

# Построение модели динамики движения челюсти человека в процессе жевания по серии трехмерных изображений\*

Дмитрий Гордеев, Наталья Дышкант  
Факультет вычислительной математики и кибернетики  
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
dott1718@gmail.com, Natalia.Dyshkant@gmail.com

## Аннотация

В работе рассматривается задача анализа изменений модели лица человека по серии последовательных трехмерных изображений — трехмерному видеоряду. Рассматривается видеоряд, полученный при съемке жующего человека. Предлагается подход к построению модели механического движения нижней челюсти в процессе жевания, основывающийся на выделении из модели динамической и статической частей. Такая модель может быть использована при биометрической идентификации личности, медицинской диагностике и оценке результатов операций.

**Ключевые слова:** 3D модель лица, биометрия, движение челюсти, трехмерное моделирование, подгонка поверхностей, захват движения.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным развитием технологий трехмерного сканирования, число исследований, посвященных задачам анализа и классификации получаемых изображений, резко возросло. Решение таких задач актуально для многих приложений, связанных с биометрической идентификацией, распознаванием эмоций по лицу, медицинской диагностикой, планированием и оценкой результатов операций в косметологии и ортодонтии (см. [1]).

Современные трехмерные сканеры позволяют не только получить модель лица необходимой точности, но и произвести в режиме реального времени съемку изменений лица, захватывая любые мимические движения, в том числе движения нижней челюсти, например, во время жевания или разговора.

В последние годы технологии трехмерного моделирования получили широкое распространение в стоматологии и косметологии: работа с 3D моделями позволяет производить предклинические исследования, планировать операции и оценивать возможные результаты лечения. В [2] предлагается метод лазерного сканирования и система визуализации для виртуального планирования операций. В [3] предлагается использование фотограмметрической системы для получения трехмерных моделей челюстей и лица и дальнейшего определения взаимного расположения нижней и верхней челюстей. В [4] предлагается метод моделирования челюсти пациента по снимкам, полученным компьютерным томографическим сканированием.

Задачи анализа динамики движения челюсти и

построение модели такого движения актуальны и востребованы для исследований в областях хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии [5].

В статье рассматривается задача регистрации изменений модели лица и нижней челюсти по трехмерному видеоряду, полученному при съемке жующего человека. Для этого в модели выделяются статические и динамические для исследуемого видеоряда области.

Исходными данными в решаемой задаче являются модели, заданные в виде облаков точек: 1) статичная трехмерная модель лица  $S$ ; 2) видеопоследовательность из трехмерных изображений  $D_1, D_2, \dots, D_n$ .

Анализируя данные, полученные в результате обработки последовательности кадров, необходимо произвести сегментацию модели и описать движение динамической области относительно статической в процессе съемки.

Таким образом, поставленная задача разбивается на следующий ряд подзадач: 1) «подгонка» моделей — введение меры различия двух моделей и ее минимизация в зависимости от их взаимного расположения; 2) выделение в модели статической и динамической областей; 3) «подгонка» статической и динамической частей и определение их взаимного расположения.

## 2. МЕТОД СЕГМЕНТАЦИИ МОДЕЛЕЙ

Каждая исходная модель задана в трехмерном пространстве набором координат точек:  $\{x_i, y_i, F(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ . Обозначим набор точек плоскости, на котором задается поверхность модели за  $G$ :  $G = \{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ .

### 2.1 Стандартная система координат

На первом шаге работы происходит нормализация моделей: с каждой из моделей  $S, D_1, D_2, \dots, D_n$  связывается своя система координат.

Съемка лиц для рассматриваемой базы производилась в фас, и сканер выдавал полученное облако точек в системе координат, в которой ось  $Oz$  располагалась вдоль оси визирования и была направлена в камеру, ось  $Oy$  проходила вдоль лица по направлению от подбородка ко лбу, ось  $Ox$  — поперек лица, от правой щеки к левой. В дальнейшем подразумевается, что во всех обрабатываемых моделях лиц оси координат направлены таким же образом, и под «верхней» и «нижней» частями модели понимаются части с большими и, соответственно, меньшими значениями координаты  $Oy$ . В процессе нормализации первоначальная система координат преобразовывается с помощью параллельного переноса в новую таким

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: проекты 08-07-00305, 09-07-92652.

образом, чтобы для модели были выполнены следующие условия:

$$\begin{cases} \sum_{(x,y) \in G} x = \sum_{(x,y) \in G} y = 0; \\ \max_{(x,y) \in G} F(x,y) = 0. \end{cases}$$

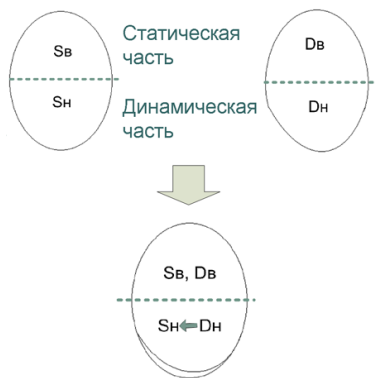
Здесь суммирование производится по всем точкам  $(x,y)$  из  $G$ . Описанную систему координат будем называть *стандартной* для конкретной модели.

## 2.2 Сегментация

При движении нижней челюсти на снимках видеоряда наибольшей статической частью является верхняя часть лица, к которой относятся лоб и нос; нижняя часть лица (щеки, губы и подбородок) относятся к динамической части.

Для сравнения двух моделей лица со снимков предлагается подход, заключающийся в определении статической части для обоих снимков методом подгонки и описании движения движущейся (динамической) части относительно статической.

Пусть  $S_B, D_B$  — статические (верхние) части модели  $S$  и модели  $D$  из видеоряда, а  $S_H, D_H$  — динамические части этих моделей (см. Рис. 1);  $O_1, O_2$  — системы координат, связанные с моделями  $S$  и  $D$  соответственно.



**Figure 1:** Подгонка статических частей двух моделей.  $S_B, S_H$  — верхняя и нижняя части статичной модели  $S$ ;  $D_B, D_H$  — верхняя и нижняя части модели  $D$  видеоряда.

Модель  $D$  приводится к стандартной системе координат модели  $S$  и статические части  $S_B, D_B$  сопоставляются друг с другом методом подгонки так, чтобы мера различия между ними была наименьшей. При этом динамические части моделей  $S_H$  и  $D_H$  будут отличаться. Задача описания динамики движения подвижной части модели относительно статической состоит в регистрации таких различий для каждого снимка  $D$  из видеоряда.

Для выделения статических частей модели разделяются плоскостью  $P$ , первоначально совпадающей с плоскостью  $Oxz$ , верхние части моделей сравниваются, далее плоскость  $P$  смещается вдоль оси  $Oy$  с некоторым шагом и отделяемые ей верхние части моделей снова сравниваются. При этом используется мера различия, учитывающая площадь, на которой задана верхняя часть модели, отсекаемая плоскостью  $P$ . Смещение

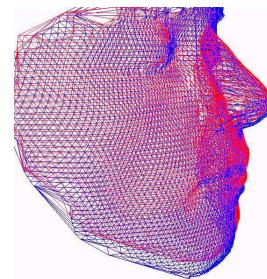
плоскости  $P$  происходит до тех пор, пока мера различия поверхностей уменьшается.

Для выделения динамических частей используется похожий метод. Первоначальное положение плоскости  $P$  устанавливается на некотором уровне (отсекающем заранее определенную "нижнюю" часть модели — с наименьшими  $y$ -координатами). Затем плоскость  $P$  смещается с некоторым шагом до тех пор, пока мера различия уменьшается. Эти смещения производятся в обоих направлениях, а в качестве динамической части определяется часть с минимальным значением меры различия из полученных двух.

Из-за неустойчивости значений функционала при смещении плоскости  $P$  в качестве сглаживающего значения предлагается использовать минимальное значение нескольких последних итераций. В качестве ответа предлагается использовать ту часть, на которой было зафиксировано минимальное значение функционала среди всех вычисленных.

В качестве метода сравнения поверхностей используется метод, предложенный в [6] и более подробно описанный в [7], позволяющий вычислять меру различия между поверхностями, заданными функциями на двух разных нерегулярных сетках. Данный метод основан на аппроксимации поверхностей кусочно-линейными функциями по триангуляциям Делоне. Представленный алгоритм является обобщением изложенного в [6], [7] с применением различных полуметриков и методов оптимизации.

Используемые меры различия между поверхностями двух моделей и методы оптимизации функционала различия между ними приведены в следующем разделе. Сопоставление (подгонка) поверхностей состоит в нахождении такого движения, при котором мера различия между поверхностями, описывающими лица, минимальна (см. Рис. 2).



**Figure 2:** Пример подгонки двух моделей. Слабое отклонение в статических частях - нос и лоб, сильное отклонение в динамической части - челюсти

## 3. ФУНКЦИОНАЛЫ РАЗЛИЧИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Пусть  $M$  — движение в пространстве  $\mathbb{R}^3$ . Далее будем рассматривать его как композицию последовательных поворотов на углы  $\alpha_M, \beta_M, \gamma_M$  вокруг осей  $Ox, Oy, Oz$  соответственно и параллельного переноса на вектор  $(\Delta x_M, \Delta y_M, \Delta z_M)$ .

Пусть модели  $D_1$  и  $D_2$  заданы как однолистные функции на двумерных сетках  $G_1$  и  $G_2$ .

**Определение 1.** Пусть на множестве однолистных

поверхностей задана полуметрика  $\rho$ . Мерой различия двух однолистных поверхностей  $D_1$  и  $D_2$  назовем величину  $\inf_{M \in \mathcal{M}} \rho(D_1, M(D_2))$ , где  $\mathcal{M}$  — множество движений в пространстве, сохраняющих свойство однолистности поверхности  $G_2$ .

**Определение 2.** Внутренним подмножеством двух двумерных сеток  $G_1$  и  $G_2$  назовем множество  $Int_{G_1, G_2} = (G_1 \cup G_2) \cap Conv(G_1) \cap Conv(G_2)$ , где  $Conv(G)$  — выпуклая оболочка множества  $G$ .

**Определение 3.** Совместная триангуляция Делоне  $T$  двух сеток  $G_1$  и  $G_2$  — триангуляция Делоне, построенная на множестве узлов  $Int_{G_1, G_2}$ . Обозначим  $N_T = |Int_{G_1, G_2}|$

### 3.1 Меры различия

Рассмотрим примеры мер различия двух однолистных поверхностей  $D_1$  и  $D_2$ , заданных в виде функций  $F_1$  и  $F_2$  на множестве  $Int_{G_1, G_2}$ .

**Объем симметрической разности.** Рассмотрим непрерывные функции  $\hat{F}_1$  и  $\hat{F}_2$ , заданные на  $\mathbb{R}^2$  и полученные линейной интерполяцией функций  $F_1$  и  $F_2$  по точкам сеток  $G_1$  и  $G_2$  соответственно. Таким образом,  $\hat{F}_1$  и  $\hat{F}_2$  задают триангулированные поверхности. Введем обозначение

$$V(A, B, C, F_1, F_2) = \iint_{\Delta_{ABC}} |\hat{F}_1(x, y) - \hat{F}_2(x, y)| dx dy.$$

Эта мера различия вычисляется по формуле

$$\rho_V(D_1, D_2) = \sum_{\Delta_{ABC} \in T} V(A, B, C, F_1, F_2),$$

где за  $T$  обозначена совместная триангуляция Делоне сеток  $G_1$  и  $G_2$ , а суммирование происходит по всем треугольникам из  $T$ .

**Среднее осевое расстояние.**

$$\rho_M(D_1, D_2) = \sum_{(x, y) \in Int_{G_1, G_2}} \frac{|F_1(x, y) - F_2(x, y)|}{N_T}.$$

**Отсеченное осевое расстояние.** Пусть задано число  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Тогда величина  $\rho_M^\alpha(D_1, D_2)$  такова, что

$$\begin{cases} |\{(x, y) : |F_1(x, y) - F_2(x, y)| \leq \rho_M^\alpha\}| \geq \alpha * N_T; \\ |\{(x, y) : |F_1(x, y) - F_2(x, y)| \geq \rho_M^\alpha\}| \leq (1 - \alpha) * N_T. \end{cases}$$

Здесь суммирование происходит по всем точкам  $(x, y) \in Int_{G_1, G_2}$ . Мера различия  $\rho_M^\alpha$  не требует построения объединенной триангуляции Делоне для двух сеток, на которых заданы модели.

### 3.2 Оптимизация функционала различия

Подгонка двух поверхностей заключается в минимизации меры различия между ними. Рассмотрим следующую оптимизационную задачу в пространстве  $\mathbb{R}^6$ :  $\rho(G_1, M(G_2)) \rightarrow \inf$ , где инфимум берется по всем шести параметрам движения  $M$  сетки  $G_2$ .

Так как  $\rho$  является полуметрикой, то минимум функционала равен 0 и достигается при таком сдвиге модели, когда  $Conv(G_1) \cap Conv(G_2) = \emptyset$ . Таким образом, при оптимизации необходимо использовать метод поиска локального экстремума, а не глобального. Кроме того, выбор начального приближения метода является критичным. Описанная выше процедура приведения моделей к стандартной системе координат является эффективным решением последней проблемы.

Предлагаются следующие методы поиска локального экстремума меры различия.

**Метод покоординатного спуска.** Как известно, суть метода заключается в фиксации всех переменных за исключением одной и решении задачи минимизации для получившейся функции одной переменной. Данный метод весьма эффективен при решении поставленной задачи, однако его главным недостатком является медленная скорость работы из-за большого количества вычислений функционала  $\rho$ .

**Метод Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника, симплекс-метод).** Идея метода состоит в сравнении значений функции в вершинах начального симплекса и перемещении симплекса по направлению оптимальной точки с помощью итерационной процедуры. Как показали проведенные эксперименты, в рассматриваемой задаче этот метод проигрывает в качестве оптимизации методу покоординатного спуска, однако скорость его работы значительно выше.

## 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

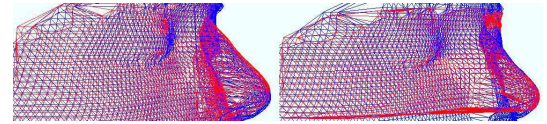
Съемка для настоящего исследования производилась трехмерным сканером Broadway<sup>TM</sup> компании «Artec Group» (<http://artec-group.com>), позволяющим делать до 15 снимков в секунду; полученные трехмерные модели лица задаются облаками точек.

В рамках исследования были проведены вычислительные эксперименты на видеоряде из 83 моделей, полученном при съемке жующего человека. Количество точек в моделях варьируется от 4 000 до 5 000.

Проведенные эксперименты показали, что самая быстрая оптимизация функционала различия достигается в случае использования среднего осевого расстояния в качестве меры различия и метода Нелдера-Мида.

### 4.1 Выделение статической части

В процессе жевания большая часть верхней части человеческого лица остается неподвижной, и алгоритм подгонки дает хорошие результаты.



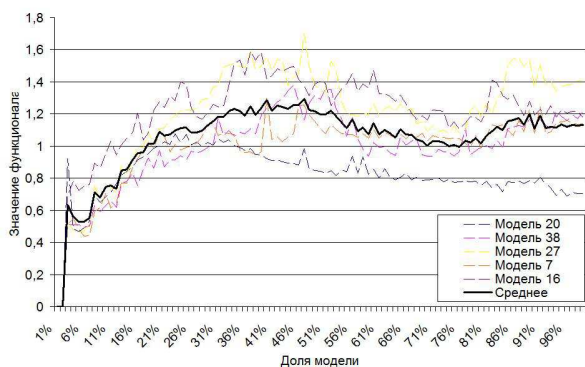
**Figure 3:** Сравнение качества наложения верхней части лица по всей модели (слева) и по сегментированной статической части (справа)

Несмотря на неплохое наложение верхней части лица при подгонке по всей модели, на Рис. 3 видно заметное улучшение при подгонке отдельно по сегментированной статической области.

### 4.2 Выделение динамической части

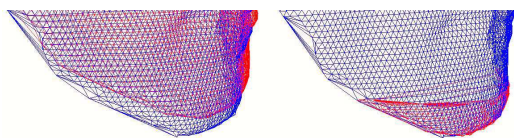
Для определения начального положения отсекающей плоскости был проведен вычислительный эксперимент на моделях из видеоряда  $D_1, D_2, \dots, D_n$ . Динамическую область задается точками с координатой  $y$  меньше определенного значения. На Рис. 4 представлен график меры различия между динамическими областями в

зависимости от доли отсекаемой части лица (от 1% до 100% с шагом в 1%).



**Figure 4:** Зависимость меры различия между динамическими областями от доли динамической области в модели лица

Как показали эксперименты, в промежутке от 2% до 8% локальные минимумы функционала изменяются мало, что позволяет сделать предположение о том, что в качестве приближения динамической части можно использовать нижние 8% точек исходной модели (см. Рис. 5).



**Figure 5:** Сравнение качества наложения нижней челюсти по всей модели (слева) и по сегментированной динамической части (справа)

Преобразование системы координат, связанной с динамической областью, в систему координат, стандартную для исходной статичной модели, описывает динамику движения нижней челюсти. Формальное описание движения было получено в виде серии матриц преобразования и может быть представлено как анимация движения базисных векторов.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен подход к построению модели движения нижней челюсти человека в процессе жевания по последовательности трехмерных изображений. В качестве ключевых подзадач были рассмотрены задачи определения меры различия двух однолистных поверхностей, был предложен алгоритм выделения из трехмерного изображения динамической и статической частей.

Изложенные в данной статье принципы легко применимы к другим задачам сегментации и определения динамики трехмерных изображений при условии наличия каких-либо эвристических подходов определения динамической части модели.

## 6. REFERENCES

- [1] Hajeer MY, Millett DT, Ayoub AF, Siebert JP. Applications of 3D imaging in orthodontics // Journal of Orthodontics, 31(1), P.62–70, 2004.
- [2] Koidis P., Patias P., Tsioukas V. 3D Visualization of Dental Data for Virtual Treatment Planning // ISPRS Congress Istanbul 2004, Proceedings of Commission V, 2004. — P. 996–1001.
- [3] Knyaz V. A., Zheltov S. Yu. Photogrammetric Techniques for Dentistry Analysis, Planning and Visualisation // ISPRS Congress Beijing 2008, Proceedings of Commission V, 2008. — P. 783–788.
- [4] Enciso, R., Memon, A., Fidaleo, D. A., Neumann, U., Mah J. The Virtual Craniofacial Patient: 3D Jaw Modeling and Animation. // The 11th Annual Medicine Meets Virtual Reality Conference, P. 65–71, 2003.
- [5] Michihiko Koseki, Akira Niitsuma, Norio Inou and Koutarou Maki Three-dimensional Display System of Individual Mandibular Movement // Complex Medical Engineering, (Springer), P. 117–127, 2007.
- [6] Дышкант Н.Ф., Местецкий Л.М. Сравнение однолистных поверхностей полученных при 3D сканировании // Proceedings of «GraphiCon'2008», P. 270–277, 2008.
- [7] Natalya Dyshkant. Disparity measure construction for comparison of 3D objects' surfaces // Proceedings of the Workshop IMTA, Lisbon, Portugal, P. 43–52, 2009.

## ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Гордеев — студент факультета ВМиК МГУ имени М.В. Ломоносова. E-mail: dott1718@gmail.com.

Наталья Дышкант — аспирантка факультета ВМиК МГУ имени М.В. Ломоносова. E-mail: Natalia.Dyshkant@gmail.com.

## CONSTRUCTION OF JAW MOVEMENT MODEL DURING CHEWING PROCESS BY 3D IMAGE SEQUENCE

### Abstract

We consider a problem of 3D face model's changes registration by consistent series of 3D images — 3D video sequence. We introduce an approach for construction of jaw movement model during chewing process. The approach is based on segmentation of 3D face to static and dynamic parts. Such model can be used in biometric identification, medical diagnostics and estimates of surgery results.

**Keywords:** 3D face, biometrics, jaw movement, 3D modeling, surface matching, motion capture.

## ABOUT THE AUTHORS

Dmitry Gordeev — student of Computational Mathematics and Cybernetics department of Moscow State University. E-mail: dott1718@gmail.com.

Natalia Dyshkant — PhD student of Computational Mathematics and Cybernetics department of Moscow State University. E-mail: Natalia.Dyshkant@gmail.com.