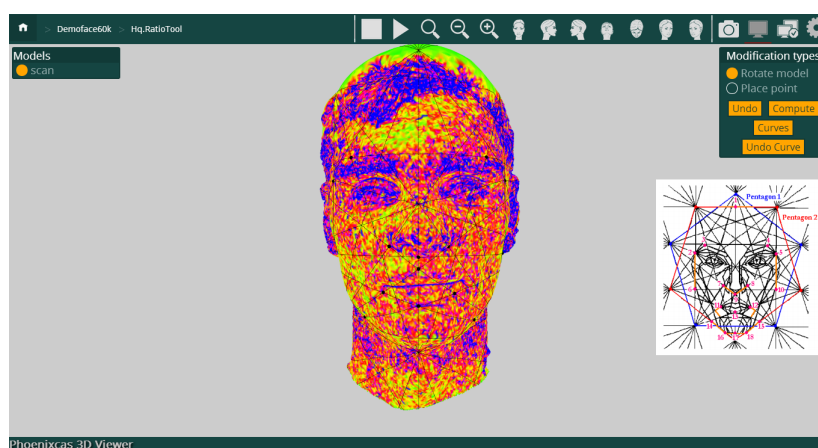


Рис. 15: Апробация модуля для модели из фотоснимков: кривизна [6]

Адекватность построения карты кривизны оценивалась сначала на простых геометрических фигурах разной плотности (сфера, 2 сферы рядом, кубы, кривая поверхность с разными величинами кривизны на разных уровнях) (рис. 17).

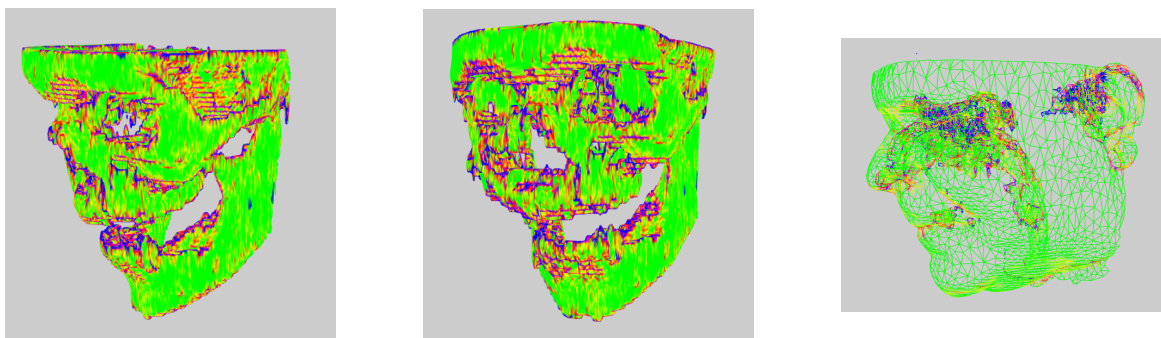


Рис. 16: Апробация модуля для модели из томографических снимков: кривизна

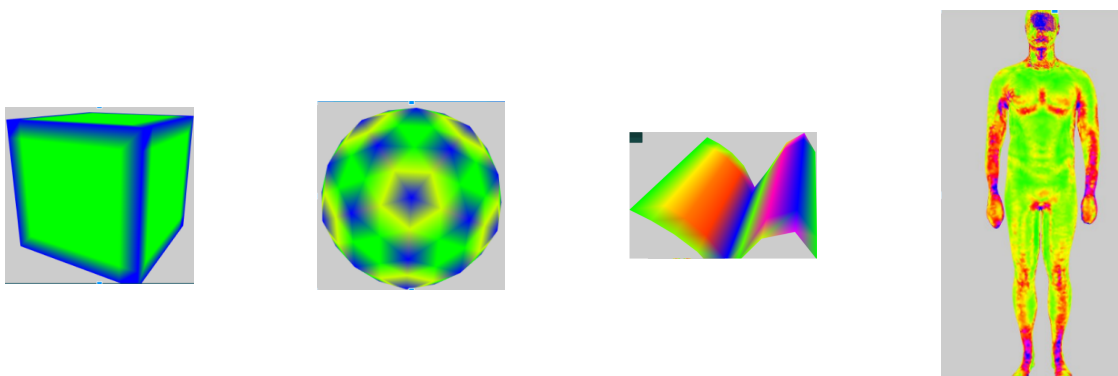


Рис. 17: Апробация кривизны

Также была проведена демонстрация работы модуля диагностики врачам. Работа плагина была высоко оценена, и были предложены модификации в соответствии с авторскими методиками врачей.

## 7. Результаты

В систему планирования операций добавлен модуль для диагностики лица по трехмерной модели поверхности лица:

- Реализованы вычислительные функции для библиотеки методов обработки трехмерных моделей
- Разработана архитектура и встроен модуль для диагностики лица
- Проведена апробация модуля

## Список литературы

- [1] Analysis Marquardt Beauty. — URL: <http://www.beautyanalysis.com/>.
- [2] Jiandong Fang Shiao fen Fang Jeffrey Huang Mihran Tuceryan. Digital Geometry Image Analysis for Medical Diagnosis.
- [3] John Rugis Reinhard Klette. Surface Curvature Extraction for 3D Image Analysis or Surface Rendering.
- [4] Marquardt Stephen R. Method and apparatus for analyzing facial configurations and components. — 1992. — URL: <http://www.google.com/patents/US5659625>.
- [5] Ogre3d. — URL: <http://www.ogre3d.org/>.
- [6] Rachel McDonnell Ann McNamara. Application of the Golden Ratio to 3D Facial Models.
- [7] Schwind Valentin. The Golden Ratio in 3D human face modeling. — 2011.
- [8] Wikipedia. Curvature. — URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Curvature>.
- [9] Прокопьев А. Н. Прокопьев Н. Я. Койносов П. Г. Вклад А. Цейзинга в развитие учения о 'Золотом Сечении'. — 2008.