

На правах рукописи

Федюков Максим Александрович

АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ
МОДЕЛИ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА
ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ
ДЛЯ СИСТЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ
РЕАЛЬНОСТИ

*Специальность 05.13.11 — «Математическое и программное
обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»*

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА 2016

Работа выполнена на кафедре автоматизации систем вычислительных комплексов факультета ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова.

Научные руководители	<i>кандидат физико-математических наук, доцент</i> Баяковский Юрий Матвеевич , заведующий лабораторией компьютерной графики и мультимедиа факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова <i>кандидат физико-математических наук, доцент</i> Конушин Антон Сергеевич, заведующий лабораторией компьютерной графики и мультимедиа факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
Официальные оппоненты	<i>доктор физико-математических наук</i> Клименко Станислав Владимирович, профессор кафедры физико-технической информатики факультета инноваций и высоких технологий ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)» <i>кандидат технических наук</i> Рейер Иван Александрович, научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»
Ведущая организация	Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Защита состоится «_____» _____ 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.01, созданного на базе ФГБУН Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, расположенного по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН: www.keldysh.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Т.А. Полилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Виртуальная реальность (от лат. *virtus* «потенциальный», «возможный» и лат. *realis* «действительный», «существующий») — компьютерная модель мира: созданная с помощью компьютера среда, в которой смоделированы объекты как неживой, так и живой природы (см. рис. 1). В виртуальной реальности взаимодействие пользователя со средой происходит в режиме реального времени.

Особенно актуальными на сегодняшний день являются трехмерные многопользовательские системы виртуальной реальности. Они позволяют организовывать собрания, семинары, конференции, симпозиумы (см. рис. 2) и используются международными корпорациями (IBM, Nokia, CNN и др.), университетами (Университетом Эдинбурга, Калифорнийским университетом, Московским открытым юридическим институтом и др.), музеями (Музеем Винсента Ван Гога, Дрезденской галереей, Эксплораториумом и др.), библиотеками (Баварской государственной библиотекой, Библиотекой Канзаса, Библиотекой Дж. Уилларда Мариотта и др.).



Рис. 1. Трехмерная модель человека в виртуальном окружении.



Рис. 2. Конференция разработчиков VarCamp в приложении виртуальной реальности.

Каждый пользователь такой системы виртуальной реальности представлен трехмерной моделью (см. рис. 1). В настоящее время актуальной проблемой является построение моделей, которые были бы похожи на управляющих ими пользователей.

Учитывая, что человек уделяет лицам больше внимания, чем любым другим объектам на изображении (см. рис. 3), наиболее сложная и важная часть процесса построения модели человека — построение модели головы^{1, 2, 3}. Именно этой теме посвящена настоящая диссертация. Разработанная в результате проведенной работы система позволяет по набору фотографий получить трехмерную модель человека (см. рис. 4).



Рис. 3. Траектория взгляда при свободном анализе изображения (А. Л. Ярбус, ДАН СССР, 1954).

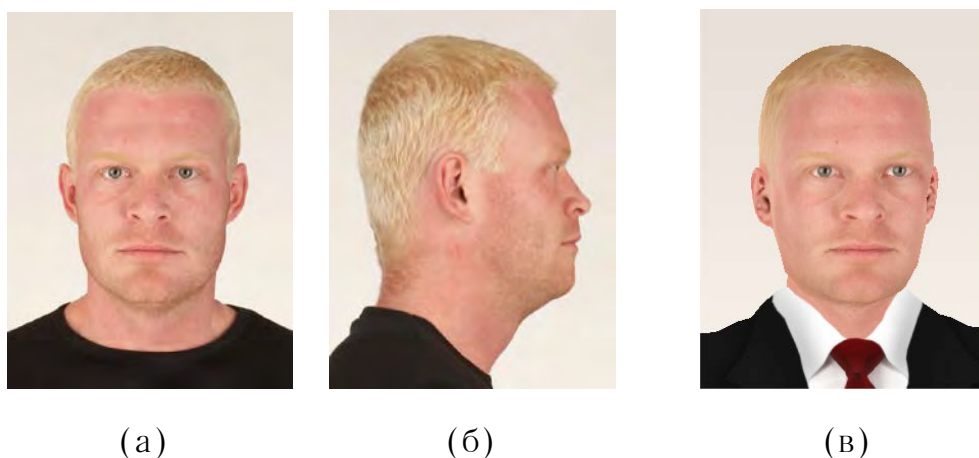


Рис. 4. (а), (б) — входные фотографии, (в) — построенная трехмерная модель (в электронной версии настоящего автореферата⁴ здесь представлено не только двумерное изображение, но и интерактивная трехмерная модель).

¹ Cerf M., Harel J., Einhäuser W., Koch C. *Predicting human gaze using low-level saliency combined with face detection* // Advances in neural information processing systems, 2008. P. 241—248.

² Palermo R., Rhodes G. *Are you always on my mind? A review of how face perception and attention interact* // Neuropsychologia 45.1, 2007. P. 75—92.

³ Chien S.H.L. *No more top-heavy bias: Infants and adults prefer upright faces but not top-heavy geometric or face-like patterns* // Journal of Vision, Vol. 11, No. 6, 2011. P. 1—14..

⁴ <http://keldysh.ru/council/1/2016-fedyukov/avtoref.pdf>

Степень разработанности темы исследования

Исследования в области компьютерного моделирования человеческого лица имеют более чем 40-летнюю историю. Первые работы в данной области появились в начале 1970-х годов^{1, 2, 3, 4} (см. рис. 5, 6).

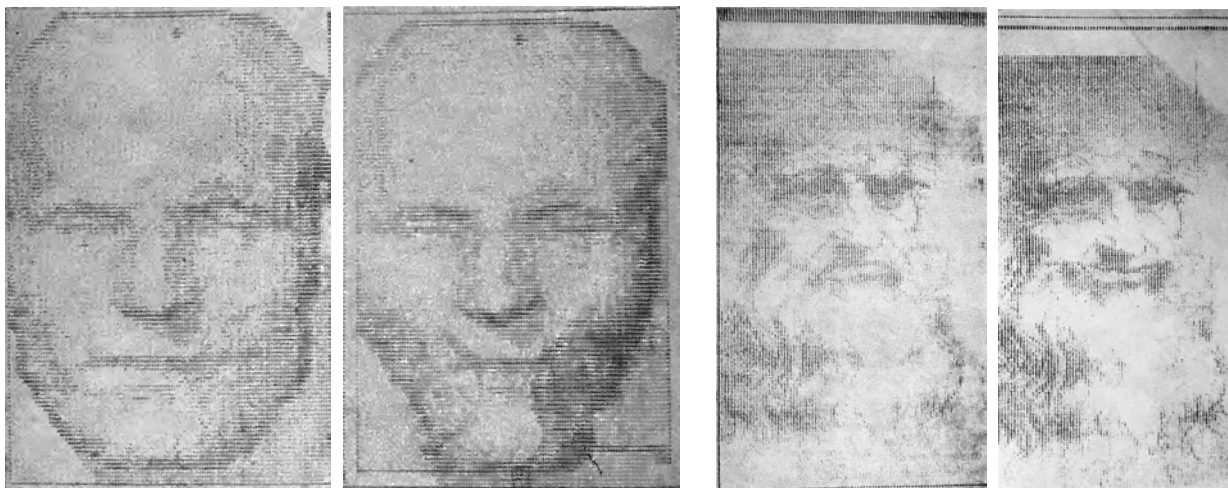


Рис. 5. Четыре изображения из работы по моделированию трехмерной поверхности лица В. С. Файна, иллюстрирующие пластические и мимические изменения.



Рис. 6. Четыре изображения из работы по моделированию человеческого лица Ф. И. Парка, демонстрирующие, какой эффект оказывает детализация на реализм лица.

Трехмерная модель головы может быть представлена картой глубины, облаком точек, полигональной моделью, параметрической моде-

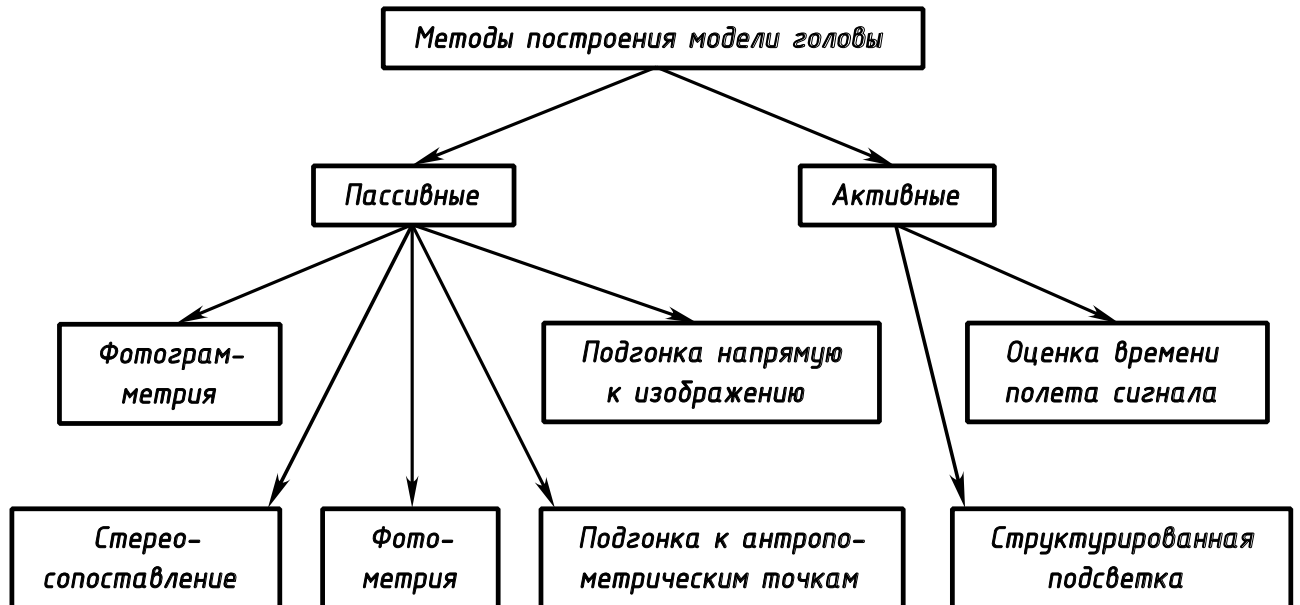
¹ Файн В.С. *Опознавание изображений. Основы непрерывно-групповой теории и ее приложения*. Москва: Наука, 1970. 295 с.

² Файн В.С. *Алгоритмическое моделирование формообразования*. Москва: Наука, 1975. 141 с.

³ Parke F.I. *Computer generated animation of faces* // *Proceedings of the ACM annual conference* — Volume 1. 1972. P. 451—457.

⁴ Parke F.I. *A model for human faces that allows speech synchronized animation* // *Computers & Graphics*, Vol. 1, No. 1, 1974. P. 3—4.

лю, описывающей антропометрические характеристики головы человека. Построение трехмерной модели головы человека может производиться с помощью активных (облучающих) систем, либо с помощью пассивных (см. рис. 7).



Р и с. 7. Классификация основных методов построения трехмерной модели головы человека.

Однако в первых подходах требуется специализированная аппаратура, причем высокое качество достижимо только с использованием дорогостоящих систем, из-за чего широкое применение подобных решений невозможно. Из существующих пассивных методов в настоящей работе выбран метод на основе подгонки модели к антропометрическим точкам как имеющий минимальные требования к входным данным и минимальный объем взаимодействия с пользователем.

Цели и задачи работы

Целью работы является исследование и разработка комплекса алгоритмов построения модели головы человека по изображениям, которые применимы в современных системах виртуальной реальности, позволяющие обеспечить высокое качество и существенно снизить необходимый объем взаимодействия с пользователем при построении модели по сравнению с существующими методами, а также разработка программной системы построения таких трехмерных моделей для апробации предложенных алгоритмов.

Основные задачи работы:

- 1) предложить алгоритм обнаружения антропометрических точек лица на парах фотографий анфас и в профиль;
- 2) предложить алгоритм оценки параметров трехмерной модели головы человека;
- 3) разработать алгоритмы генерации текстуры по набору фотографий с разных ракурсов, включающие в себя синтез текстуры в невидимых областях.

Научная новизна работы

Предложен новый алгоритм обнаружения антропометрических точек лица на парах фотографий анфас и в профиль. По сравнению с существующими аналогами алгоритм позволяет добиться более высокой точности и согласованности разметки.

По результатам проведенного исследования предложен новый многоэтапный алгоритм оценки параметров трехмерной модели головы с использованием генетического алгоритма оценки параметров и их уточнения методом Нелдера—Мида¹, учитывающий психофизический процесс восприятия и распознавания композиции и форм черт лица человеком. Алгоритм позволяет добиться высокой точности и устойчивости по сравнению с существующими аналогами.

Разработан комплекс алгоритмов генерации текстуры головы человека по набору фотографий с разных ракурсов, включающий в себя новые методы фотореалистичного синтеза невидимых областей на основе имеющейся цветовой и геометрической информации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы носят как теоретический, так и практический характер. Разработаны алгоритмы моделирования головы человека по изображениям для систем виртуальной реальности. Программная реализация описываемых в диссертации алгоритмов удовлетворяет всем требованиям и ограничениям, сформулированным в постановке задачи.

На основе предложенных алгоритмов разработана система построения трехмерной модели человека по изображениям, не требующая во

¹ Nelder J.A., Mead R. *A simplex method for function minimization* // The Computer Journal, Vol. 7, No. 4, 1965. P. 308—313.

время процесса построения трехмерной модели большого объема взаимодействия с пользователем.

В рамках программной реализации системы произведен инженерный анализ форматов файлов свободно распространяемых моделей человека, а также соответствующих протоколов передачи данных. На основании проведенного анализа разработаны модули импорта и экспорта в наиболее распространенные современные приложения виртуальной реальности OpenSim (Logicamp, ScienceSim, Openvue и др.) и Second Life (Second Life Grid, Second Life Enterprise).

Практическая значимость и успешная реализация подтверждены, в частности, четырьмя федеральными экспертными советами и выездной комиссией в рамках грантового финансирования по программе «Старт» Фонда содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Разработанная система успешно прошла экспериментальную проверку, полученные с помощью нее модели используются в ряде международных корпораций и отечественных организаций, в частности сотрудниками IBM, Microsoft, Intel, NVidia, федерального телеканала «Звезда» и др.

Методология и методы исследования

Методология исследования состоит в теоретической и практической разработке и обосновании новых методов и алгоритмов, использовании методов машинного обучения, обработки изображений, нелинейного программирования, фотореалистичного синтеза, разработке вычислительного комплекса, проведении вычислительных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту

В результате работы проведены исследования и разработаны новые алгоритмы и программная система построения трехмерной модели головы человека по фотографиям для систем виртуальной реальности, которые позволяют обеспечить высокое качество и существенно снизить необходимый объем взаимодействия с пользователем по сравнению с существующими методами. На защиту выносятся следующие основные результаты:

- 1) разработан новый алгоритм обнаружения антропометрических точек лица на парах фотографий анфас и в профиль;

2) разработан новый алгоритм оценки параметров трехмерной модели головы человека;

3) разработаны новые алгоритмы генерации текстуры по набору фотографий с разных ракурсов, включающие в себя синтез текстуры в невидимых областях;

4) на основе предложенных алгоритмов реализован уникальный программный комплекс, позволяющий строить трехмерную модель человека, совместимую с современными системами виртуальной реальности.

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, программной реализацией и вычислительными экспериментами, а также успешным использованием при решении практических задач.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

— 18-ой международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон'08», Россия, Москва, 2008;

— 16-ой международной конференции «Ломоносов—2009», Россия, Москва, 2009;

— 19-ой международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон'09», Россия, Москва, 2009;

— 17-ой международной конференции «Ломоносов—2010», Россия, Москва, 2010;

— 13-ом научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Россия, Москва, 2010;

— 14-ом научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Россия, Москва, 2011;

— 8-ом открытом российско-немецком семинаре «Распознавание образов и понимание изображений», Россия, Нижний Новгород, 2011;

— семинаре по компьютерной графике и машинному зрению Ю. М. Баяковского на факультете ВМК МГУ им. М. В. Ломоносова;

— научно-исследовательском семинаре по автоматизации программирования под руководством Л. Н. Королева на факультете ВМК МГУ им. М. В. Ломоносова;

— семинаре направления «Программирование» им. М. Р. Шура-Бура в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

Основные результаты работы изложены в 11 научных публикациях, включая 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на 147 страницах. Список литературы включает 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются цели и задачи диссертации, обосновывается ее актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описаны степень разработанности темы исследования, методы исследования, степень достоверности, апробация результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, приводится обзор существующих методов построения трехмерной модели головы человека по изображениям, дается описание общей структуры предложенного автором нового комплексного подхода, включающего новые алгоритмы и программную систему.

Первая глава посвящена алгоритмам обнаружения антропометрических точек лица на паре фотографий анфас и в профиль. В ней приводится обзор существующих алгоритмов, дана постановка задачи, описан предложенный алгоритм. Задача сформулирована следующим образом: на вход подается пара фотографий анфас и в профиль, необходимо найти координаты ряда точек, описывающих характерные черты лица человека. По результатам проведенного обзора области для решения поставленной задачи был выбран подход на основе несвободных локальных моделей, сочетающих в себе преимущества активных моделей формы и активных моделей внешнего вида, и демонстрирующих по сравнению с ними существенно более точные результаты.

Предложен новый алгоритм обнаружения точек одновременно на паре изображений, учитывающий внутренние энергии, штрафующие сложные деформации модели, внешние энергии, характеризующие невязки искомым точек с картами отклика на фотографиях, и взаимную невязку моделей анфас и в профиль. Оценка параметров несвободных локальных моделей пары фотографий — это поиск параметров $\mathbf{p} = \mathbf{b}_f, R_f, \mathbf{b}_p, s_p, R_p, \mathbf{t}_p$ (где $\mathbf{b}$ — вектор параметров деформируемой модели, s — коэффициент пропорционального масштабирования, R — матрица поворота, $\mathbf{t}$ — вектор переноса, индекс f соответствует параметрам модели для лица анфас, индекс p — в профиль), минимизирующих энергию следующего вида:

$$E(\mathbf{p}) = \mathcal{R}_f(\mathbf{p}_f) + \sum_{i=1}^n \rho_i^f(\mathbf{x}_i^f, \mathcal{I}_f) + \mathcal{R}_p(\mathbf{p}_p) + \sum_{i=1}^k \rho_i^p(\mathbf{x}_i^p, \mathcal{I}_p) + \mathcal{Q}(\mathbf{p}), \quad (1)$$

где $\mathcal{R}(\mathbf{p})$ — внутренняя энергия, штрафующая сложные деформации модели; $\sum_{i=1}^m \rho_i(\mathbf{x}_i, \mathcal{I})$ — внешняя энергия, ρ_i — мера невязки i -й точки в координатах $\mathbf{x}_i$ и окрестности входного изображения $\mathcal{I}$ в этих координатах, $\mathcal{Q}(\mathbf{p})$ — взаимная невязка моделей анфас и в профиль, определяемая следующим образом:

$$\mathcal{Q}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^m \left(P_y(R_f \mathbf{x}_i^f) - P_y(s_p R_p \mathbf{x}_i^p + \mathbf{t}_p) \right)^2, \quad (2)$$

где P_y — матрица проекции на ось y .

Предложенный алгоритм дает как более высокую точность положения найденных точек по сравнению с существующими алгоритмами, так и согласованность положения одних и тех же точек лица, присутствующих как на фотографиях анфас, так и на фотографиях в профиль.

Во второй главе приводится обзор существующих представлений, используемых для построения трехмерных моделей головы человека, проведен обзор алгоритмов построения моделей головы, в первую очередь — параметрических моделей, используемых в современных системах виртуальной реальности. В базовом случае параметрами геометрической модели головы могут являться непосредственно трехмерные координаты всех вершин полигональной модели или трехмерные координаты некоторого набора вершин. В современных более гибких моделях параметры соответствуют антропометрическим характеристикам лица человека. В широко известных *морфформируемых моделях*, впервые предложенных В. Бланцем и Т. Веттером¹ каждый параметр не характеризует какую-либо конкретную черту, он изменяет лицо в целом: как геометрию, так и текстуру. Это делает невозможным ручное редактирование, по причине неясной для пользователя семантики и отсутствия достаточного контроля в современных системах виртуальной реальности используются сегментированные параметрические модели.

Таким образом, задачу работы можно сформулировать следующим образом: необходимо построить не просто полигональную модель, но определить антропометрические параметры головы человека по фотографиям.

¹ Blanz V., Vetter T. *A morphable model for the synthesis of 3D faces* // Proceedings of the 26th annual conference on computer graphics and interactive techniques. 1999. P. 187—194.

Предложен новый алгоритм оценки параметров модели. Полигональная модель предварительно размечена, на первом этапе разметка проецируется на входные фотографии и подгоняется к найденным антропометрическим точкам, на втором этапе форма базовой модели головы подгоняется к разметке. Данный подход позволяет работать с широким классом параметрических моделей, а также позволяет в случае необходимости неподготовленному пользователю вносить корректировки на любом этапе работы.

Так как психофизический процесс распознавания лиц человеком состоит из нескольких этапов, обработка форм отдельных черт лица и обработка композиции всех черт происходят на разных этапах и вносят разный вклад в узнаваемость лиц^{1, 2, 3}, набор ломаных разметки разбит на h групп таким образом, чтобы в первой группе содержались контуры всего лица и минимальный набор характерных точек всех черт лица, а в остальных $h - 1$ группах содержался контур только одной черты лица.

На каждом этапе минимизируется энергия

$$E = \eta_L E_L + \eta_P E_P + E_I, \quad (3)$$

где $\eta_L E_L + \eta_P E_P$ — функционал внешней энергии, а E_I — внутренней.

E_L — функционал, показывающий невязку между ломаными, E_P — функционал невязки между n_{pk} пикселями в области подбираемой черты лица, E_I — внутренняя энергия, которая определяется как расстояние Махаланобиса между θ и $\bar{\theta}$, соответствующим среднестатистической модели головы.

Минимизация осуществляется иерархическим, «грубо—точным», алгоритмом: для выполнения «грубого» этапа используется генетический алгоритм, позволяющий оптимизировать большой набор параметров и избежать попадания в ближайший локальный минимум. Кроме того, т. к. на

¹ Rotshtein P., Geng J.J., Driver J., Dolan R.J. *Role of features and second-order spatial relations in face discrimination, face recognition, and individual face skills: Behavioral and functional magnetic resonance imaging data* // Journal of Cognitive Neuroscience, Vol. 19, No. 9, 2007. P. 1435—1452.

² Wallraven C., Schwaninger A., Bülthoff H.H. *Learning from humans: computational modeling of face recognition* // Network: Computation in Neural Systems, Vol. 16, No. 4, 2005. P. 401—418.

³ Schwaninger A., Carbon C.C., Leder H. *Expert face processing: Specialization and constraints* // Development of face processing, 2003. P. 81—97.

«грубом» этапе производится оценка только параметров всего лица целиком, попиксельное сравнение не осуществляется ($\eta_P = 0$). «Точные» же этапы подгонки отдельных черт лица осуществляются с помощью метода Нелдера—Мида.

В электронной версии настоящего автореферата¹ на рис. 8 представлено видео, демонстрирующее оценку параметров геометрической модели.

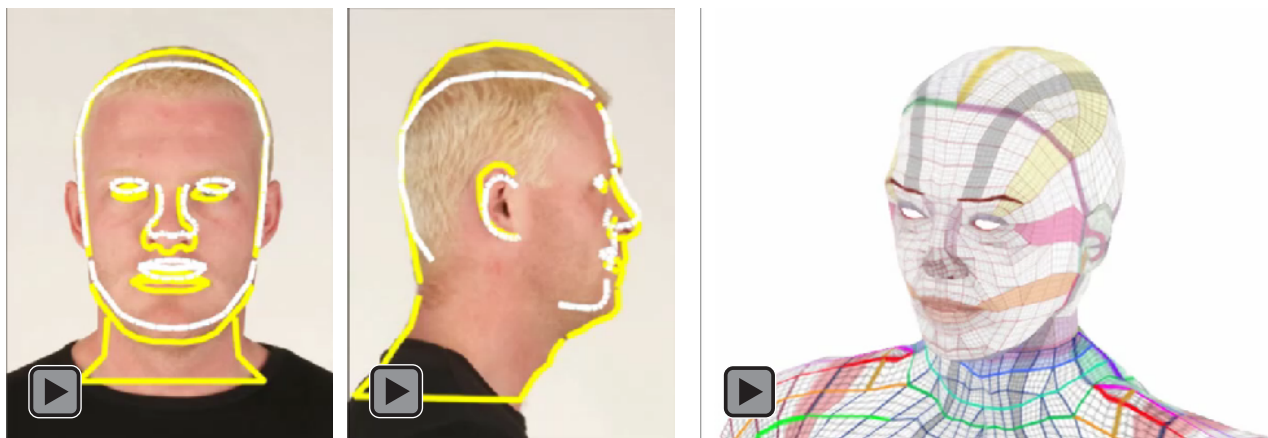


Рис. 8. Визуализация иерархического алгоритма подбора параметров.

Для экспериментальной оценки были отобраны 20 пар фотографий анфас и в профиль, на которых присутствуют лица разного пола, возрастов и рас. По ним вручную были смоделированы эталонные модели головы. Предложенный алгоритм сравнивался с базовым подходом для оценки многопараметрической модели с использованием генетического алгоритма.

Третья глава посвящена текстурированию модели головы человека: даны обзоры алгоритмов как общей задачи, так и отдельных подзадач, и предложен новый комплекс алгоритмов, позволяющий получать фотореалистичную текстуру всей головы всего по двум фотографиям, включая текстурирование невидимых или недостаточно покрытых на исходных изображениях областей, таких как область за ухом, глаза, полость рта, затылок и темя.

Проведенный обзор существующих работ, посвященных текстурированию модели головы, показал, что в них описаны лишь базовые этапы текстурирования модели головы, в то время как в настоящей

¹ <http://keldysh.ru/council/1/2016-fedyukov/avtoref.pdf>

диссертационной работе предложен полный комплекс алгоритмов, содержащий все этапы, требуемые для получения фотореалистичной модели головы: гладкая интерполяция вершин, генерация текстуры либо текстурных координат, устранение швов на текстуре, смешивание текстур с разных фотографий, фильтрация текстур низкого разрешения, а также синтез текстуры в невидимых областях.

На рис. 9 приведены пары фотографий анфас и в профиль и трехмерные модели, полученные по ним с помощью предложенных алгоритмов. Стоит отметить, что в существующих работах результаты ограничиваются аналогичными приведенным на рис. 9, т. е. демонстрирующими качество работы с помощью моделей, близких к положению анфас. Однако подобное представление результатов является неполным и некорректным: так рис. 10 демонстрирует, что ряд областей текстуры (область за ухом, глаза, полость рта, затылок и темя) имеют некачественную текстуру из-за отсутствия соответствующей информации на исходной паре фотографий анфас и в профиль.



Р и с. 9. Входные фотографии и полученные трехмерные модели.



Р и с. 10. Текстура невидимых на исходных фотографиях областей: затылок и темя, область за ухом, глаза и полость рта. Для дополнительного удобства в электронной версии настоящего автореферата¹ слева представлено не двумерное изображение, а интерактивная трехмерная модель.

Было проведено сравнение предложенного алгоритма с двумя другими алгоритмами моделирования текстурированных параметрических моделей, доведенными до уровня коммерческой реализации, и позволяющими, таким образом, проведение сравнения на произвольном наборе фотографий: AvMaker от американской компании CyberExtruder Inc., работающий с той же параметрической моделью, и FaceGen от канадской компании Singular Inversions Inc., работающий с собственной параметрической моделью. Сравнение было проведено методом субъективного тестирования, для чего было выбрано 20 пар фотографий, по каждой паре были построены модели и сгенерированы текстуры как предложенными алгоритмами, так и в системах AvMaker и FaceGen. Для проведения эксперимента был разработан специальный интерфейс, на каждом этапе эксперимента участнику сначала демонстрировалась случайно выбранная пара фотографий с предложением запомнить лицо, а на следующем экране — выстроенные в случайном порядке текстурированные модели, построенными

¹ <http://keldysh.ru/council/1/2016-fedyukov/avtoref.pdf>

тремя сравниваемыми алгоритмами, с возможностью поставить каждой модели оценку от 1 до 10. 17 участникам-добровольцам в возрасте от 16 до 48 лет было предложено оценить 20 наборов текстурированных моделей. Усредненная оценка AvMaker составила 5,41, FaceGen — 7,69, предложенного метода — 9,08. Категориальные гистограммы голосов приведены на рис. 11.

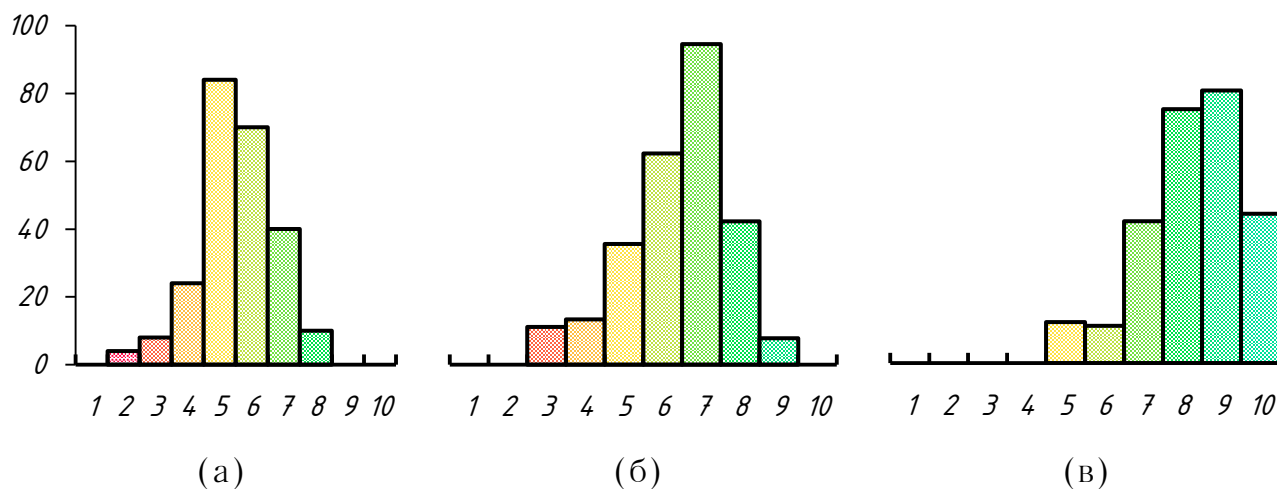
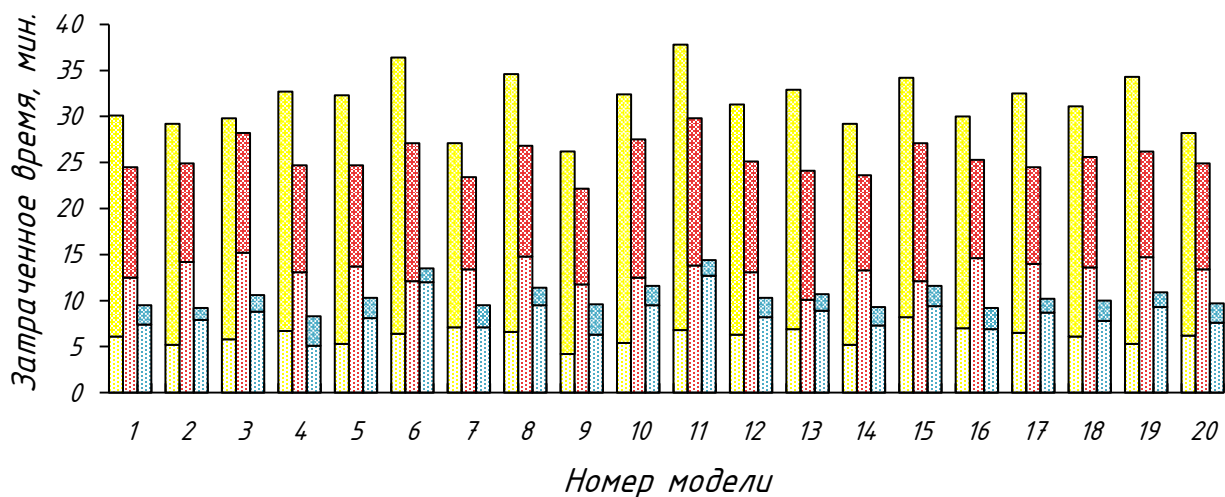


Рис. 11. Рейтинг в виде категориальных гистограмм (по оси абсцисс отложены оценки от 1 до 10, по оси ординат — количество голосов): (а) — CyberExtruder, (б) — FaceGen, (в) — предложенный комплекс алгоритмов.

В четвертой главе дано описание программного комплекса, включающего в себя реализацию предложенных в первых трех главах алгоритмов, а также ряд технических решений для повышения эффективности работы и интеграции с существующими системами. В главе приведено сравнение с существующими программными системами и показано, что предложенная система позволять создавать модели человека аналогичного либо более высокого качества, существенно снизив как объем взаимодействия с пользователем, так и общее затрачиваемое время.

Программный комплекс написан на языках программирования на C#, C++, HLSL, LSL и MaxScript, содержит в сумме более 80 тысяч строк кода.

Приведено сравнение предложенной системы с двумя другими, уже упомянутыми ранее — AvMaker и FaceGen. Для экспериментальной оценки времени, затрачиваемого на построение трехмерных моделей, были отобраны 20 пар фотографий анфас и в профиль, на которых присутствуют лица разного пола, возрастов и национальностей. В связи с тем, что функционал AvMaker и FaceGen меньше, чем в предложенной системе, в связке с ними в пользование были предоставлены клиентское приложение системы виртуальной реальности (для загрузки моделей, текстур, и, при необходимости, их редактирования) и самый распространенный редактор изображений Adobe Photoshop (для редактирования текстур). Соответственно, для проведения эксперимента и минимизации времени, затрачиваемого на работу с системами AvMaker и FaceGen, были приглашены опытные в работе с трехмерными моделями художники. При тестировании было необходимо построить по входным фотографиям трехмерные модели, добившись одинаково высокого визуального качества. Из-за сложности решения ряда подзадач при пользовании набором программ, качество итоговых моделей при работе с AvMaker и FaceGen оказывалось несколько ниже. При тестировании замерялось время моделирования в предложенной системе и в описанных комбинациях систем. Сравнение проводилось на компьютере с процессором Intel Core i7-4770K (3,50 ГГц), 32 Гб оперативной памяти, видеокартой GeForce GTX Titan Black (6 Гб видеопамяти) и 64-битной операционной системой Windows 7. Результаты замеров показаны на рис. 12.



Р и с. 12. Время, затраченное на построение трехмерных моделей по фотографиям в программных системах AvMaker (желтые столбцы), FaceGen (красные столбцы) и в предложенной системе (синие столбцы). Нижняя часть каждого столбца — время автоматической работы системы, верхняя — время ручной работы (включая полностью все задачи, в том числе загрузку фотографий, сохранение или экспорт результата и т. п.).

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем.

Разработан новый комплексный подход, включающий новые алгоритмы и их программные реализации для построения трехмерной модели головы человека по фотографиям для систем виртуальной реальности, позволяющий обеспечить высокое качество и существенно снизить необходимый объем взаимодействия с пользователем по сравнению с существующими аналогами.

1) Предложен новый алгоритм обнаружения антропометрических точек лица на парах фотографий анфас и в профиль. По сравнению с существующими аналогами алгоритм позволяет добиться более высокой точности, а также согласованности антропометрических точек на паре фотографий. Результат опубликован в [1, 12].

2) По результатам проведенного исследования предложен новый многоэтапный алгоритм оценки параметров трехмерной модели головы. Алгоритм позволяет добиться более высокой точности по сравнению с существующими аналогами. Результат опубликован в [1, 2, 12].

3) Разработан комплекс алгоритмов генерации текстуры головы человека по паре фотографий анфас и в профиль, включающий в себя новые алгоритмы синтеза текстуры в невидимых областях на основе имеющейся цветовой и геометрической информации. Предложенные алгоритмы обеспечивают более высокое качество по сравнению с существующими аналогами. Результат опубликован в [1, 12].

4) На основе предложенных алгоритмов реализован программный комплекс, позволяющий строить трехмерную модель человека, совместимую с современными системами виртуальной реальности. Реализованный комплекс не требует специальной подготовки пользователя и позволяет строить более качественные модели за меньшее время по сравнению с существующими аналогами. Результат опубликован в [12].

РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты работы отражены в 11 публикациях, включая 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте.

1) Fedyukov M.A. Estimating Parameters of a Synthetic Deformable Human Head Model Using a Set of Photographs // Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 24, No. 1, 2014. P. 73—80 (журнал входит в систему цитирования SCOPUS, № 11493 / 4700152485).

2) Федюков М.А. Моделирование головы человека по изображениям для систем виртуальной реальности // Международный журнал «Программные продукты и системы», 2011. С. 210—213 (журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, № 1078).

3) Федюков М.А. Оценка антропометрических параметров и моделирование головы человека по набору фотографий с произвольного ракурса // «Программные системы и инструменты»: Тематический сборник факультета ВМК МГУ им. Ломоносова, № 12, 2011. С. 234—243.

4) Федюков М.А. Синтез текстуры глаза по частичной информации с фотографии // Труды 14-го научного семинара «Новые информационные технологии в автоматизированных системах». Москва. 2011. С. 3—5.

5) Fedyukov M.A. Fitting of synthetic morphable model of human head to photographs // 8th open German-Russian workshop on Pattern Recognition and Image Understanding. 2011. P. 64—67.

6) Федюков М.А., Соболев А.А. Построение параметрической модели головы человека по полигональному представлению // Труды XVIII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Москва. 2008. Р. 317.

7) Федюков М.А. Аппроксимация полигональной сетки головы человека с помощью параметризованной антропометрической модели // Труды XVI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Москва. 2009. С. 89.

8) Федюков М.А. Построение параметрической модели головы человека по набору изображений // Труды XIX международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Москва. 2009. Р. 394—395.

9) Федюков М.А., Посконин А.В., Зорин Д.А. Реконструкция параметрической модели и текстуры головы человека по набору изображений // Труды 13-го научного семинара «Новые информационные технологии в автоматизированных системах». Москва. 2010. С. 151—158.

10) Федюков М.А. Конвейер калибровки и текстурирования модели головы по одной фотографии // Труды XVII международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Москва. 2010. С. 71—72.

11) Федюков М.А. Реконструкция формы и текстуры головы человека по набору изображений с использованием синтетических гибких моделей // Сборник статей молодых ученых факультета ВМК МГУ, № 7, 2010. С. 34—41.

12) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Роспатента № 2008612029 «Система реконструкции параметрической модели головы человека», автор: М. А. Федюков.

Подписано в печать 15.01.2016.
Формат 60×84/24. Усл. печ. л. 0,9.
Тираж 80 экз. Заказ А-3.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.
125047, Москва, Миусская пл., 4.