

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

ФАКУЛЬТЕТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И КИБЕРНЕТИКИ

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»*

*Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

Научные руководители

кандидат физико-математических наук

Баяковский Юрий Матвеевич

кандидат физико-математических наук

Конущин Антон Сергеевич

МОСКВА 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

Актуальность темы исследования	5
Степень разработанности темы исследования	8
Цели и задачи работы	12
Научная новизна работы	12
Теоретическая и практическая значимость работы	13
Методология и методы исследования	15
Положения, выносимые на защиту	15
Степень достоверности и апробация результатов	16
Объем и структура работы	17

Глава 1

Обнаружение антропометрических точек лица на паре фотографий анфас и в профиль

§ 1. Введение	19
§ 2. Несвободные локальные модели лица	21
§ 3. Предложенный алгоритм	25
§ 4. Эксперименты и сравнение	38
§ 5. Заключение	40

Глава 2

Оценка параметров геометрической модели головы человека

§ 1.	Введение	42
§ 2.	Предложенный алгоритм	51
§ 3.	Эксперименты и сравнение	58
§ 4.	Заключение	61

Глава 3

Текстурирование модели головы человека

для использования в системах виртуальной реальности

§ 1.	Введение	64
§ 2.	Генерация базовой текстуры	65
§ 3.	Синтез текстуры за ухом	74
§ 4.	Синтез текстуры затылка и темени	81
§ 5.	Синтез текстуры глаза	87
§ 6.	Эксперименты и сравнение	91
§ 7.	Заключение	94

Глава 4

Программная реализация

§ 1.	Организация программного комплекса	97
§ 2.	Исполняемые модули	101
§ 3.	Модуль ядра и вспомогательные модули	120

§ 4. Эксперименты и сравнение	122
§ 5. Заключение	124
Заключение	127
Список литературы	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

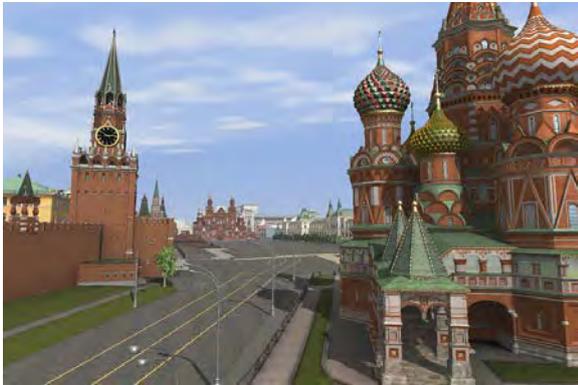
Виртуальная реальность (называемая также виртуальным окружением или кибернетическим пространством) определяется в [1] как интерактивная графика в реальном времени с трехмерными моделями, комбинирующая специализированную технологию отображения, погружающую пользователя в мир модели, с прямым манипулированием объектами в пространстве модели [2] (см. рис. 1—2).

Система виртуальной реальности (система виртуального окружения) — многоканальная стереоскопическая проекционная система с высокой степенью погружения, поддерживающая интерактивное взаимодействие с большой аудиторией [3, 4].

Приложение виртуальной реальности — программный комплекс, обеспечивающий погружение пользователя в систему виртуального окружения [5, 6].

Особенно актуальными на сегодняшний день являются трехмерные распределенные многопользовательские системы виртуальной реальности. Они позволяют организовывать собрания, семинары, конференции, симпозиумы (см. рис. 3—4) 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.).



Р и с. 1. Трехмерная модель Красной площади в системе виртуальной реальности «Визерра».



Р и с. 2. Трехмерная модель человека в виртуальном окружении.

Каждый пользователь такой системы виртуальной реальности представлен трехмерной моделью (см. рис. 2). В настоящее время актуальной проблемой является построение моделей, которые были бы похожи на управляющих ими пользователей.



Р и с. 3. Конференция разработчиков BarCamp в приложении виртуальной реальности Second Life.



Р и с. 4. Собрание сотрудников компании IBM в приложении виртуальной реальности OpenSim.

Разработанная в результате проведенной работы система позволяет по набору фотографий получить трехмерную модель человека (см. рис. 5), однако настоящая диссертационная работа посвящена более узкой теме — построению трехмерной модели именно головы человека. Учитывая, что человек уделяет лицам больше внимания, чем любым другим объектам на изображении [7, 8, 9] (см. рис. 6—7), наиболее сложная и важная часть процесса построения модели человека — построение модели головы. Именно этой теме посвящена настоящая диссертация.

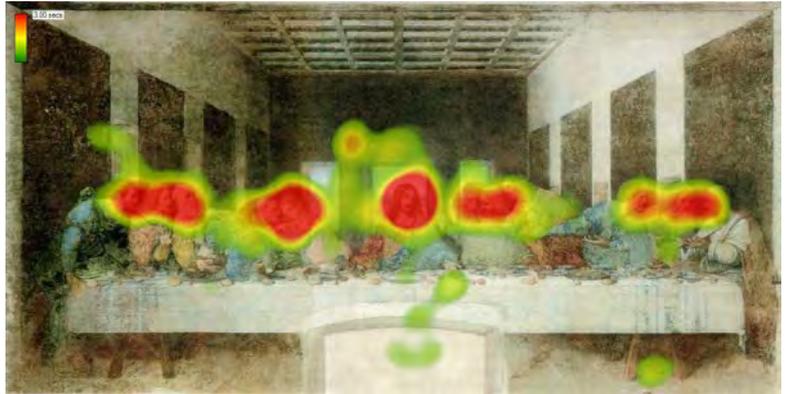


Р и с. 5. (а), (б) — входные фотографии, (в) — построенная трехмерная модель (в электронной версии настоящей диссертации¹ здесь представлено не только двумерное изображение, но также интерактивная трехмерная модель).

¹ <http://keldysh.ru/council/1/2015-fedyukov/diss.pdf>



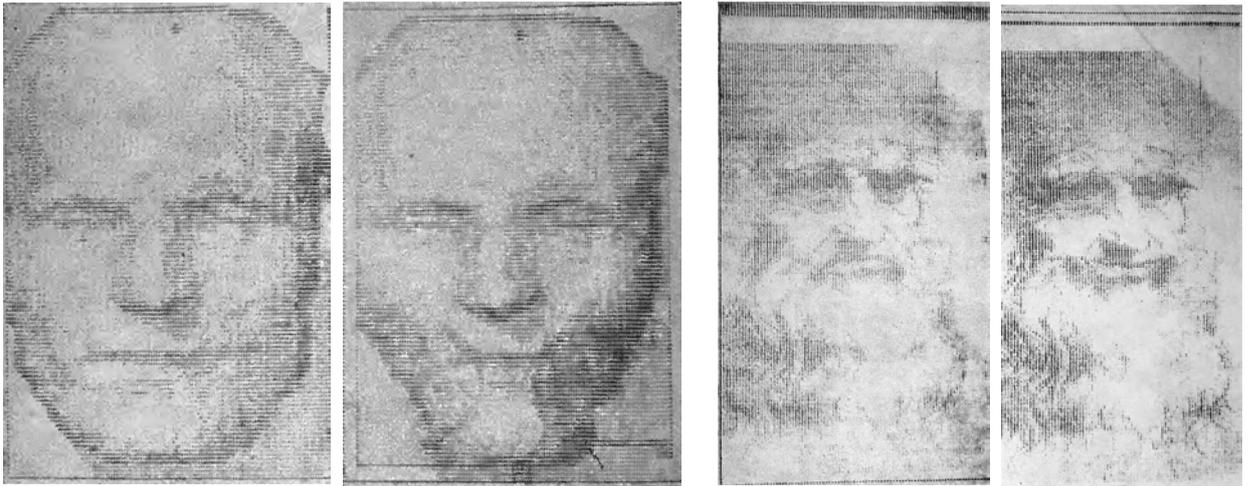
Р и с. 6. Траектория взгляда при свободном анализе изображения (А. Л. Ярбус, ДАН СССР, 1954 [10]).



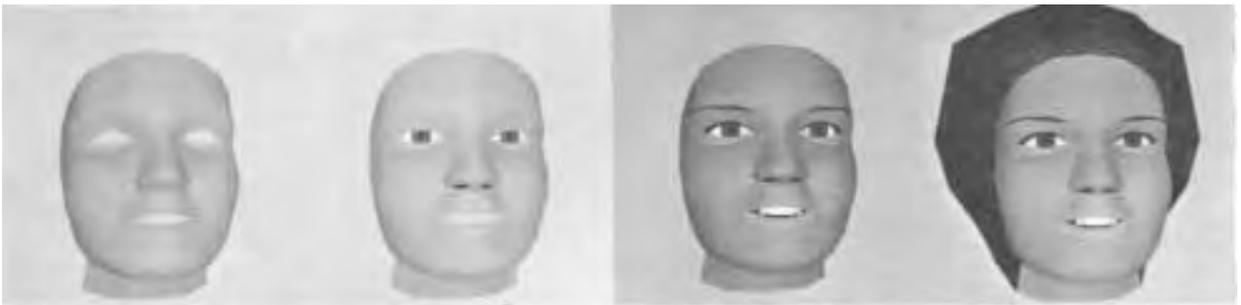
Р и с. 7. Карта концентрации внимания при свободном анализе изображения (Т. Туллис и др., СНИ, 2009 [11]).

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 [12, 13, 14, 15] (см. рис. 8, 9).



Р и с. 8. Четыре изображения из работы по моделированию трехмерной поверхности лица В. С. Файна [13], иллюстрирующие пластические и мимические изменения.



Р и с. 9. Четыре изображения из работы по моделированию человеческого лица Ф. И. Парка [14], демонстрирующие, какой эффект оказывает детализация на реализм лица.

Трехмерная модель головы может быть представлена картой глубины, облаком точек, полигональной моделью, параметрической моделью, описывающей антропометрические характеристики головы человека [16]. Построение трехмерной модели головы человека может производиться с помощью активных (облучающих) систем, либо с помощью пассивных (см. рис. 10). Однако в первых подходах (использующих струк-

турированную подсветку [17, 18, 19] или оценивающих время полета сигнала [20]) требуется специализированная аппаратура, причем высокое качество достижимо только с использованием дорогостоящих систем, из-за чего широкое применение подобных решений невозможно.

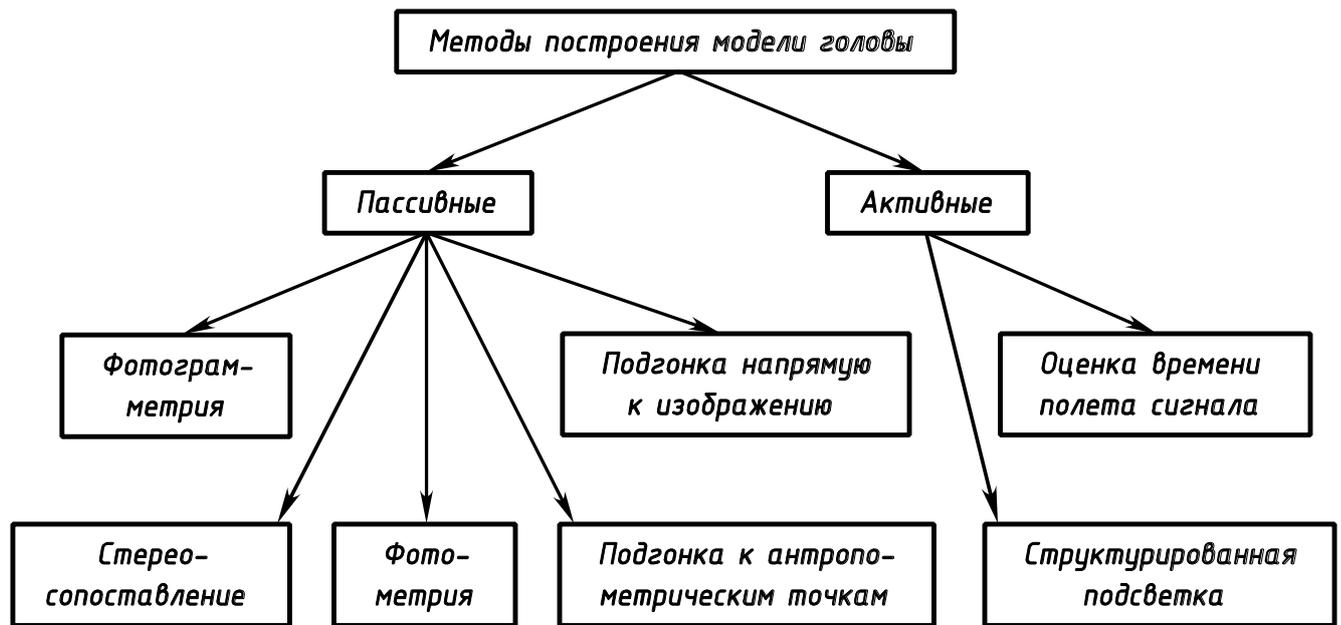


Рис. 10. Классификация основных методов построения трехмерной модели головы человека.

Основными пассивными методами построения трехмерной модели головы человека являются фотометрические (дающие оценку нормалей к поверхности при наблюдении объекта в разных условиях освещенности) [21, 22], стереоскопические (строящие карту глубины с помощью оценки диспаратета между точками одного изображения стереопары и точками второго изображения) [23, 24], фотограмметрические (оценивающие трехмерные координаты вершин объекта по характерным точкам набора изображений) [25, 26], методы подгонки параметрической модели напрямую к изображению [27], а также методы оценки параметров

трехмерной модели головы человека с учетом обнаруженных на входных изображениях антропометрических точек лица [28, 29].

Однако первые два подхода позволяют моделировать только лицо, тогда как в системах виртуальной реальности требуется построение всей модели головы. Кроме того, построение модели высокой точности, как по стереопаре, так и с использованием фотометрических методов, требует откалиброванной аппаратуры, что сильно ограничивает практическую применимость подобных подходов. Также фотограмметрия, стереосопоставление и фотометрия являются общими методами построения трехмерных моделей по изображениям, не учитывающими особенности модели головы человека.

Методы подгонки параметрической модели напрямую к изображению также имеют ряд недостатков: они требуют ручного задания параметров освещения и камеры, не позволяют корректировать работу алгоритма на промежуточных этапах, субъективное тестирование результатов работы демонстрирует оценку качества ниже удовлетворительного более чем в 20% случаев [30], кроме того такие методы требуют сложной параметрической модели, содержащей не только компоненту формы, но и текстурную компоненту, что делает невозможным использование такого подхода для более простых параметрических моделей, используемых в современных системах виртуальной реальности.

Таким образом, при постановке задачи построения модели головы для систем виртуальной реальности с минимальными требованиями к входным данным и минимальным объемом взаимодействия с пользова-

телем при непосредственном построении трехмерной модели по набору изображений оптимальным является подход с подгонкой к антропометрическим точкам.

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 суще-

ствующими 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—Мида (методом безусловной оптимизации функции от нескольких переменных, также известного как метод деформируемого многогранника или симплекс-метод [31]), учитывающий психофизический процесс восприятия и распознавания композиции и форм черт лица человеком. Предложенный алгоритм отличается высокой точностью и устойчивостью 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 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.

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 [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41] [42], также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте [43].

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена алгоритмам обнаружения антропометрических точек лица на паре фотографий анфас и в профиль. В ней приводится обзор существующих алгоритмов и описывается предложенный новый алгоритм, дающий как более высокую точность положения найденных точек, так и согласованность положения одних и тех же точек лица, присутствующих как на фотографиях анфас, так и на фотографиях в профиль.

Во второй главе описываются алгоритмы построения параметрической модели головы человека, приводится обзор существующих алгоритмов и новый предложенный алгоритм оценки параметров модели,

учитывающий психофизический процесс восприятия и распознавания композиции и форм черт лица человеком.

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.

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 позволяет создавать модели человека аналогичного либо более высокого качества, существенно снизив как объем взаимодействия с пользователем, так и общее затрачиваемое время.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ГЛАВА 1

ОБНАРУЖЕНИЕ АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИХ ТОЧЕК ЛИЦА НА ПАРЕ ФОТОГРАФИЙ АНФАС И В ПРОФИЛЬ

§ 1. Введение

Обнаружение антропометрических точек лица востребовано во многих прикладных областях — распознавание лиц, оценка пола и возраста, анализ выражения лица, отслеживание лица в видеопотоке, распознавание движения губ, шаржирование, анимация лица, построение трехмерных моделей — и является темой многих научных исследований.

Задача заключается в следующем. На вход подается пара изображений лица человека анфас и в профиль. Необходимо найти координаты определенного количества антропометрических точек лица, при этом должна обеспечиваться согласованность положения одних и тех же точек лица, присутствующих как на фотографиях анфас, так и на фотографиях в профиль.

Антропометрическая точка представляет собой характерную особенность, присутствующую на большинстве рассматриваемых входных изображений, например, уголок левого глаза, правый уголок рта, кончик носа и т. п. (см. рис. 11). Обнаружение антропометрических точек лица эквивалентно обнаружению характерных черт лица, т. к. антропометрические точки очерчивают характерные черты [44].

Обзорам существующих алгоритмов обнаружения антропометрических точек посвящены работы [45, 46, 47, 48, 49].

Можно выделить следующие категории существующих алгоритмов:

— несвободные локальные модели [50, 51] (являющиеся обобщением активных моделей формы [52, 44, 53]);

— активные модели внешнего вида [54, 55];

— регрессионные алгоритмы [56, 57];

— алгоритмы, основанные на графических моделях [58, 59];

— алгоритмы совместного детектирования [60, 61];

— независимые детекторы черт лица [62, 63, 64, 65];

— алгоритмы на основе глубокого обучения (также именуемого в ряде русскоязычных источников глубинным обучением) [66, 67];

Обнаружение антропометрических точек лица человека на паре фотографий анфас и в профиль в некотором смысле также относится к алгоритмам совместного детектирования, однако в современной литературе под алгоритмами совместного детектирования точек лица подразумеваются алгоритмы, работающие с набором фотографий анфас, в то время как в рамках настоящей диссертации рассматривается работа с парой фотографий анфас и в профиль.

Алгоритмы, основанные на графических моделях, по сравнению с другими алгоритмами демонстрируют высокую суммарную ошибку [45], поэтому на их рассмотрении также не будем останавливаться подробно.

Также не будем рассматривать независимые детекторы черт лица, которые несмотря на то, что развиваются уже более 20 лет, демонстри-

руют, как и алгоритмы, основанные на графических моделях, высокую суммарную ошибку [45], а также требуют построения эмпирик для каждой черты лица как на фотографии анфас, так и на фотографии в профиль.

Из более общих и устойчивых алгоритмов — на основе активных моделей формы, активных моделей внешнего вида, несвободных локальных моделей, регрессионных алгоритмов, алгоритмов на основе глубокого обучения — для задач настоящей диссертации выбран подход на основе несвободных локальных моделей, т. к. это хорошо обоснованный класс алгоритмов, активно развивающийся на протяжении более чем 20 лет, позволяющий адаптировать его под новые задачи, в том числе и под стоящую в рамках настоящей диссертации задачу обнаружения точек на парах фотографий анфас и в профиль.

Несвободные локальные модели сочетают в себе преимущества активных моделей формы и активных моделей внешнего вида, и дают по сравнению с ними существенно более точные результаты [68, 69].

§ 2. Несвободные локальные модели лица

В рамках поставленной задачи наибольший интерес представляют алгоритмы, использующие несвободные локальные модели [50, 51], наиболее обобщенное и полное описание таких моделей приведено в работе Дж. Сарагиха и др. [70]. Аппарат несвободных локальных моделей описан в настоящем параграфе. В рамках поставленной задачи приведем общепринятые в данной области термины.

Форма — массив размера $n \times 2$, содержащий координаты (x, y) антропометрических точек лица. Визуализация формы лица приведена на рис. 11. Стоит отметить, что для лучшего восприятия некоторые антропометрические точки соединены ребрами, однако ребра не входят в модель и служат только целям наглядности.

Модель формы определяет набор допустимых форм лица (иллюстрация модели формы приведена на рис. 11 справа). Допустимость определяется с помощью модели точечного распределения: $\mathbf{x}_i = sR(\bar{\mathbf{x}}_i + \Phi_i \mathbf{b}) + \mathbf{t}$, где \mathbf{x}_i — координаты i -й антропометрической точки, \mathbf{b} — параметры деформируемой модели, s — коэффициент масштабирования, R — матрицы поворота, \mathbf{t} — вектор переноса, $\bar{\mathbf{x}}_i$ — среднее значение положения i -й антропометрической точки модели, а Φ_i — относящаяся к i -й точке подматрица матрицы Φ , состоящей из собственных векторов, соответствующих наибольшему собственному значению. Описанная модель точечного распределения создается с помощью машинного обучения на большой базе вручную размеченных фотографий лиц, построение модели осуществляется с помощью анализа главных компонент.

Профильная модель для каждой антропометрической точки описывает окрестность вокруг этой характерной точки лица. Модель определяет, как должна выглядеть область вокруг конкретной антропометрической точки. Профильная модель, как и модель формы, строится с помощью машинного обучения на большой базе вручную размеченных фотографий лиц. В ранних работах использовалась одномерная про-

фильная модель, строящаяся вдоль нормали к границе модели формы, в более поздних работах были предложены модели, охватывающие двумерную область вокруг каждой точки, чаще всего используется просто квадратная область. Полный перебор в локальной окрестности каждой точки с использованием профильной модели дает карту отклика, показывающую непараметризованное распределение положений антропометрических точек. Иллюстрация карт отклика приведена в центре рис. 11.

Несвободная локальная модель описывает лицо с помощью двух компонент — модели формы лица (внутренняя энергия) и профильных моделей для каждой точки лица, входящей в модель формы (внешняя энергия), обе энергии минимизируются одновременно. Обнаружение антропометрических точек лица с помощью несвободных локальных моделей осуществляется итеративно следующим алгоритмом.

входные данные: изображение лица

обнаружить лицо на изображении и сгенерировать начальную форму

цикл

построить карту отклика в окрестности каждой точки

оценить параметры формы с учетом карт отклика

пока не достигнута сходимость

выходные данные: координаты антропометрических точек лица

Алгоритм сходится при достижении одного из условий: 1) сумма смещений точек на очередной итерации меньше заданного порога; 2) до-

стигнуто максимальное число итераций. Иллюстрация шагов алгоритма приведена на рис. 11.

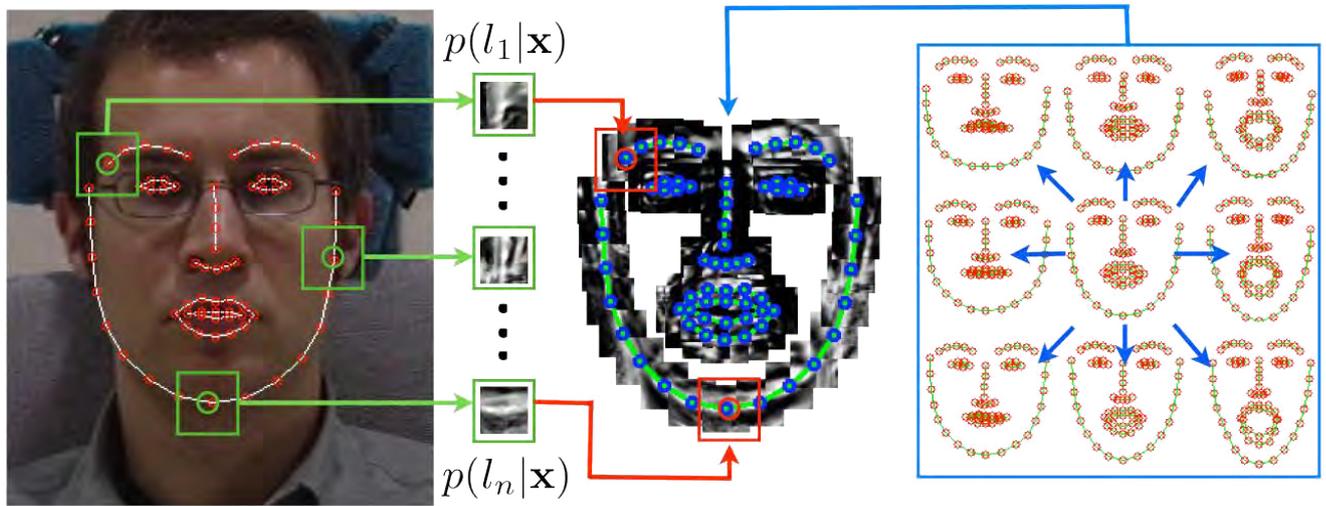
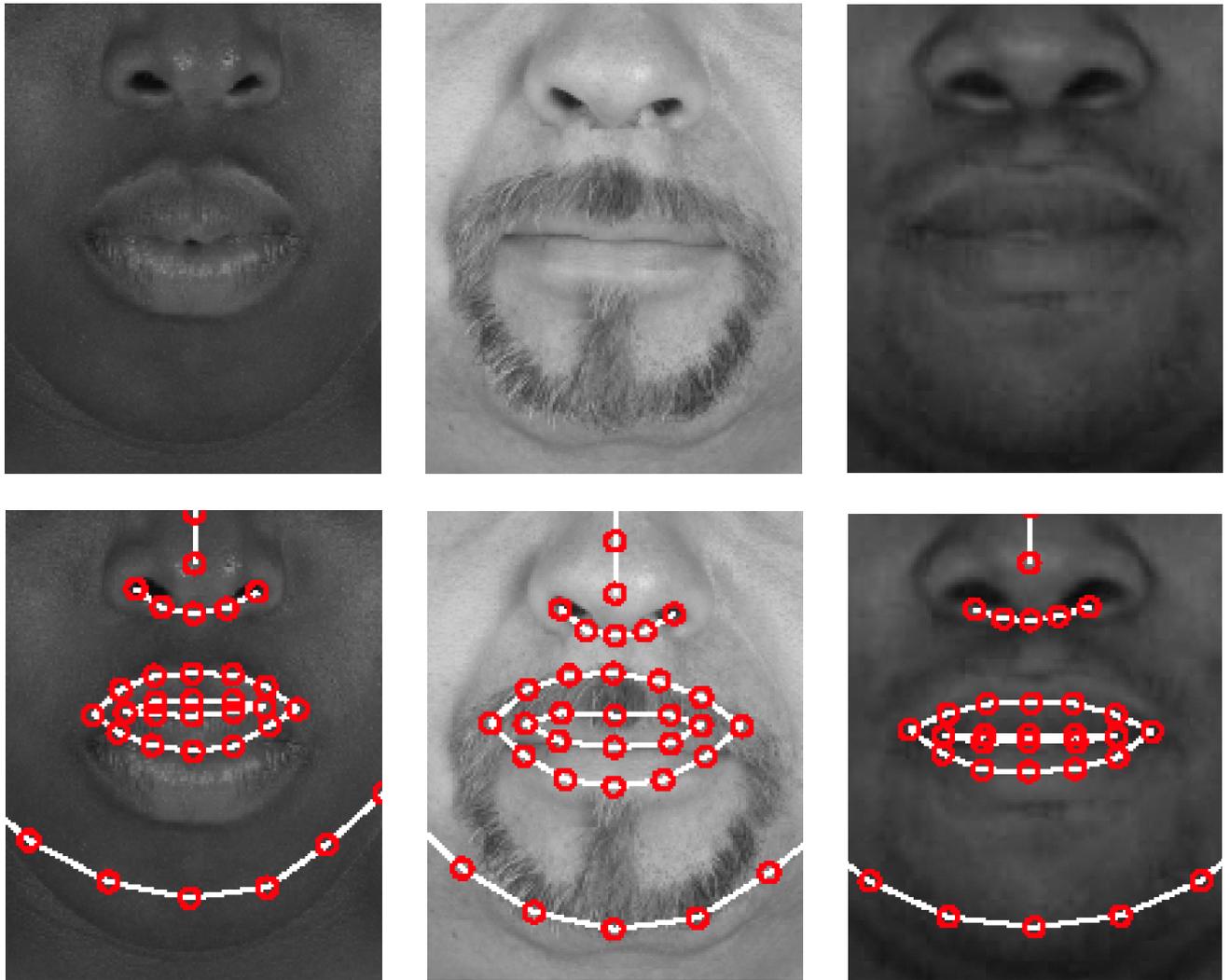


Рис. 11. Несвободная локальная модель лица. Справа — модель формы лица, по центру — карты отклика, слева — окна поиска и подогнанные антропометрические точки [70].

Однако необходимо отметить, что существующие методы обнаружения антропометрических точек с использованием несвободных локальных моделей обладают определенными недостатками (см. рис. 12).



Р и с. 12. Примеры некорректно обнаруженных точек лица алгоритмом, предложенным Дж. Сарагихом и др. [51] на фотографиях с большими губами, усами, широким носом.

Для решения существующих проблем предложен следующий алгоритм.

§ 3. Предложенный алгоритм

Требования алгоритма к входным фотографиям заключаются в следующем: две цветные фотографии анфас и в профиль, фотографии должны быть цветными, ширина лица на фотографии должна быть не

менее 512 пикселей (данное требование обуславливает качество генерируемой текстуры), лицо должно иметь нейтральные эмоции, не должно быть объектов, загораживающих лицо, включая очки (см. рис. 13).

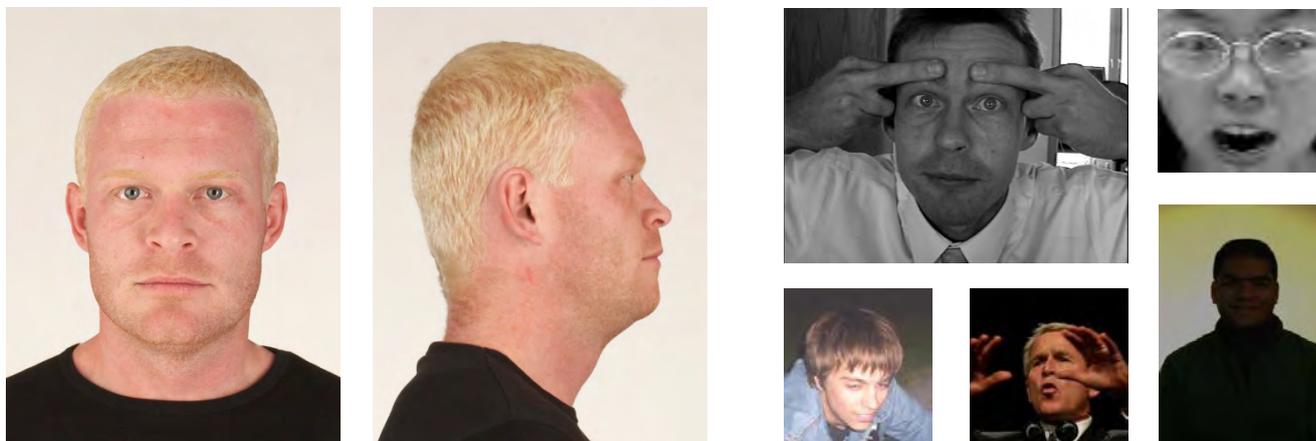
Стоит отметить, что, несмотря на длинный перечень требований, необходимые фотографии могут быть легко получены неопытным фотографом при использовании бытовой фотокамеры или смартфона.

Для получения точных результатов в автоматическом режиме работы алгоритма фотографии должны быть строго анфас и в профиль (аналогично требованиям к фотографиям на паспорт [71]).

Однако, учитывая, что предложенный в настоящей диссертации комплекс алгоритмов разбит на отдельные шаги, позволяющие неподготовленному пользователю легко вносить промежуточные корректировки, допустимы и существенные отклонения лица на фотографиях от положений анфас и в профиль [40]. В таком случае пользователю необходимо скорректировать положение неверно найденных антропометрических точек вручную, используя реализованный в программной системе инструментарий взвешенно-групповых преобразований [13].

Также стоит отметить, что на вход алгоритму может подаваться не только две фотографии, но и три (анфас, в профиль слева, в профиль справа), и одна. Работа с тремя фотографиями аналогична работе с двумя. При работе же с одной фотографией — фотографией анфас — в качестве профильных параметров модели головы используются средне-статистические параметры [72, 73]. Однако, так как дополнительные фотографии позволяют получать более точную модель, далее в работе бу-

дет рассматриваться только входные данные в виде двух фотографий: анфас и любая фотография в профиль (справа либо слева).



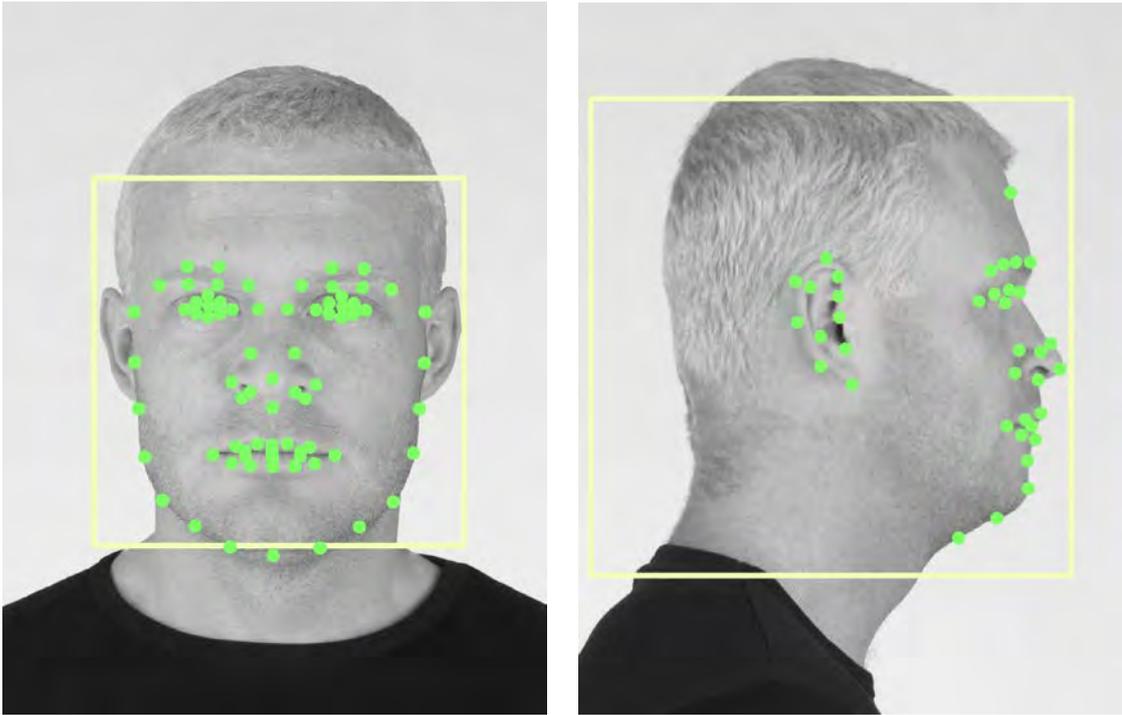
(a)

(б)

(в)

Р и с. 13. Примеры фотографий из существующих баз лиц (BioID [74], LFW [75], GENKI [76], CMU AMP [77], SIBC [78]): (а), (б) — допустимые входные фотографии анфас и в профиль, (в) — недопустимые фотографии.

На первом этапе предложенного алгоритма происходит определение положения и размера лица с помощью глобального детектора лиц. Для обнаружения лиц анфас использован детектор Виолы—Джонса (каскад признаков Хаара), для обнаружения лиц в профиль — каскад гистограмм локальных бинарных шаблонов. Обнаружение положения и размера лица требуется для инициализации алгоритма распознавания антропометрических точек лица (см. рис. 14).



Р и с. 14. Обнаружение антропометрических точек лица на фотографиях анфас и в профиль с помощью несвободных локальных моделей. Инициализация алгоритма происходит в области, выделенной детектором лица (показана квадратной рамкой), антропометрические точки, найденные алгоритмом, показаны зеленым.

В соответствии с поставленной задачей, параметры алгоритмов настроены так, чтобы при пренебрежении оптимизацией алгоритма по времени работы максимизировать точность обнаружения положения и размера лица и антропометрических точек.

Параметры детектора Виолы—Джонса настроены следующим образом: коэффициент масштабирования сканирующего окна — 1,01 (т. е., увеличение размера окна на очередном проходе — на 1%), минимальное число соседних прямоугольников, составляющих объект — 2, детектор краев Кэнни (он позволяет уменьшить время работы алгоритма, но при

этом может спровоцировать ложноотрицательное срабатывание) не используется.

Для обучения и тестирования несвободных локальных моделей были использованы следующие базы лиц. Из доступных размеченных баз фотографий незагороженных лиц анфас (подробный обзор сделан в работе С. Милборроу и др. [79]) для обучения использовано подмножество незагороженных лиц без эмоций из базы MUCT [79]. Для тестирования и сравнения с другими алгоритмами использовано подмножество незагороженных лиц без эмоций из базы BioID [74], одной из самых распространенных баз, что дает возможность сравнения с опубликованными работами. Обучение и тестирование на разных базах возможно, т. к. и в разметке BioID, и в разметке MUCT есть подмножество из 17 одинаковых точек, описывающих контуры губ, носа, глаз и бровей, эти же 17 точек использованы в общепринятой метрике, по которой проводится сравнение алгоритмов — m_{e17} [80] (см. 15):

$$m_{e17} = \frac{1}{17s} \sum_{i=1}^{17} d_i, \quad (1)$$

где d_i — Евклидово расстояние между антропометрической точкой, обнаруженной алгоритмом, и той же антропометрической точкой в исходной ручной разметке, s — расстояние между зрачками в исходной ручной разметке.



Р и с. 15. 17 точек метрики m_{e17} (иллюстрация из работы [79]).

Для обучения несвободной локальной модели лица в профиль также необходима размеченная база профильных фотографий лиц. В силу ее отсутствия в свободном доступе в рамках настоящей диссертационной работы была произведена ручная разметка базы из 705 фотографий лиц разных возрастов, национальностей и пола (см. 16). База была собрана из фотографий лиц в профиль PAL Face DB [81] и SIBC Human Photo References DB [78], на каждой фотографии было размечено по 35 точек. В экспериментах $\frac{3}{4}$ базы было использовано для обучения алгоритма и $\frac{1}{4}$ для тестирования.



Р и с. 16. Примеры лиц разных возрастов, национальностей и пола, которые были вручную размечены и использованы для обучения и тестирования.

В рамках диссертационной работы был проведен ряд экспериментов с целью повышения точности обнаружения антропометрических точек. Для повышения точности, а также согласованности положения одних и тех же точек лица, присутствующих как на фотографиях анфас, так и на фотографиях в профиль, предложен следующий алгоритм обнаружения точек одновременно на паре фотографий.

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:

$$E(\mathbf{p}) = \mathcal{R}_f(\mathbf{p}_f) + \sum_{i=1}^n \rho_i^f(\mathbf{x}_i^f, \mathcal{J}_f) + \mathcal{R}_p(\mathbf{p}_p) + \sum_{i=1}^k \rho_i^p(\mathbf{x}_i^p, \mathcal{J}_p) + \mathcal{Q}(\mathbf{p}), \quad (2)$$

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

$$\mathcal{Q}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^m \left(P_y(R_f \mathbf{x}_i^f) - P_y(s_p R_p \mathbf{x}_i^p + \mathbf{t}_p) \right)^2, \quad (3)$$

где P_y — матрица проекции на ось y (см. рис. 17).



Р и с. 17. Визуализация найденных точек на паре фотографий анфас и в профиль и соответствия между ними.

Проведена оценка оптимальных параметров независимо для фотографий анфас и фотографий в профиль: условий сходимости, дисперсии шума, размеров локальных классификаторов и окон поиска.

Поиск параметров модели происходит в цикле, выход из которого осуществляется при достижении любого из следующих условий:

- количество итераций при текущем значении дисперсии шума v достигает максимального значения;
- процент точек, сместившихся менее чем на 50% размера окна поиска, равен или больше допустимого значения.

Количество итераций на каждом уровне в работе Дж. Сарагиха и др. [51] равно 4, в работах Т. Кутеса и др. [52] и С. Милборроу [44] равно 5. Процент точек с малым смещением в [44] принят равным 80%, в [52] — 90%. Проведенный эксперимент показал, что минимальная невязка с исходной ручной разметкой по метрике m_{e17} достигается при количестве итераций равном 6 и проценте точек с малым смещением равном 90% (см. рис. 18).

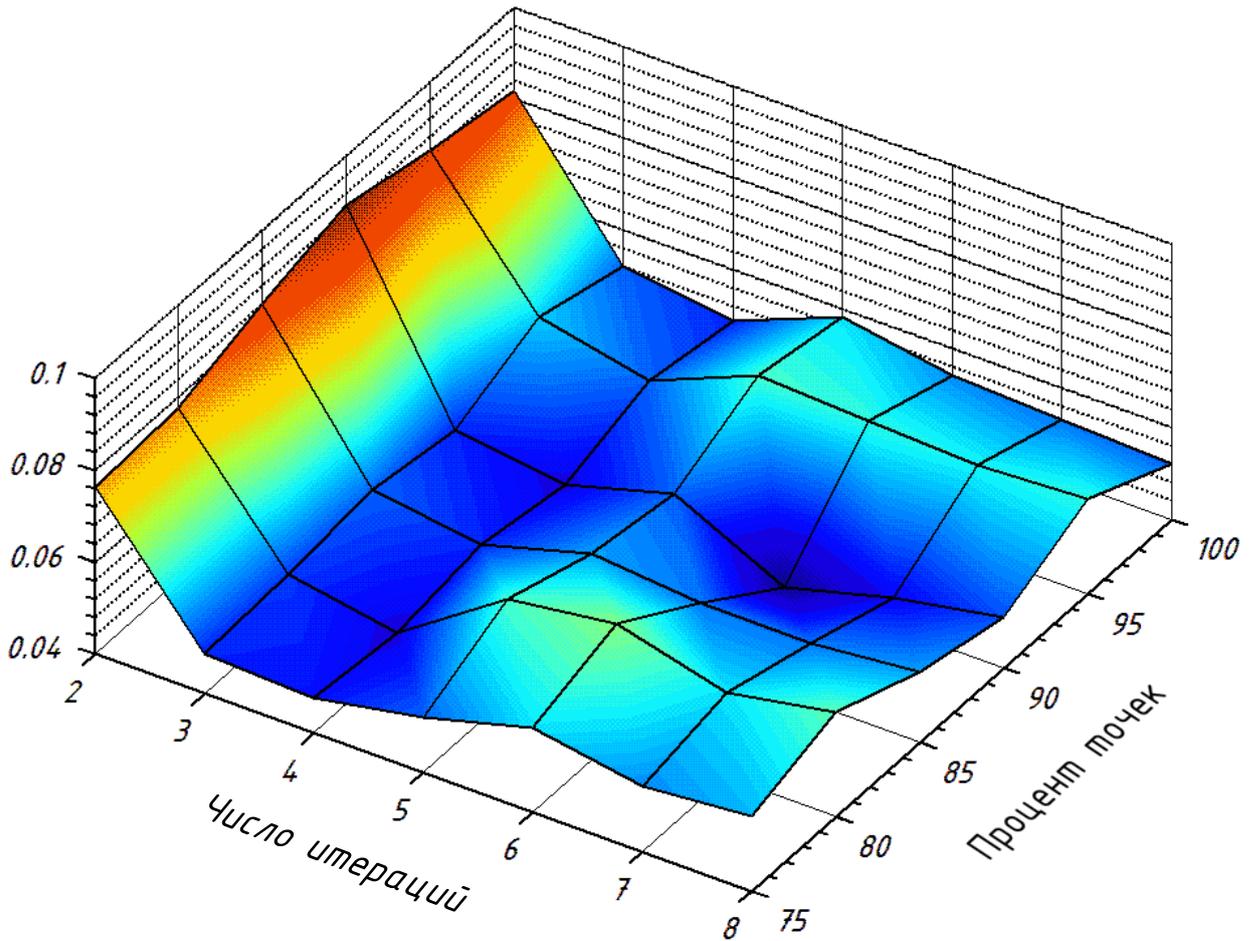
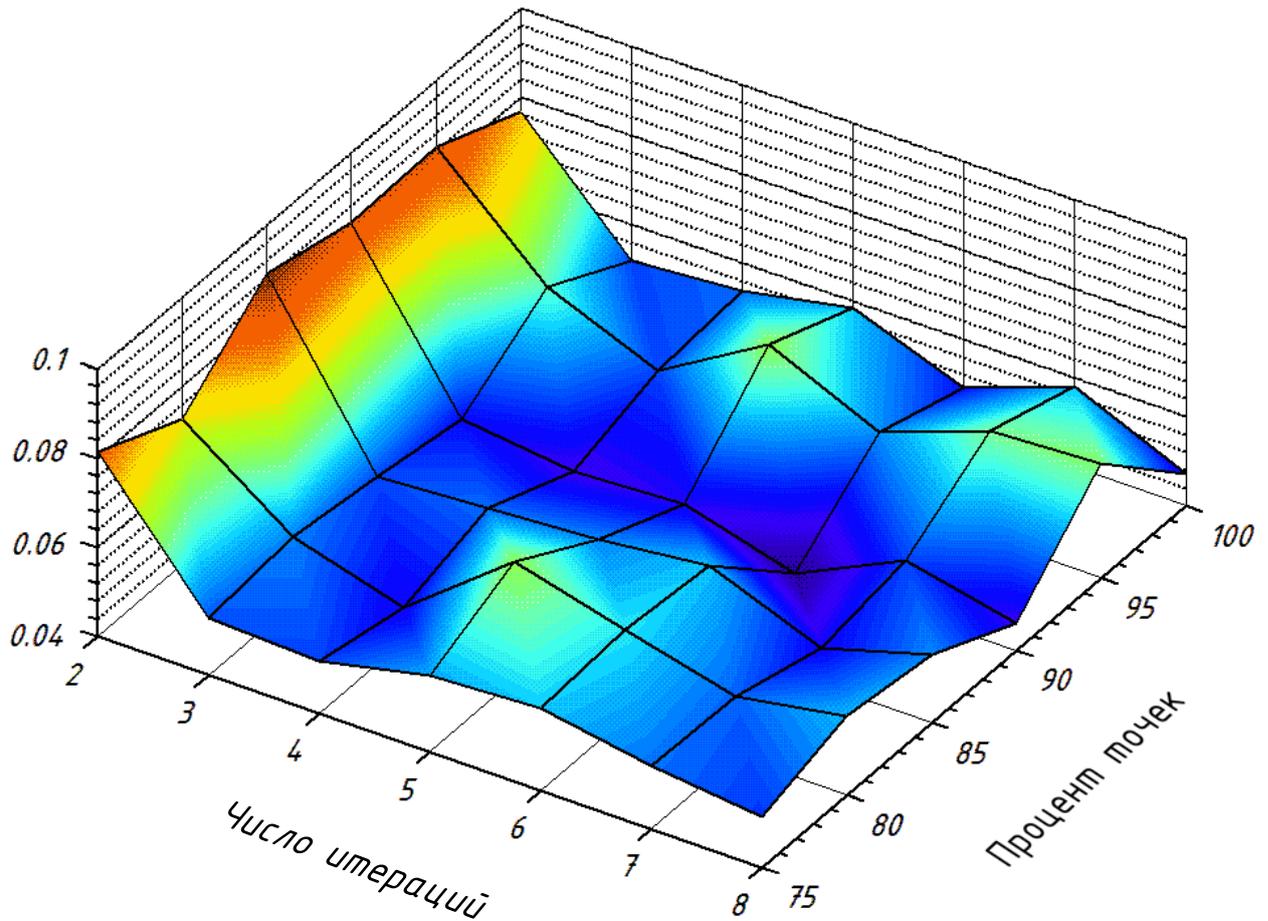


Рис. 18. Экспериментальная оценка для лиц анфас: оптимальные значения числа итераций и процента точек с малым смещением несвободной локальной модели.

Значения тех же параметров несвободной локальной модели для лиц в профиль отличаются (см. рис. 19), однако оптимальными значениями также являются количество итераций равное 6 и процент точек с малым смещением равный 90.

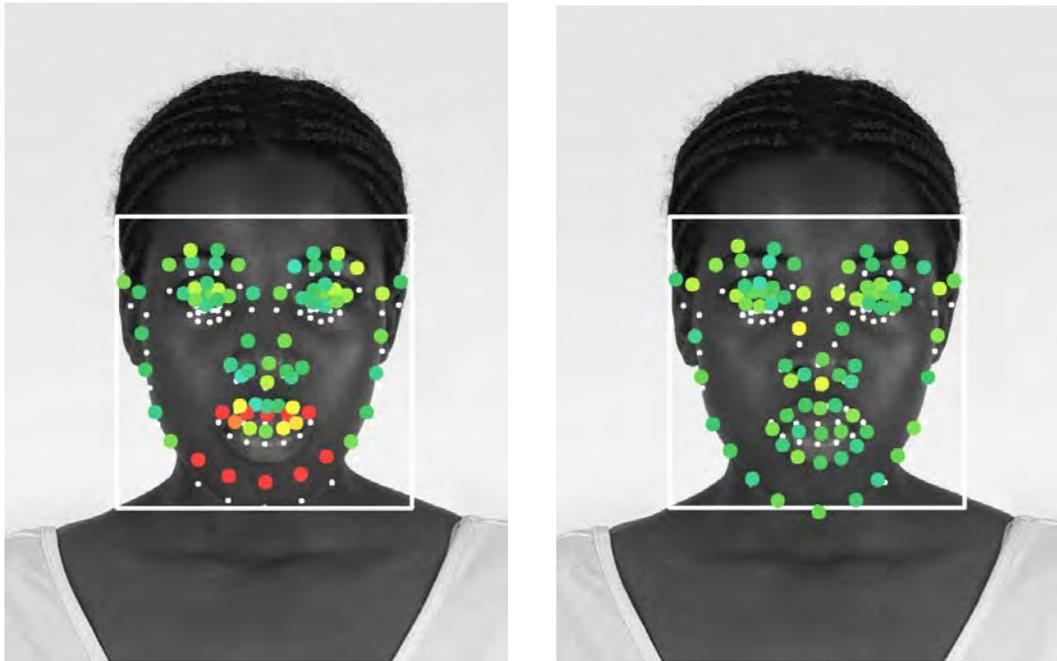


Р и с. 19. Экспериментальная оценка для лиц в профиль: оптимальные значения числа итераций и процента точек с малым смещением несвободной локальной модели.

Также независимо для фронтальных и профильных моделей произведена оценка оптимальных значений размеров локальных классификаторов и окон поиска, а также дисперсии шума. Для лиц анфас оптимальные размеры локальных классификаторов (локальных экспертов) — 15×15 , оптимальные размеры окон поиска — 19×19 . Для лиц в профиль — классификаторы 11×11 и окна поиска 15×15 . Значение дисперсии шума v в несвободной локальной модели уменьшается на

каждом уровне (представляя собой более общий подход по сравнению с пирамидой Гаусса в [82]). Оптимальными значениями дисперсии шума для лиц анфас являются $v = \{18, 9, 4, 1\}$, для лиц в профиль — $v = \{15, 7, 3, 1\}$.

Учитывая, что приоритетной является максимизация точности обнаружения антропометрических точек, но не минимизация времени исполнения, также предложен следующий подход. По завершении работы алгоритма производится оценка качества разметки по следующей метрике: если сумма расстояний Махаланобиса между профилем в обученной модели и наилучшим профилем в окрестности текущей точки больше заданного порога, либо если на последнем уровне дисперсии шума алгоритм завершил работу по достижении максимально допустимого количества итераций (но не по процентному соотношению точек с малым смещением) — алгоритм поиска антропометрических точек переинициализируется с двукратной дисперсией шума v (см. рис. 20). Переинициализация происходит с исходного приближения модели, полученного в результате работы детектора лиц. Из полученных разметок выбирается имеющая наибольшее значение метрики качества.



(а)

(б)

Р и с. 20. Визуализация найденных точек: цветом показано значение невязки между профилем в обученной модели и наилучшим профилем в окрестности текущей точки, (а) — найденные точки при начальной дисперсии шума $\nu_0 = 18$, (б) — найденные точки при начальной дисперсии шума $\nu_0 = 36$.

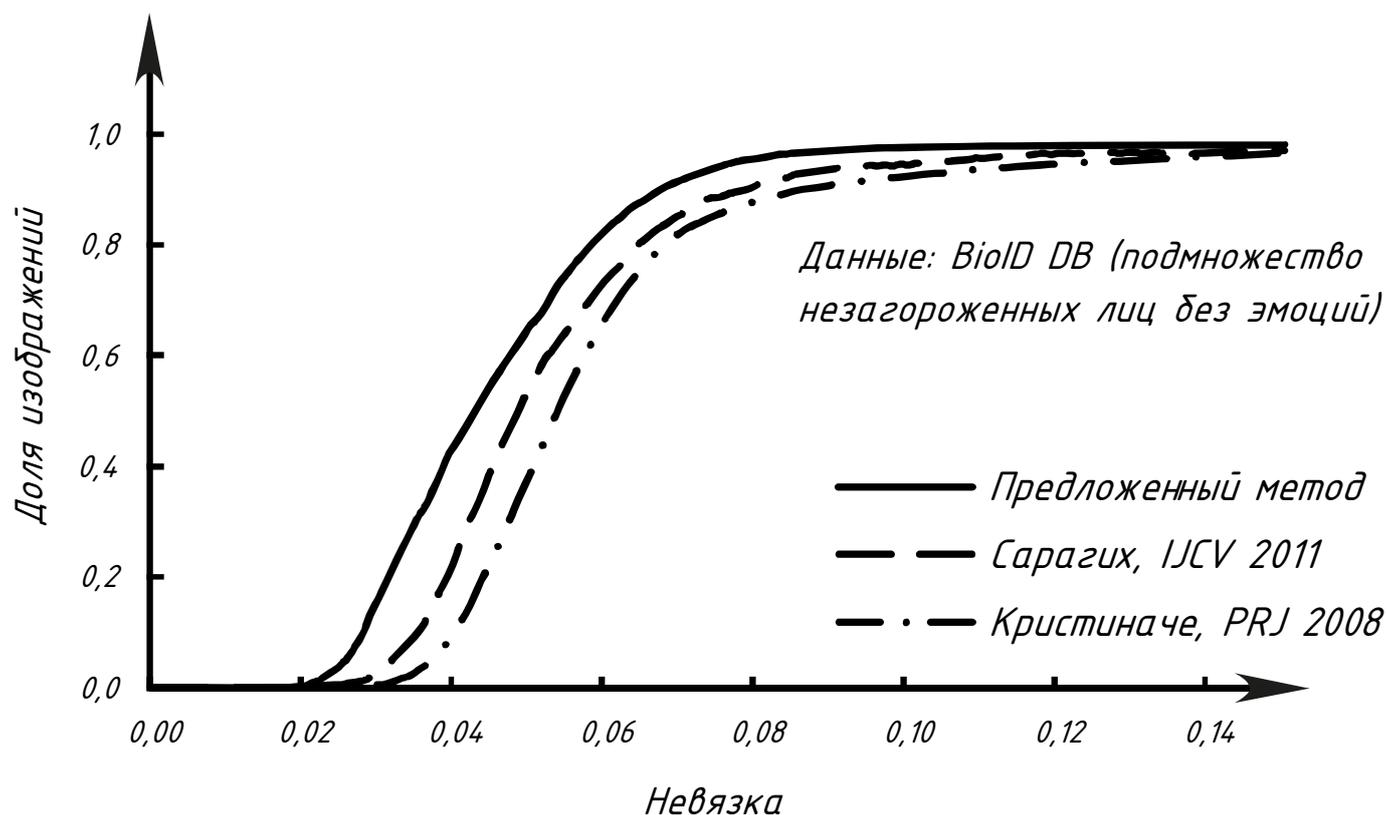
Результаты работы предложенного алгоритма приведены на рис. 21.



Р и с. 21. Антропометрические точки на парах фотографий анфас и в профиль, найденные предложенным алгоритмом.

§ 4. Эксперименты и сравнение

Сравнение предложенного алгоритма проводилось с работами по несвободным локальным моделям Дж. Сарагиха и др. [70] и Д. Кристиначе и др. [50]. Оба автора — и Джейсон Сарагих, и Дэвид Кристиначе — прислали для проведения сравнения программные реализации своих алгоритмов, что позволило использовать одно и то подмножество незагороженных лиц без эмоций базы BioID. Результаты сравнения приведены на рис. 22.



Р и с. 22. Выборочные функции распределения на подмножестве незагороженных лиц без эмоций базы BioID.

Графики демонстрируют эмпирические кумулятивные функции распределения на выборке из подмножества незагороженных лиц без эмоций базы BioID. Невязка считается в соответствии с метрикой m_{e17} . Графики демонстрируют, что вероятность получения невязки, равной или меньшей, например, 0,05 составляет при использовании предложенного алгоритма около 0,7, при использовании алгоритма Дж. Сарагиха — около 0,6, и при использовании алгоритма Д. Кристиначе — около 0,4.

§ 5. Заключение

Предложен новый алгоритм обнаружения антропометрических точек лица на паре фотографий анфас и в профиль. 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 [50, 51], сочетающих в себе преимущества активных моделей формы [52, 44] и активных моделей внешнего вида [54, 55], и демонстрирующих по сравнению с ними существенно более точные результаты [68, 69].

Для обучения и тестирования несвободных локальных моделей были использованы фотографии анфас из базы лиц MUCT [79] и подмножество незагороженных лиц без эмоций из базы BioID [74]. Для обучения модели лица в профиль была произведена ручная разметка базы из 705 фотографий лиц разных возрастов, рас и пола.

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.

Проведена оценка оптимальных параметров для фотографий анфас и фотографий в профиль: условий сходимости, дисперсии шума, размеров локальных классификаторов и окон поиска.

Предложен новый многоступенчатый алгоритм поиска, оценивающий качество разметки, вычисляя расстояния Махаланобиса для каждой точки, и при необходимости переинициализирующий процесс поиска с другими параметрами.

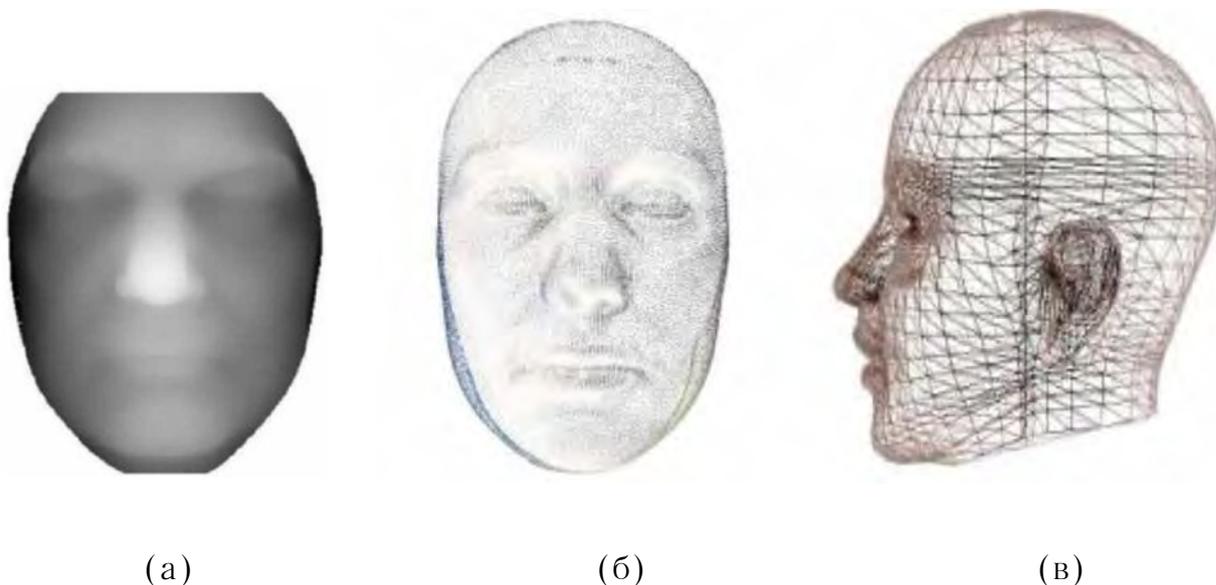
Предложенный алгоритм дает как более высокую точность положения найденных точек по сравнению с существующими алгоритмами, так и согласованность положения одних и тех же точек лица, присутствующих как на фотографиях анфас, так и на фотографиях в профиль.

ГЛАВА 2

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА

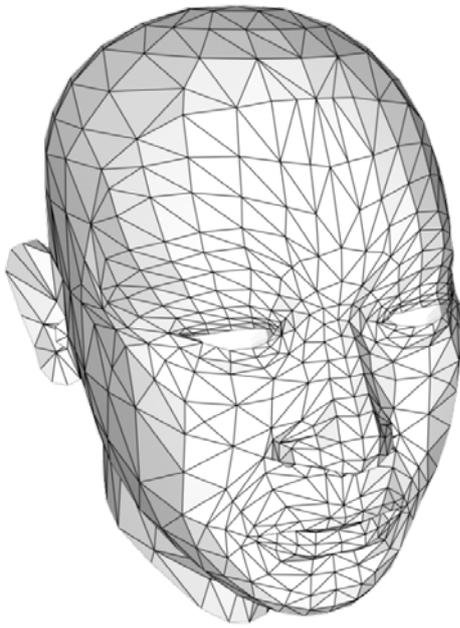
§ 1. Введение

Как было отмечено во введении к настоящей диссертации для построения трехмерной модели головы человека существует ряд алгоритмов, как с использованием активных (облучающих) систем, так и с использованием пассивных (см. рис. 10). Наиболее распространенными представлениями трехмерной модели головы или только лица являются карта глубины, облако точек, полигональная модель (см. рис. 23), либо параметрическая модель, описывающей антропометрические характеристики головы человека (см. рис. 29).



Р и с. 23. Примеры трехмерного представления лица: (а) — карта глубины, (б) — облако точек, (в) — полигональная модель (изображения из работы [16]).

Формализуем общепринятое понятие полигональной модели. Полигональная модель — это четверка $\mathcal{A} = (\mathbf{v}, \mathbf{t}, \mathbf{n}, F)$, где \mathbf{v} — n_V -мерный вектор вершин (пространственных координат), $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^3$; \mathbf{t} — n_V -мерный вектор текстурных координат, $\mathbf{t}_i \in \mathbb{R}^2$; \mathbf{n} — n_V -мерный вектор нормалей, $\mathbf{n}_i \in \mathbb{R}^3$; $F = (f_{ij}) \in \mathbb{N}^{3 \times n_E}$ — матрица полигонов (треугольников), $e_{ij} \in \mathbb{N}$, $1 \leq f_{ij} \leq n_V$ (см. рис. 24).



(а)



(б)

Рис. 24. (а) — полигональная модель с визуализацией ребер, (б) — текстура, накладываемая на полигональную модель.

Параметрическая модель — $\mathcal{M}(\mathcal{B}, S, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{v}^{\mathcal{B}} + S\boldsymbol{\theta}^T$, где \mathcal{B} — базовая полигональная модель, задающая координаты вершин по умолчанию, $S = (s_{ij}) \in \mathbb{R}^{n_V \times n_\theta}$ — матрица смещений (см. рис. 29), $s_{ij} \in \mathbb{R}^3$; $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^k$ — вектор параметров модели, в простейшем случае $\theta_i \in \mathbb{R}$ — это скаляры, однако в используемых на практике моделях $\boldsymbol{\theta}$ есть вектор-

функция $\mathbb{R}^{n_\zeta} \rightarrow \mathbb{R}^{n_\theta}$ особого вида: каждая θ_i есть функция $\theta_i(\zeta_j)$, причем $\exists j: \exists i_0, i_1, i_0 \neq i_1$, при которых $\theta_{i_0} = \theta_{i_0}(\zeta_j)$ и $\theta_{i_1} = \theta_{i_1}(\zeta_j)$, т. е. каждый элемент θ существенно зависит только от одной переменной ζ_j , однако некоторые элементы θ зависят от одних и тех же ζ_j .

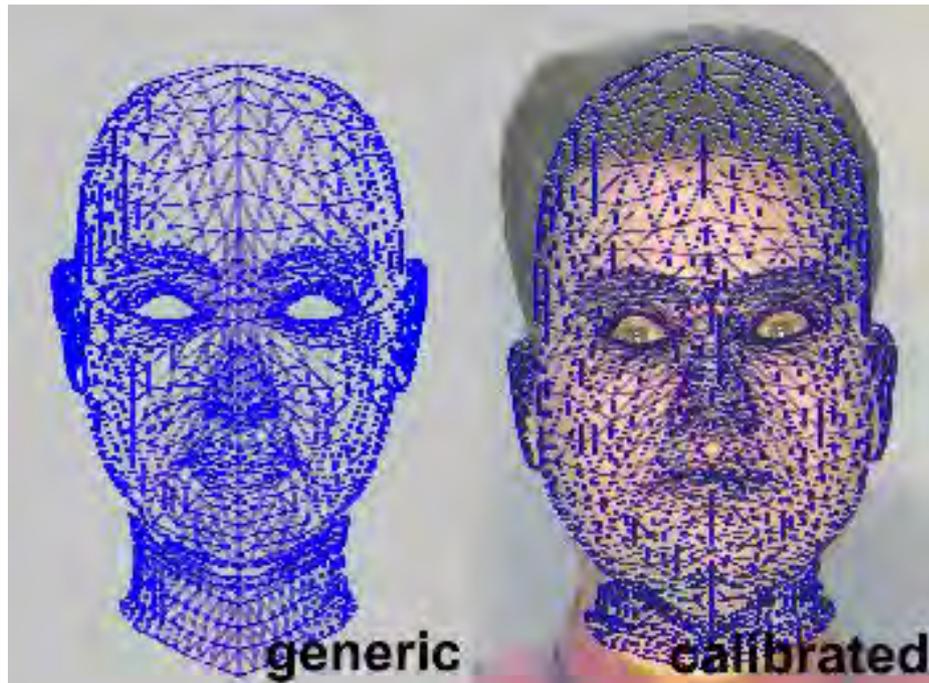
За прошедшие годы в направлении построения трехмерной модели головы человека был достигнут существенный прогресс, были разработаны методы генерации высокодетализированных фотореалистичных моделей, но, тем не менее, предлагаемые на сегодняшний день решения обладают определенными недостатками: требуют специальной аппаратуры, нуждаются в существенной ручной доработке, работают на узком классе входных данных либо дают результаты низкого воспринимаемого качества.

Обзорам данной области посвящен ряд научных работ. Последними из них являются работы М. Дж. Лео и Д. Манимегалаи [16], Я. Ванга и др. [83], Н. Эрсотелоса и Ф. Донга [84], Д. Чандры и др. [85]. Обзор исключительно морфируемых моделей приведен в работе Р. Кноте и др. [86]. Также заслуживают внимания подробные обзоры области и приведенные классификации, сделанные В. Г. Жислиной и др. [28], Дж. Нохом и У. Нейманом [87], а также В. Ли и др. [88].

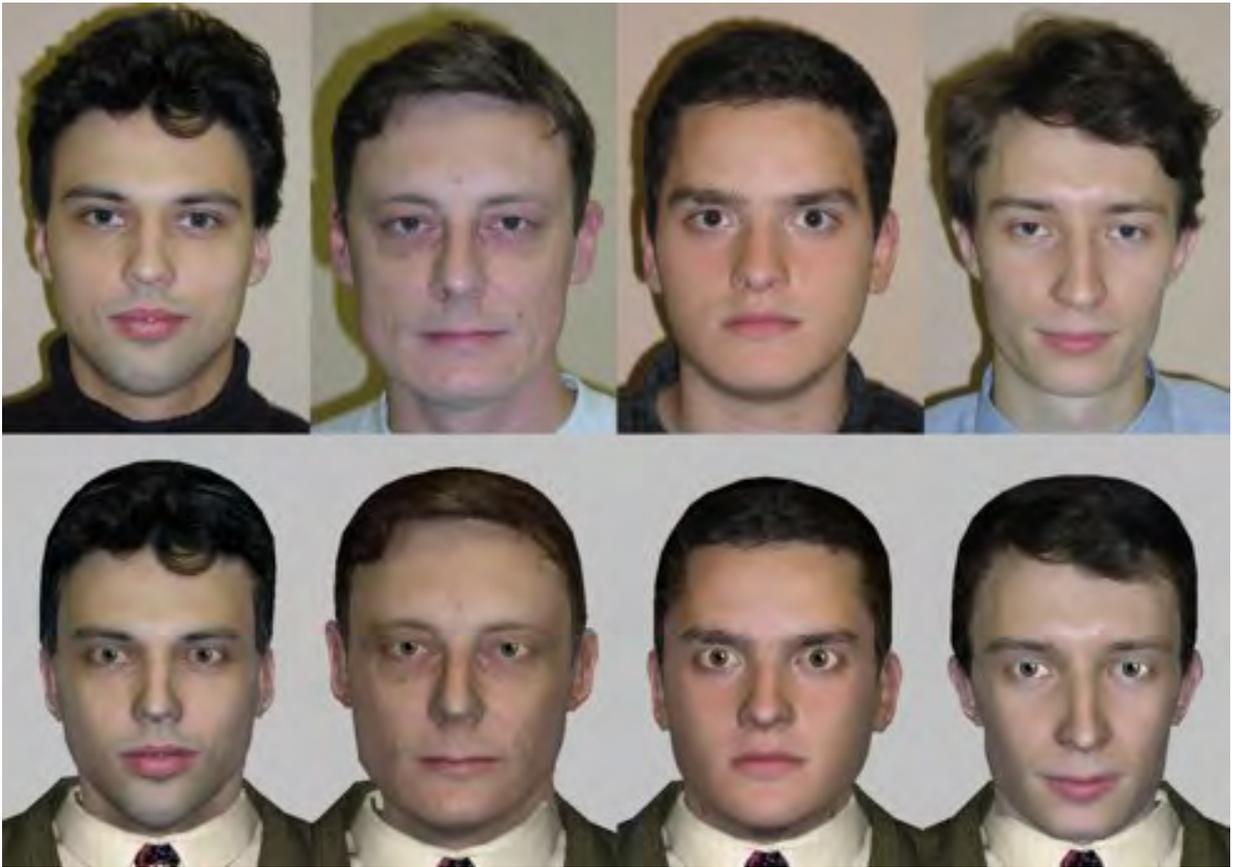
Также обзорами области являются публикации И. Шенга и др. [89] и Ч. Суэна и др. [90], однако среди их недостатков стоит отметить краткость обзора, а также отсутствие ряда ключевых работ в области построения моделей головы человека.

Как было показано во введении к настоящей диссертации, при постановке задачи построения модели головы для систем виртуальной реальности с минимальными требованиями к входным данным и минимальным объемом взаимодействия с пользователем оптимальным является подход с подгонкой к антропометрическим точкам.

Настоящая глава посвящена оценке параметров геометрической модели. В базовом случае параметрами могут являться непосредственно трехмерные координаты всех вершин полигональной модели [91, 92] (см. рис. 25, 26) или трехмерные координаты некоторого набора вершин [93]. В современных более гибких моделях параметры соответствуют антропометрическим характеристикам лица человека [94, 95].

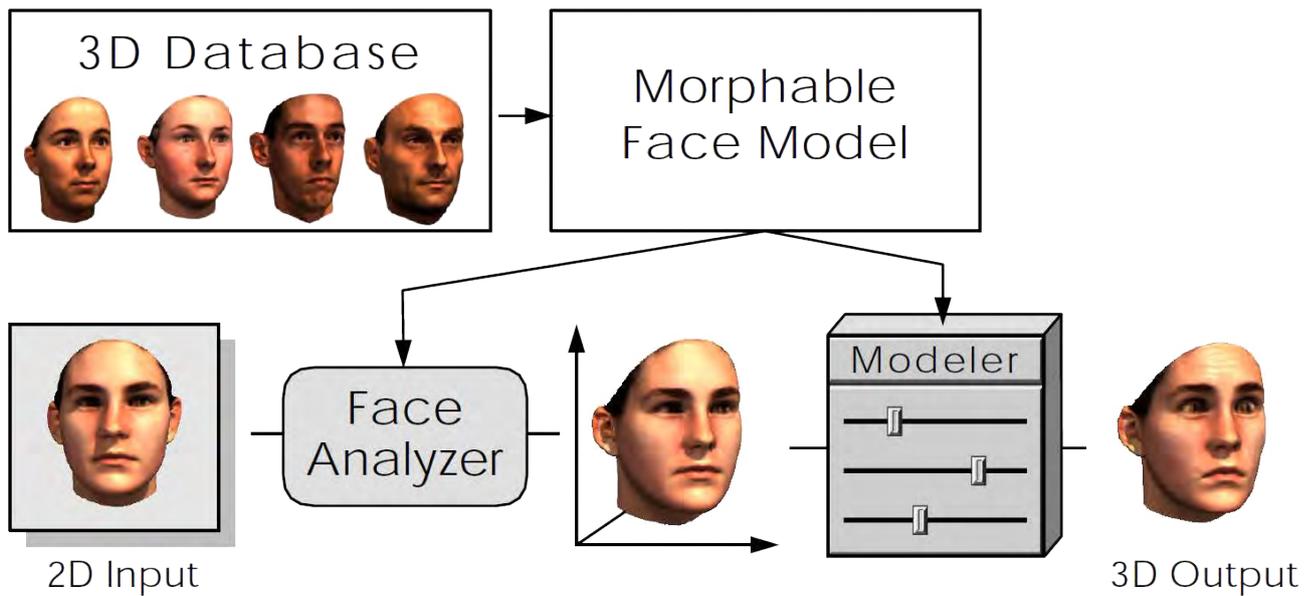


Р и с. 25. Калибровка геометрии модели с использованием подхода на основе радиально-базисных функций [91]. Для получения анатомически корректной модели, ключевые вершины которой соответствуют антропометрическим точкам на входных фотографиях, сначала осуществляется многоэтапная оценка глобальных пропорций головы с помощью взвешенных функций радиального вида, а затем — локальная подгонка с учетом топологической структуры базовой модели. Разбиение на этапы осуществлено для устранения артефактов в областях, удаленных от контрольных точек: на первом этапе используются такие точки, как вершина головы, низ подбородка и т. п., а на следующих этапах работа ведется уже с более мелкими деталями. В качестве функции радиального вида используется функция Гаусса, коэффициент амплитуды определен для каждого этапа эмпирически.



Р и с. 26. Исходные фотографии (верхний ряд) и построенные трехмерные модели (нижний ряд) [96].

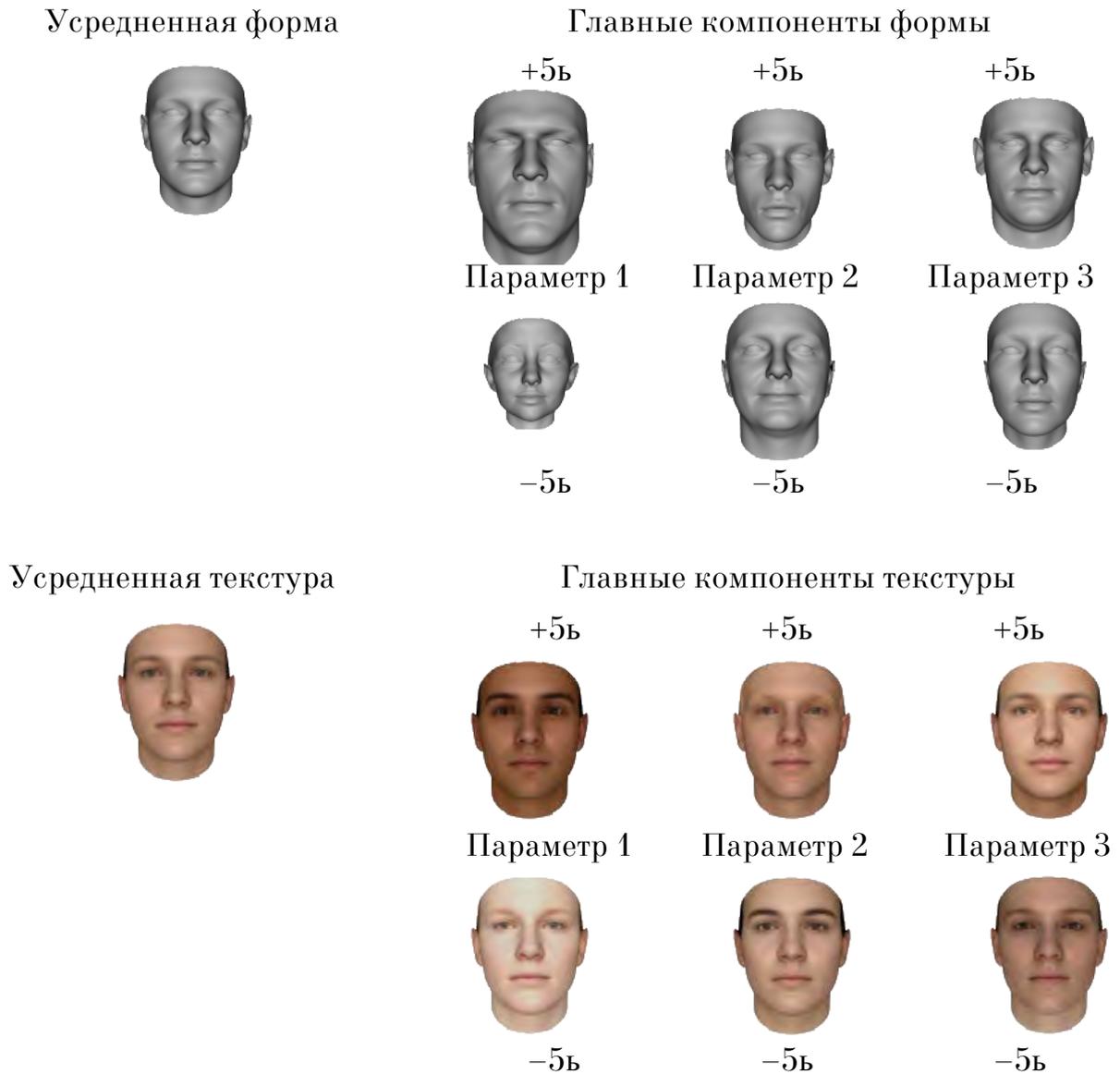
Широко известным примером параметрической модели является морфируемая модель, предложенная В. Бланцем и Т. Веттером [27] (см. рис. 27). Суть ее заключается в следующем. По базе трехмерных сканограмм лиц с помощью анализа главных компонент строится так называемая морфируемая модель, содержащая информацию об усредненном лице и допустимых анатомически корректных вариациях, полученных в результате обучения на сканограммах реальных лиц (см. рис. 28).



Р и с. 27. Построение морфируемой модели лица происходит с использованием базы трехмерных сканограмм лиц. Морфируемая модель позволяет осуществлять анализ новых входных изображений лица, а также синтез (моделирование) новых лиц с сохранением антропометрических особенностей [27].

Морфируемая модель содержит как геометрическую, так и цветовую информацию, что позволяет использовать ее для подгонки модели головы напрямую к новому изображению лица.

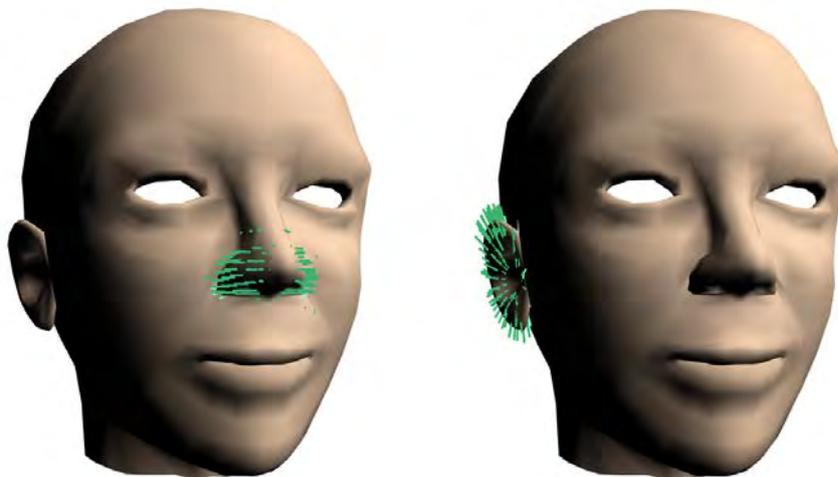
Стоит отметить, что каждый параметр не характеризует какую-либо конкретную черту, он изменяет лицо в целом, как в плане геометрии, так и, тем более, текстуры. Это делает невозможным ручное редактирование, и по причине неясной семантики и отсутствия достаточного контроля в современных системах виртуальной реальности используется сегментированная модель.



Р и с. 28. Параметрическая целостная модель: усредненные форма и текстура, а также первые три главные компоненты как формы, так и текстуры [86].

Модель, используемая в современных системах виртуальной реальности, выглядит следующим образом. Каждый параметр содержит: индекс вершины; вектор, задающий направление и силу смещения вер-

шины; минимальное, максимальное и значение по умолчанию, а также вектора смещений текстурных координат и нормалей (см. рис. 29).



Р и с. 29. Параметрическая сегментированная модель: визуализация наборов векторов смещений, отвечающих за ширину носа (слева) и размер ушей (справа) в широко используемой в современных системах виртуальной реальности модели LAD [97].

Таким образом, общую проблему настоящей диссертации можно сформулировать следующим образом: необходимо построить не просто полигональную модель, но определить антропометрические параметры головы человека по фотографиям.

Решаемая задача заключается в оценке антропометрических параметров модели головы человека, а также получении полигональной модели, соответствующей оцененным параметрам, и последующей генерации ее текстуры.

Помимо вышеуказанных работ, необходимо отметить работы [98, 99], работающие с той же вышеупомянутой моделью LAD [97]. Авторами

предложен алгоритм с промежуточным построением непараметрической трехмерной модели: промежуточная модель подгоняется к найденным на фотографиях антропометрическим точкам, а параметрическая модель подгоняется уже к промежуточной трехмерной модели. На первом этапе вершины обеих моделей трактуются как облака точек, и осуществляется их грубая подгонка с помощью итеративного алгоритма ближайших точек. Точная подгонка модели осуществляется с помощью тонкопластинных сплайнов и алгоритма имитации отжига. Стоит, однако, отметить, что авторы приводят иллюстрации полученных моделей исключительно анфас, что затрудняет оценку и сравнение полученных результатов. Кроме того в рамках настоящей диссертационной работы было выявлено [33, 100], что использование промежуточной модели является неоправданным усложнением алгоритма и неизбежно вносит существенные неточности при работе с параметрическими моделями.

§ 2. Предложенный алгоритм

Общая схема предлагаемого алгоритма выглядит следующим образом. Полигональная модель предварительно размечена (см. особенности разметки ниже в настоящем параграфе), на первом этапе разметка проецируется на входные фотографии и подгоняется к найденным антропометрическим точкам, на втором этапе форма базовой модели головы подгоняется к разметке.

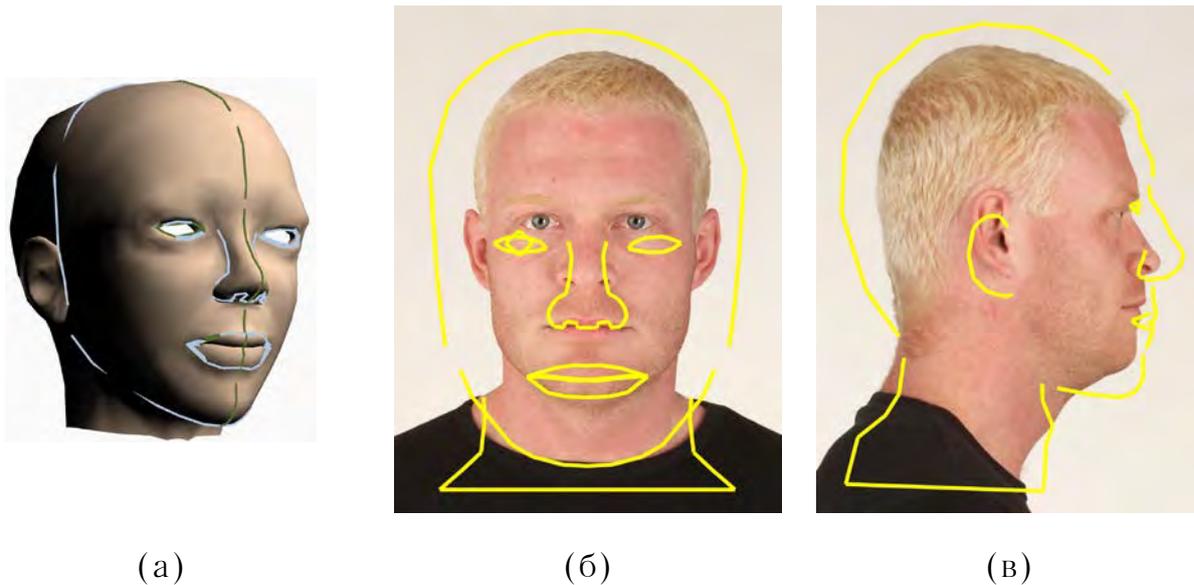
Как было отмечено в предыдущем параграфе, данный подход позволяет работать с широким классом деформируемых моделей, а также поз-

воляет неподготовленному пользователю вносить корректировки на любом этапе в случае некорректной работы алгоритма на одном из этапов (что возможно при использовании некорректных входных данных, например, сильно зашумленных или снятых с ракурсов, отличных от положений строго анфас и строго в профиль). Подробнее этапы предложенного алгоритма описаны ниже.

В соответствии с постановкой задачи нет необходимости оптимизировать алгоритм по времени работы или по объему используемой памяти, однако требуется обеспечить высокое качество получаемых моделей с точки зрения восприятия человеком.

Для решения поставленной задачи предложен алгоритм, состоящий из независимых шагов. Разбиение алгоритма на независимые этапы позволяет при необходимости осуществлять ручную коррекцию промежуточных результатов, обеспечивая таким образом корректную работу на последующих этапах.

Базовая полигональная модель предварительно размечена. Разметка $\mathbf{d} = (\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_{n_d})$ представляет собой набор векторов $\mathbf{d}_i = (d_1^i, d_2^i, \dots, d_{m_i}^i)$, элементами которых являются индексы d_j^i вершин базовой полигональной модели. Таким образом, вектор $\mathbf{u}_i = (\mathbf{u}_1^i, \mathbf{u}_2^i, \dots, \mathbf{u}_{m_i}^i) = (\mathbf{v}_{d_1^i}, \mathbf{v}_{d_2^i}, \dots, \mathbf{v}_{d_{m_i}^i})$, задает ломаную в \mathbb{R}^3 , проходящую по вершинам базовой полигональной модели. Каждая ломаная описывает одну характерную черту лица человека, такую как контур глаза, носа, или всей головы (см. рис. 30).



Р и с. 30. (а) — разметка для фотографий анфас (светло-серая) и в профиль (темно-зеленая), (б), (в) — разметка, спроецированная на соответствующие фотографии.

Разметка (и соответствующие ломаные) заданы для проекций анфас и в профиль. Однако, в силу того, что работа с разметкой (и ломаными) происходит одинаково для каждой проекции, для упрощения записи, где это возможно, не будем уточнять текущую проекцию, и оператор ортогонального проецирования вершин модели на плоскость фотографии будем обозначать просто как $\mathcal{P}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$. Проекцию вершин полигональной модели на плоскость фотографии будем обозначать $\mathbf{v}_i = \mathcal{P}\mathbf{v}_i$. Проекцию же вершин ломаных $\mathbf{u}_j^i = \mathbf{v}_{d_j^i}$ будем обозначать $\boldsymbol{\mu}_j^i = \mathcal{P}\mathbf{u}_j^i = \mathbf{v}_{d_j^i}$.

При подгонке разметки к найденным антропометрическим точкам используется три типа преобразований:

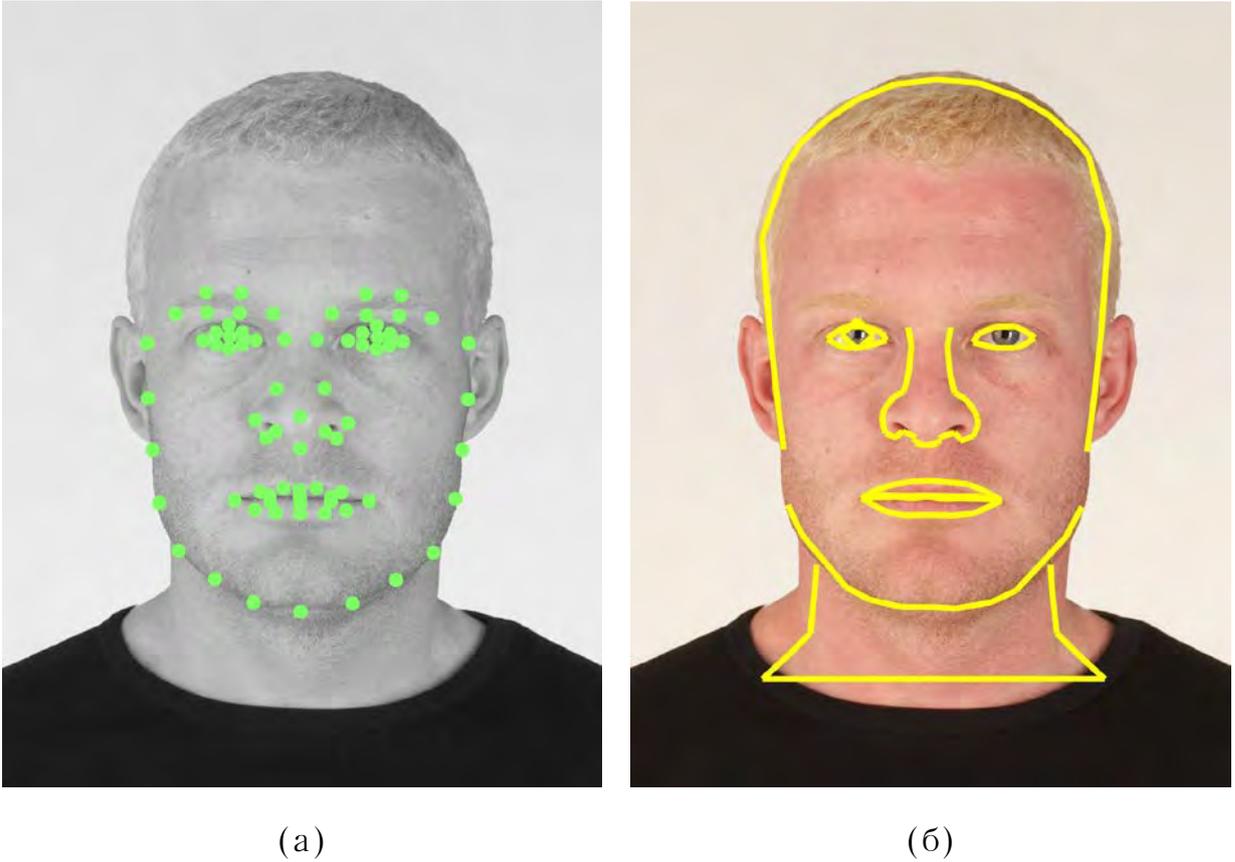
- идентичное;
- со смещением относительно обнаруженных точек;

— аффинное относительно уже расставленных точек.

Узлы спроецированных ломаных μ_j^i , полностью соответствующие найденным антропометрическим точкам (такие как уголки глаз или уголки губ), перемещаются в соответствующие координаты, перемещенные точки будем обозначать $\mu_j^{\prime i}$.

Узлы спроецированных ломаных μ_j^i , не полностью соответствующие найденным антропометрическим точкам, а находящиеся между ними, проецируются со смещением относительно этих точек. Например, верхний контур глаза низкополигональной модели может состоять из 4 вершин, находящихся на равном расстоянии друг от друга, а результатом работы алгоритма обнаружения точек лица может быть набор из 5 антропометрических точек, находящихся на равном расстоянии друг от друга. Таким образом, узлы ломаной из четырех вершин проецируются с соответствующим смещением относительно пяти обнаруженных антропометрических точек.

По расставленным узлам спроецированных ломаных μ_j^i вычисляется матрица аффинного преобразования, с помощью которой перемещаются все остальные узлы каждой ломаной (см. рис. 31).



Р и с. 31. (а) — антропометрические точки, распознанные на предыдущем этапе, (б) — подогнанные к этим точкам проекции ломаных разметки μ , проходящих по вершинам полигональной модели.

Цель данного этапа заключается в подгонке проекций ломаных, задаваемых параметрической моделью (будем обозначать их $\hat{\mu}$, а копию базовой модели \mathcal{B} , параметры которой мы итерируем на данном этапе, будем обозначать как \mathcal{C}), к ломаным, полученным на предыдущем этапе, μ' , то есть, в нахождении значений параметров θ , минимизирующих невязку (см. рис. 32).

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 [101, 102, 103], целесообразно разбить

набор ломаных $\boldsymbol{\nu}$ (и, соответственно, их проекций $\boldsymbol{\mu}$) 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

$$E = \eta_L E_L + \eta_P E_P + E_I, \quad (4)$$

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

E_L , функционал, показывающий невязку между ломаными, задается следующим образом:

$$E_L = \sum_{i=m_k}^{m_{k+1}} \sum_{j=1}^{L_i} \rho_L(\boldsymbol{\mu}'_i, \hat{\boldsymbol{\mu}}_j^i), \quad (5)$$

где $\rho_L(\boldsymbol{\mu}'_i, \hat{\boldsymbol{\mu}}_j^i)$ — Евклидово расстояние между j -ой вершиной i -ой итерированной ломаной $\hat{\boldsymbol{\mu}}_j^i(\boldsymbol{\theta})$ и i -ой фиксированной ломаной $\boldsymbol{\mu}'_i$. А η_L — весовой коэффициент, соответствующий энергии E_L .

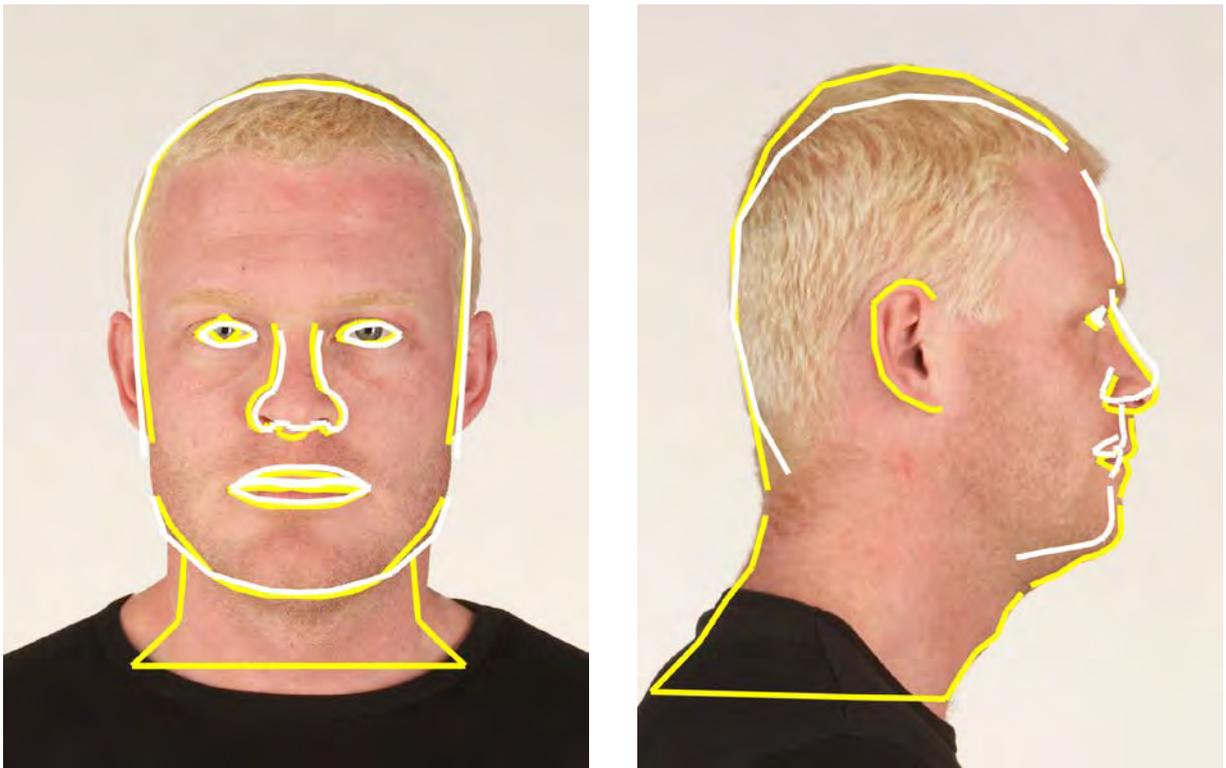
E_P , функционал невязки между n_{Pk} пикселями в области подбираемой черты лица задается следующим образом:

$$E_P = \sum_{i=1}^{n_{Pk}} \|p_i - \hat{p}_i\|^2, \quad (6)$$

где p_i — i -ый пиксель из выбранного случайным образом подмножества в области подбираемой черты лица, \hat{p}_i — соответствующий пиксель из изображения визуализированной модели головы на текущей итерации, η_P — весовой коэффициент энергии E_P .

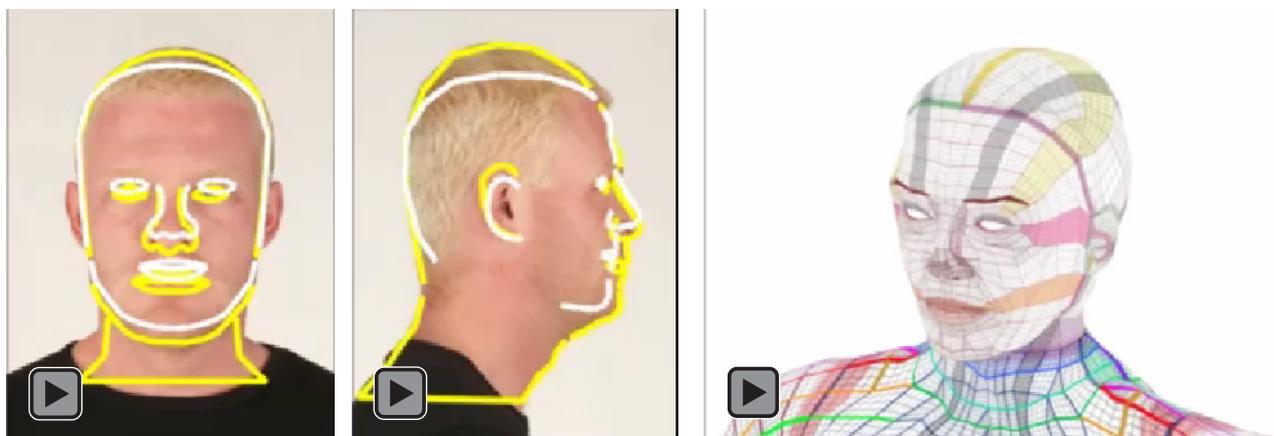
Внутренняя энергия E_I определяется как расстояние Махаланобиса между искомыми параметрами θ и параметрами $\bar{\theta}$, соответствующими среднестатистической модели головы.

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 «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.



Р и с. 32. Ломаные μ' , описывающие контуры характерных черт лица (желтые), и $\hat{\mu}$, подбираемые на данном этапе (белые).

В электронной версии настоящей диссертации¹ на рис. 33 представлено видео, демонстрирующее оценку параметров геометрической модели.



Р и с. 33. Визуализация иерархического алгоритма подбора параметров.

§ 3. Эксперименты и сравнение

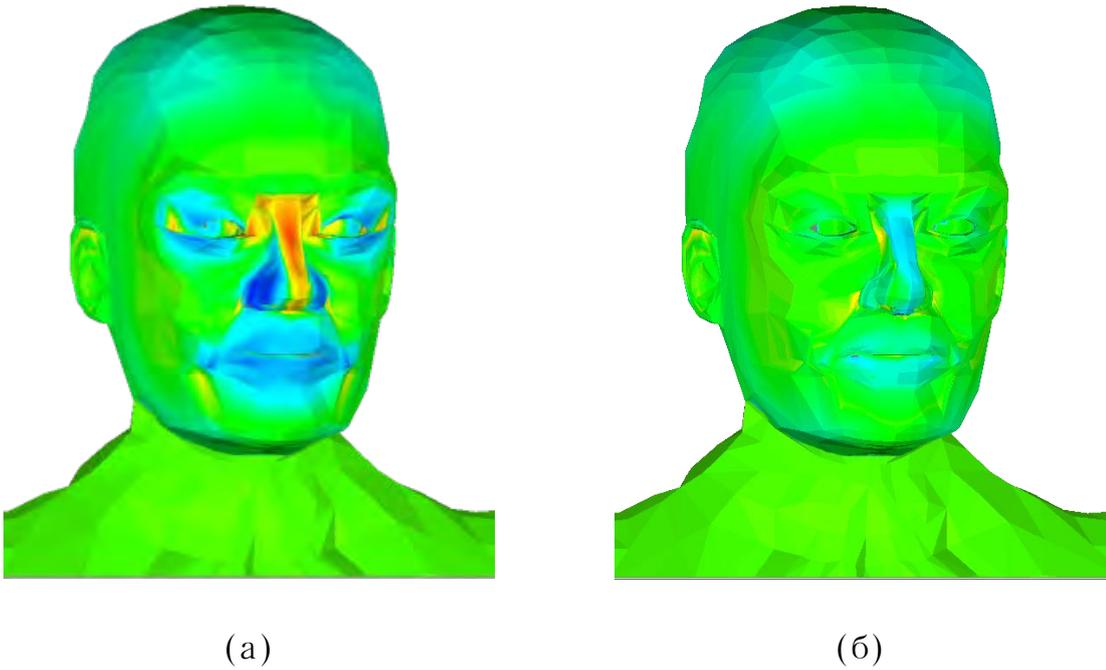
Для экспериментальной оценки из баз фотографий лиц PAL [81] и SIBC [78] были отобраны 20 пар фотографий анфас и в профиль, на которых присутствуют лица разного пола, разных возрастов (от 18 до 94 лет) и разных рас (европейско-кавказской, восточноазиатской, африканско-негроидной, индийской), см. рис. 34.

¹ <http://keldysh.ru/council/1/2015-fedyukov/diss.pdf>



Р и с. 34. Несколько пар фотографий разного пола, возраста и национальности, вошедших в выборку, на которой производилась экспериментальная оценка.

По отобранным парам фотографий были вручную смоделированы эталонные модели головы. Предложенный алгоритм сравнивался с базовым подходом для оценки многопараметрической модели с использованием генетического алгоритма (см. рис. 35).



Р и с. 35. Визуализация невязки с эталоном моделей: (а) — полученной с использованием генетического алгоритма, (б) — полученной с использованием предложенного алгоритма.

В качестве метрики было взято среднеквадратичное отклонение вершин $\mathbf{v}_{d_j^i}$ модели от эталона (т. е., тех вершин, которые входят в разметку, и, таким образом, описывают все основные черты лица). Результаты сравнения приведены на рис. 36.



Р и с. 36. Сравнение результатов работы генетического алгоритма и предложенного.

§ 4. Заключение

Проведен 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. Параметрами модели головы в простейшем случае 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. Таким образом, была поставлена задача построения не просто трехмерной полигональной мо-

дели, но, по сути, определения антропометрических параметров головы человека по фотографиям.

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 [101, 102, 103], набор ломаных разметки разбит на группы таким образом, что в первой группе содержатся контуры всего лица и минимальный набор характерных точек всех черт лица, а в остальных группах — контур только одной черты лица.

На каждом этапе минимизируется взвешенная сумма внутренней энергии, определяемой как расстояние Махаланобиса между искомыми и средне-статистическими параметрами, и внешней энергии, учитывающей невязки между ломаными разметки и между пикселями в области подбираемой черты. Минимизация осуществляется иерархическим, «грубо—точным», алгоритмом: для выполнения «грубого» этапа используется генетический алгоритм, позволяющий оптимизировать большой набор параметров и избежать попа-

дания в ближайший локальный минимум, «точные» этапы подгонки отдельных черт лица осуществляются с помощью метода Нелдера—Мида.

Сравнение было проведено на базе из 20 моделей, построенных по фотографиям лиц разного пола, возрастов и рас. В качестве метрики было взято среднеквадратичное отклонение от эталонной модели тех вершин модели, которые входят в разметку, и, таким образом, описывают все основные черты лица. Проведенное сравнение показало, что предложенный алгоритм позволяет добиться более высокой точности по сравнению с существующими аналогами.

ГЛАВА 3

ТЕКСТУРИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

§ 1. Введение

Генерация реалистичной текстуры по исходным изображениям является важным этапом построения модели головы человека. Текстура составляющая дает существенный вклад в узнаваемость человека, наравне с геометрической составляющей [104].

Среди ключевых работ по текстурированию модели головы можно выделить [105, 106, 107, 108]. Однако все работы описывают лишь базовые этапы текстурирования модели головы, в то время как в настоящей диссертационной работе предложен полный комплекс алгоритмов, позволяющий получать фотореалистичную текстуру всей головы всего по двум фотографиям, включая фотореалистичное текстурирование невидимых или недостаточно покрытых на исходных изображениях областей, таких как область за ухом, глаза, полость рта, затылок и макушка.

Предложенный алгоритм содержит 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, чему посвящены последующие параграфы.

§ 2. Генерация базовой текстуры

Продолжая использование обозначений, принятых в предыдущей главе, имеем набор параметров θ , минимизирующий отклонение контуров характерных черт лица модели \mathcal{M} от контуров на входных фотографиях. Однако в общем случае — в зависимости от заданной матрицы смещений S — значения функционалов невязки могут быть достаточно большими и получаемая модель \mathcal{M} может быть недостаточно точной для генерации по ней текстуры.

Спроецируем на плоскость фотографии все вершины полигональной модели: $\mathbf{v}_i = \mathcal{P}\mathbf{v}_i$. Напомним, что проекция вершин ломаных $\mathbf{u}_j^i = \mathbf{v}_{d_j^i}$ обозначена как $\boldsymbol{\mu}_j^i = \mathcal{P}\mathbf{u}_j^i = \mathbf{v}_{d_j^i}$. Таким образом, для генерации текстуры требуется интерполяция всех спроецированных вершин $\mathbf{v}_{d_j^i}$, не входящих в ломаные $\boldsymbol{\mu}$. Для этого в предложенном алгоритме используется аппарат тонкопластинных сплайнов, дающий гладкую деформацию фотографий при получении текстуры, а также позволяет интерполировать точки, выходящие за выпуклую оболочку вершин ломаных $\boldsymbol{\mu}$.

Точки, являющиеся вершинами ломаных $\boldsymbol{\mu}$: $\boldsymbol{\mu}_j^i = \mathbf{v}_{d_j^i}$, будем называть *контрольными точками*. Их, как было описано выше, мы перемещаем в новые координаты $\mathbf{v}'_{d_j^i}$, соответствующие распознанным антропометрическим точкам. Для удобства обозначения в данном разделе точки $\mathbf{v}_{d_k^j}$ будем обозначать просто как (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, p$, $p = \sum_{j=1}^{n_d} m_j$, а точки $\mathbf{v}'_{d_k^j}$, соответственно, как (x'_i, y'_i) . Для интерполяции остальных точек (x, y) требуется найти непрерывную векторнозначную функцию

$\mathbf{f}(x, y)$ такого вида, что $\mathbf{f}(x, y) = (x'_i, y'_i)$, а энергия перегиба сплайна была минимальна. Энергия перегиба сплайна задается следующим образом:

$$E[f(x, y)] = \iint_{\mathbb{R}^2} \left[\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy \quad (7)$$

Введем в обозначения функцию радиального вида $\phi(r) = \left(\frac{r}{\sigma}\right)^2 \ln\left(\frac{r}{\sigma}\right)$, где σ — масштабный коэффициент, характеризующий жесткость сплайна. Тогда мы имеем двумерный тонкопластинный сплайн следующего вида:

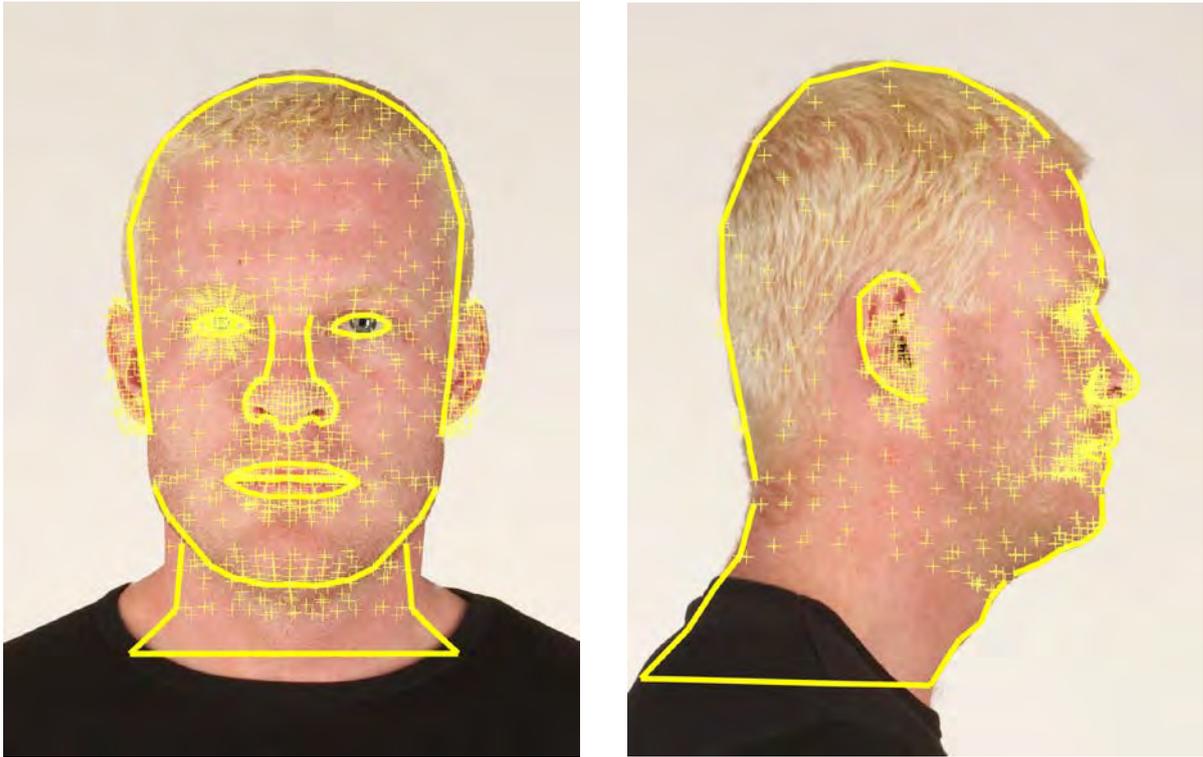
$$\mathbf{f}(x, y) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_x x + \mathbf{a}_y y + \sum_{i=1}^p \mathbf{w}_i \phi(\|(x_i, y_i) - (x, y)\|) \quad (8)$$

Учитывая условия ортогональности $\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_i = 0$ и $\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_i x_i = \sum_{i=1}^p \mathbf{w}_i y_i = 0$, мы имеем систему из $p + 3$ линейных уравнений с $p + 3$ неизвестными:

$$\begin{bmatrix} D & H \\ H^T & O_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ O_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $D_{ij} = \phi(\|(x_i, y_i) - (x_j, y_j)\|)$, i -ая строка H представляет собой контрольную точку в гомогенных координатах — $(1, x_i, y_i)$, i -ая строка W — \mathbf{w}_i , i -ая строка X — \mathbf{x}_i , $A = (\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y)$, O_3 — матрица нулей 3×3 , O_2 — матрица нулей 3×2 .

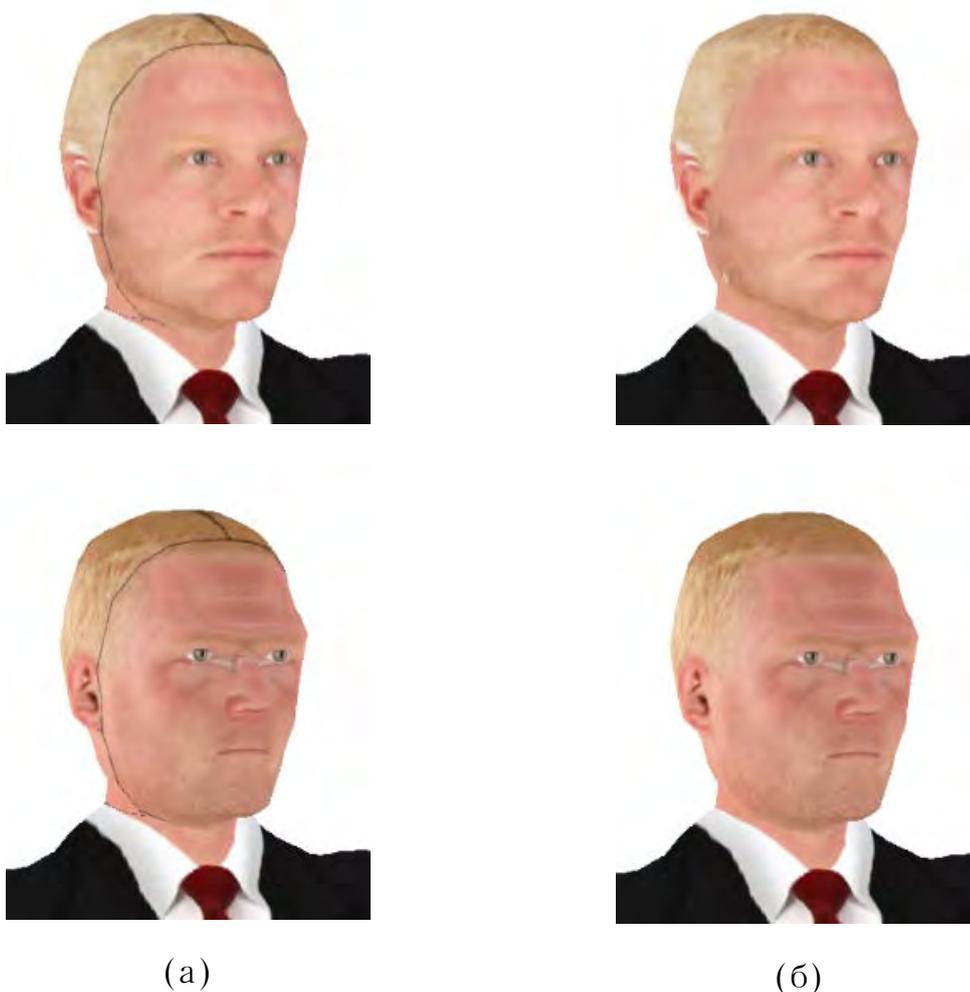
Решение этой системы дает нам искомые веса тонкопластинного сплайна \mathbf{w}_i (см. рис. 37).



Р и с. 37. Ломаные разметки μ' и точки, интерполированные с помощью тонкопластинных сплайнов.

Для генерации текстуры создается полигональная модель \mathcal{D} . В случае фотографии анфас значения элементов \mathcal{D} задаются следующим образом: $\mathbf{v}_{ix}^{\mathcal{D}} = 0$, $\mathbf{v}_{iy}^{\mathcal{D}} = \mathbf{t}_{ix}^{\mathcal{B}}$, $\mathbf{v}_{iz}^{\mathcal{D}} = \mathbf{t}_{iy}^{\mathcal{B}}$, $\mathbf{t}_{ix}^{\mathcal{D}} = \nu_{ix}$, $\mathbf{t}_{iy}^{\mathcal{D}} = \nu_{iy}$, где $\mathbf{v}_i^{\mathcal{D}} \in \mathbb{R}^n$ — компоненты вектора пространственных координат (вершин) модели \mathcal{D} , $\mathbf{t}_i^{\mathcal{B}} \in \mathbb{R}^{n_v}$, $\mathbf{t}_i^{\mathcal{D}} \in \mathbb{R}^{n_v}$ — компоненты вектора текстурных координат моделей \mathcal{B} и \mathcal{D} , соответственно, \mathcal{P} — оператор ортогонального проецирования. Полученная плоская полигональная модель визуализируется в текстуру (в данном случае, фронтальную) с помощью растеризации полигонов на графическом процессоре. Аналогичным образом генерируется текстура по фотографии в профиль.

Для устранения стыков (швов) между частями текстуры (см. рис. 38а) используется операция математической морфологии — расширение ($A \oplus B$, наращивание изображения A структурным элементом $3 \times 3 B$), модифицированная для работы на полноцветном изображении с учетом канала прозрачности (см. рис. 38б).



Р и с. 38. Морфологическое расширение полноцветного изображения с каналом прозрачности, (а) — исходные фронтальная и профильная текстуры, (б) — те же текстуры после применения морфологической операции.

Для использования на этапе смешивания текстур, полученных по фотографиям анфас и в профиль, генерируется карта нормалей \mathbf{n} модели \mathcal{C} .

Для обеспечения гладкого перехода при смешивании текстур, а также для сохранения высокой детализации и избегания дублирования элементов, видных как на фотографии анфас, так и на фотографии в профиль, осуществляется смешивание с использованием пирамиды Гаусса—Лапласа (см. рис. 39). Значение каждого пикселя маски смешивания двух изображений вычисляется следующим образом:

$$\alpha_{st} = \left| 1 - \frac{2\arccos(n_x^{st}d_x + n_y^{st}d_y)}{\pi} \right|, \quad (10)$$

где n_x^{st} и n_y^{st} — значения x - и y -компонент, соответственно, вектора нормали в точке карты (s, t) , d_x и d_y — значения x - и y -компонент, соответственно, вектора направления, относительно которого определяется отклонение нормали.

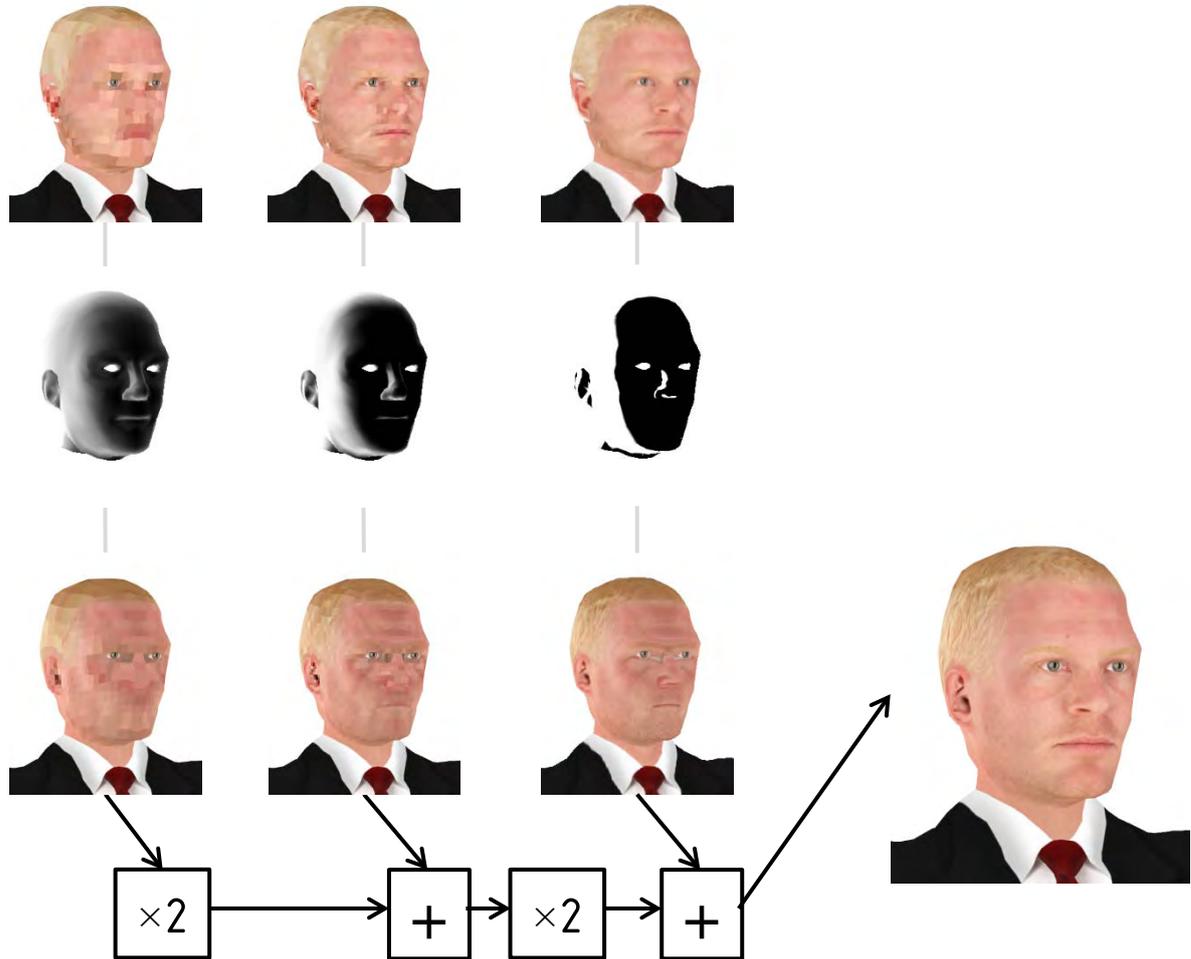
Значения в каждом пикселе результирующей текстуры вычисляются следующим образом:

$$\alpha^{\mathcal{C}} = \alpha^{\mathcal{A}} + \alpha^{\mathcal{B}}(1 - \alpha^{\mathcal{A}}), \quad (11)$$

$$c_i^{\mathcal{C}} = \begin{cases} c_i^{\mathcal{A}}, & \alpha^{\mathcal{C}} = 0 \\ \frac{c_i^{\mathcal{A}}\alpha^{\mathcal{A}} + c_i^{\mathcal{B}}\alpha^{\mathcal{B}}(1 - \alpha^{\mathcal{A}})}{\alpha^{\mathcal{C}}}, & \alpha^{\mathcal{C}} \neq 0 \end{cases}, \quad (12)$$

где $\alpha^{\mathcal{A}}$ — альфа-канал (канал прозрачности) текущего пикселя первой текстуры, $\alpha^{\mathcal{B}}$ — альфа-канал текущего пикселя второй текстуры, $\alpha^{\mathcal{C}}$ — альфа-канал текущего пикселя результирующей текстуры,

$c_i^A(c_i^B, c_i^C)$ — i -ая цветовая компонента ($i \in \{0, 1, 2\}$) текущего пикселя соответствующей текстуры.



Р и с. 39. Смешивание фронтальной и профильной текстур с помощью карты нормалей и пирамиды Гаусса–Лапласа (блоками « $\times 2$ » и « $+$ » показаны стандартные операции увеличения разрешения и добавление очередного слоя пирамиды Лапласа, соответственно).

В случае ограничения на размер текстуры (так, например, в самых распространенных на сегодняшний день приложениях виртуальной реальности OpenSim и Second Life максимальный размер текстуры головы составляет всего 512×512 пикселей) она может обрабатываться

билатеральным фильтром [109], для сглаживания крупной зернистости на участках кожи, с сохранением при этом мелких деталей на участках с высокой локальной контрастностью.

На рис. 40 приведены пары фотографий анфас и в профиль и трехмерные модели, полученные по ним с помощью предложенных алгоритмов. Стоит отметить, что в существующих работах, в том числе в перечисленных во введении к настоящей главе, результаты ограничиваются аналогичными приведенным на рис. 40, т. е. демонстрирующими качество работы с помощью моделей, близких к положению анфас. Однако подобное представление результатов является неполным и некорректным: так рис. 41 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. 40. Входные фотографии и полученные трехмерные модели.

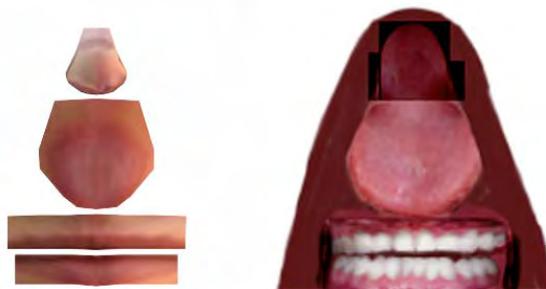
Также стоит отметить, что синтез качественной текстуры в этих областях является крайне актуальной задачей, т. к. все современные системы виртуальной реальности предполагают анимацию (в частности, моргание глаз и открывание рта). А именно затылок и макушку, но не лицо собственной трехмерной модели (называемой в современных системах виртуальной реальности аватаром) пользователь наблюдает большую часть времени пребывания в системе виртуальной реальности. Равно как и аватары других пользователей не обязательно должны быть повернуты лицом, поэтому синтез качественной текстуры указанных областей является востребованной задачей.



Р и с. 41. Текстура невидимых на исходных фотографиях областей: затылок и темя, область за ухом, глаза и полость рта. Для дополнительного удобства в электронной версии настоящей диссертации¹ слева представлено не двумерное изображение, а интерактивная трехмерная модель.

Синтез некоторых обозначенных областей осуществляется достаточно просто, синтез других — наоборот, нетривиально. Так, синтез фотореалистичной текстуры полости рта осуществляется элементарным наложением стандартной предварительно подготовленной текстуры (см. рис. 42).

¹ <http://keldysh.ru/council/1/2015-fedyukov/diss.pdf>



Р и с. 42. Фрагменты текстуры, полученной с фотографий, и предварительно подготовленной текстуры ротовой полости.

Фотореалистичному текстурированию невидимых или недостаточно покрытых на исходных изображениях областей головы посвящены следующие параграфы.

§ 3. Синтез текстуры за ухом

Подробный обзор алгоритмов синтеза невидимых на исходных изображениях областей текстуры головы есть в работе [107].

Так, постановка задачи выглядит следующим образом. Есть изображение S , внутри него есть замкнутая область Ω , которую необходимо восстановить на основе имеющихся данных — как границы $\partial\Omega$ области Ω , так и другой информации, содержащейся в изображении S . Существующие алгоритмы решения поставленной задачи можно разделить на две основные категории: диффузионные алгоритмы и алгоритмы синтеза по образцу.

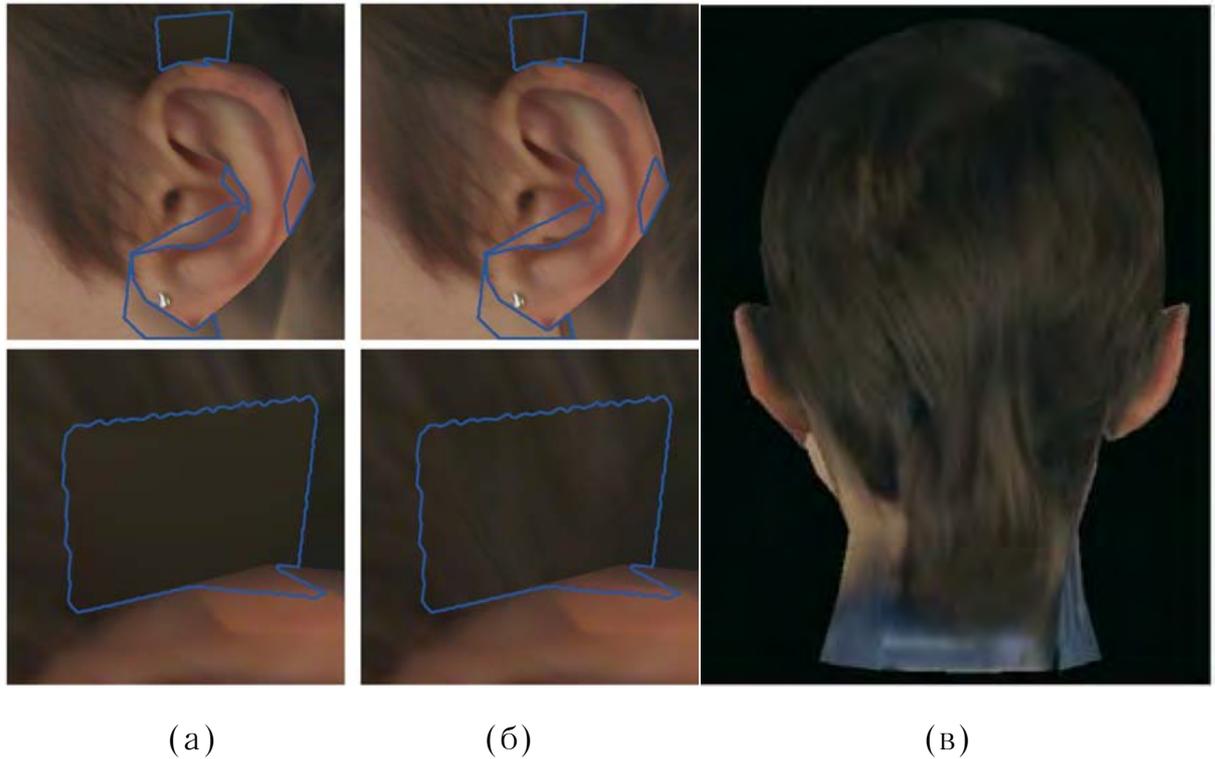
Суть алгоритмов синтеза текстуры по образцу заключается в использовании образца A для генерации текстуры B , при этом — для восприятия полученной текстуры человеком как естественной и реалистич-

ной — текстура B не должна быть периодической (т. е., она не должна быть простым двумерным массивом из повторяющихся элементов A), равно как должна обладать пространственной целостностью (т. е., не иметь заметных швов и неестественных переходов). Использование алгоритмов синтеза по образцу является оптимальным решением задачи генерации текстуры затылка и темени, поэтому подробный обзор этих алгоритмов приведен в следующем параграфе.

Диффузионные алгоритмы генерации текстуры, в свою очередь, позволяют вычислять значение каждого пикселя заполняемой области на основе окружающих эту область пикселей с использованием дифференциальных уравнений в частных производных. При таком подходе текстура реконструируется с помощью некоторой непрерывной функции, обычно сохраняющей низкочастотную информацию, но не сохраняющей высокочастотную детализацию.

Х. Ямаучи и др. [107] предложен алгоритм, объединяющий оба подхода: входное изображение раскладывается на низкочастотную и высокочастотную компоненты, после чего диффузионным алгоритмом [110] реконструируется низкочастотная составляющая заполняемой области, и алгоритмом синтеза по образцу [111] реконструируется высокочастотная составляющая (см. рис. 43).

Однако при таком подходе вся область за ухом, равно как и сами уши сзади, получаются покрыты волосами (см. рис. 43в), что, очевидно, выглядит неестественно.



Р и с. 43. Иллюстрация алгоритма реставрации, предложенного Х. Ямаучи и др. [107], (а) — результат интерполяции (реконструкция низкочастотной составляющей диффузионным алгоритмом), (б) — результат реставрации (дополнительная реконструкция высокочастотной составляющей алгоритмом синтеза по образцу), (в) — вид итоговой модели сзади.

Интересный общий подход реконструкции части изображения был предложен П. Перезом и др. [112], названный авторами *Пуассоново редактирование изображений*, позволяющий, среди прочего, осуществлять бесшовную вставку изображений. Продолжая использовать уже принятую нотацию, имеем изображение S , внутри которого есть замкнутая область Ω с границей $\partial\Omega$. Пусть f^* — это известная скалярная функция, определенная на S без внутренней области Ω и пусть f — неизвестная

скалярная функция, определенная на внутренней области Ω . Пусть также \mathbf{v} — векторное поле, определенное на Ω . Интерполянт f функции f^* на Ω определяется как решение следующей задачи минимизации:

$$\min_f \iint_{\Omega} |\nabla f - \mathbf{v}|^2 \quad \text{при } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega}, \quad (13)$$

где $\nabla \cdot = \left[\frac{\partial \cdot}{\partial x}, \frac{\partial \cdot}{\partial y} \right]$ — оператор градиента. Решением (13) является уникальное решение следующего уравнения Пуассона с краевыми условиями Дирихле:

$$\Delta f = \operatorname{div} \mathbf{v} \quad \text{на } \Omega, \quad \text{при } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega}, \quad (14)$$

где $\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ — дивергенция поля $\mathbf{v} = (u, v)$.

Три уравнения Пуассона (14) решаются независимо по трем цветовым каналам в цветовом пространстве CIE-Lab.

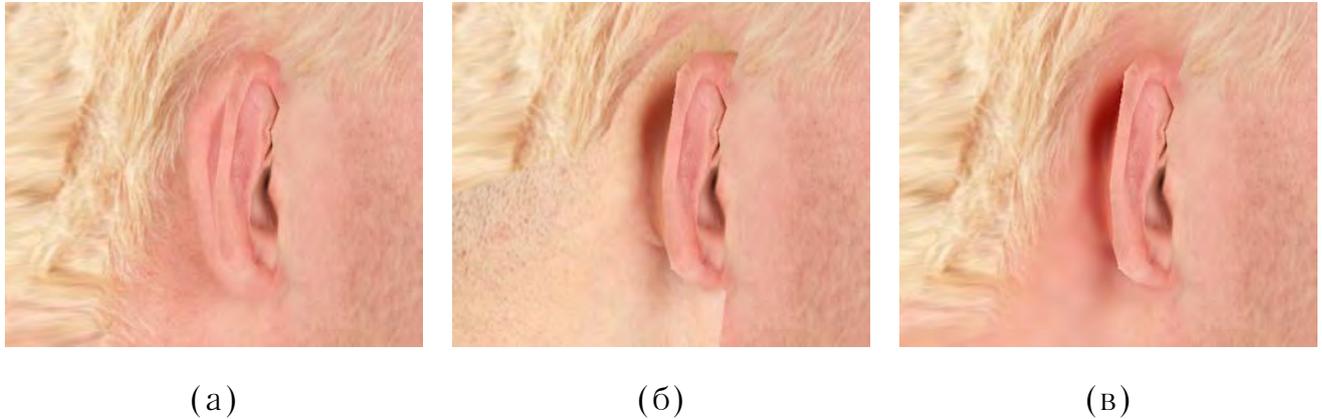
При решении задачи бесшовной вставки изображений поле \mathbf{v} принимается равным ∇g , где g — изображение, вставляемое в область Ω . Таким образом (14) превращается в следующее уравнение:

$$\Delta f = \Delta g \quad \text{на } \Omega, \quad \text{при } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega}, \quad (15)$$

Полученная система линейных уравнений решается методом Гаусса—Зейделя.

Таким образом с использованием описанного аппарата в предложенном алгоритме имеется следующее решение поставленной задачи синтеза части текстуры за ухом. Предварительно подготовлена типовая текстура за ухом. Очевидно, что при простом наложении появляется за-

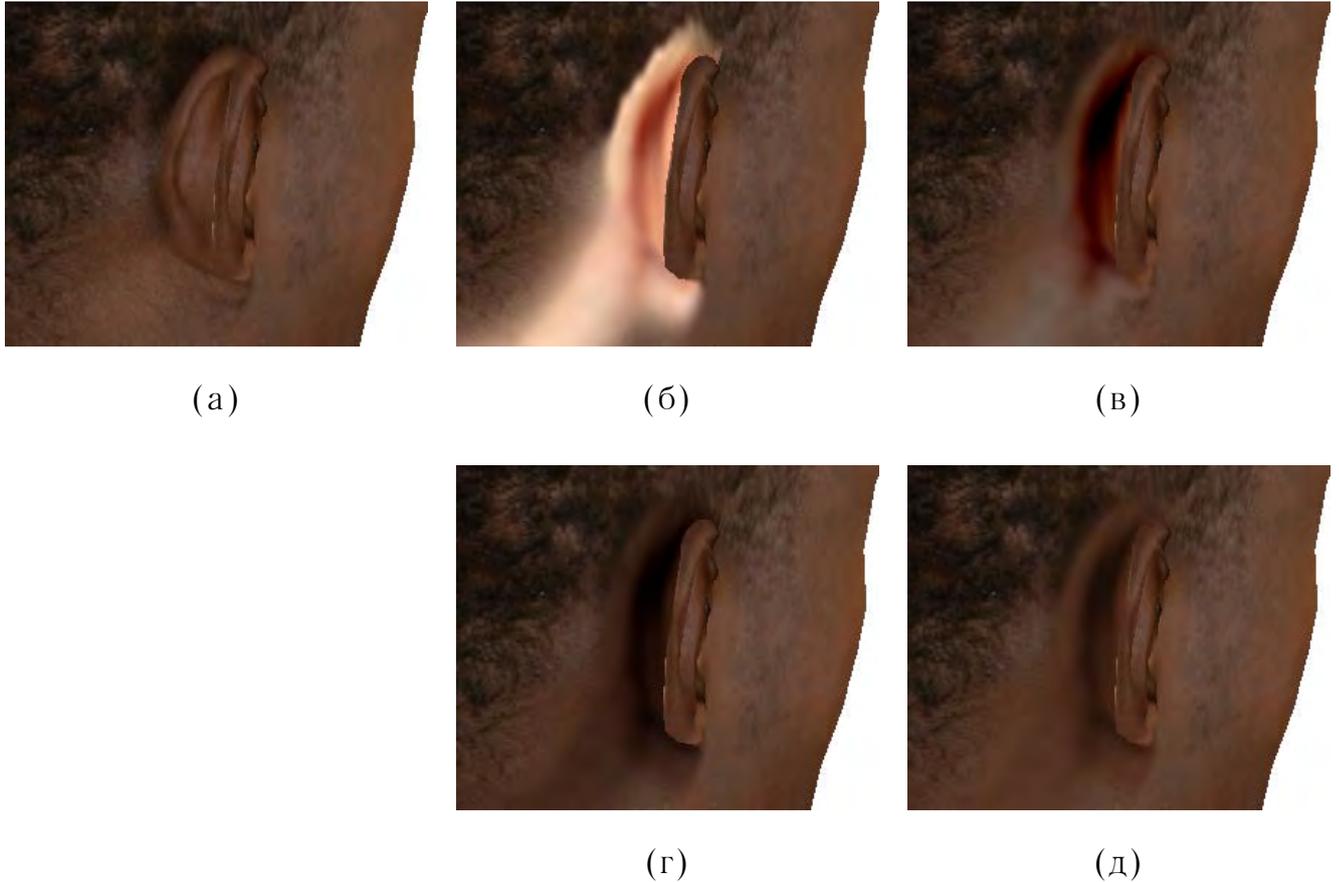
метный стык (см. рис. 44б). Решив три уравнения Пуассона (15) получаем бесшовную вставку (см. рис. 44в).



Р и с. 44. Бесшовная вставка с помощью уравнения Пуассона с краевыми условиями Дирихле, (а) — первоначальная текстура, содержащая только информацию с исходной фотографии, (б) — наложение предварительно подготовленной текстуры за ухом без маскирования и обработки, (в) — бесшовная вставка предварительно подготовленной текстуры.

Данный алгоритм, однако, не может претендовать на законченное решение, что проиллюстрировано на рис. 45. Видно, что сильный контраст между белой кожей и темной тенью сохраняется (см. рис. 45в), что выглядит неестественно на темнокожем человеке. Для адаптации вставляемого изображения g в предложенном алгоритме осуществляется перенос цвета [113, 114] следующим образом. Переводим изображение в цветовое пространство $l\alpha\beta$ [115], в котором минимизирована корреляция между цветовыми каналами. Далее необходимо перенести характеристики распределения данных в пространстве $l\alpha\beta$ с одного изображения

на другое. В рамках поставленной задачи достаточно перенести среднее значение и стандартное отклонение. Их значения рассчитываются для обоих изображений, после чего средние значения изображения A вычитаются из каждого пикселя изображения A (по всем трем каналам независимо), затем данные масштабируются с помощью соответствующих отношений стандартных отклонений, после чего к каждому пикселю изображения A прибавляются средние значения изображения B . Таким образом, цвет предварительно подготовленной стандартной текстуры за ухом (рис. 45б) адаптируется к текущей текстуре головы (рис. 45а), в результате чего получается предварительно подготовленная текстура за ухом с нужными цветовыми характеристиками (см. рис. 45г), бесшовная вставка которой дает требуемый результат (см. рис. 45д).



Р и с. 45. (а) — первоначальная текстура, содержащая только информацию с исходной фотографии, (б) — наложение предварительно подготовленной стандартной текстуры за ухом без обработки, (в) — бесшовная вставка предварительно подготовленной стандартной текстуры, (г) — предварительно подготовленная стандартная текстура за ухом после обработки алгоритмом переноса цвета, (д) — результирующая бесшовная вставка.

Результаты работы алгоритма приведены на рис. 46.



Р и с. 46. Примеры работы предложенного алгоритма на разных моделях.

§ 4. Синтез текстуры затылка и темени

Задача синтеза текстуры затылка и темени, как было отмечено в предыдущем параграфе, может быть решена с использованием алгоритма синтеза по образцу. Подробный обзор алгоритмов применительно именно к текстуре головы человека есть в уже упомянутой работе [107].

Стоит отметить классические работы А. Эфроса и др. [116, 117]. В первой работе А. Эфросом и Т. Ленгом был предложен простой алгоритм, дающий при этом высокое качество на широком классе текстур. В нем текстура генерируется попиксельно: вокруг каждого генерируемого пикселя берется область, и на входном образце происходит поиск наиболее похожей на эту область части. Развитие идеи было предложено

но А. Эфросом в соавторстве с У. Фриманом [117]: синтез текстуры уже не попиксельно, а целыми областями из исходного образца («лоскутами», как называют их авторы). Кроме существенного прироста в скорости алгоритм позволяет генерировать более целостные и естественно выглядящие текстуры. Синтез текстуры осуществляется также последовательно, область за областью. Для обеспечения большей целостности каждая новая область накладывается на уже синтезированную текстуру с перекрытием, при этом с помощью разреза графов ищется оптимальная граница наложения.

Более нетривиальный алгоритм для синтеза текстур с ограничениями был предложен Г. Раманараянаном и К. Балой [118]. Входными данными алгоритма являются не только образец для синтеза, но и разметка образца, а также разметка текстуры, которую необходимо сгенерировать. Алгоритм минимизирует функцию из двух слагаемых: невязка на текстуру очередной области образца и невязка разметок.

Другой подход к синтезу текстуры по образцу предложен Ч. Ханом и др. [119]. Здесь входными данными является не единственный образец, а многомасштабная иерархическая структура образцов, что позволяет добиться фотореалистичных естественных результатов на любых масштабах полученной текстуры.

В настоящей диссертационной работе предложено альтернативное развитие идей синтеза текстуры по образцу, позволяющее заполнять недостающие части текстур, извлекая образцы из самих текстур, обес-

печивая при этом визуально воспринимаемую естественность результата.

С помощью ранее построенной карты нормалей генерируется маска для тех областей, которые плохо видны с исходных изображений (см. рис. 48е, 48б). Далее стоит задача заполнения именно этой области внутри текстуры головы.

Для заполнения используется входная фотография в профиль (см. рис. 48а), на которой образцы для синтеза текстуры выбираются из области, обозначенной на рис. 48в.

Также по входной фотографии в профиль с использованием вейвлетов Габора генерируется карта направленности (см. рис. 48г). Вейвлеты Габора можно определить следующим образом [120]:

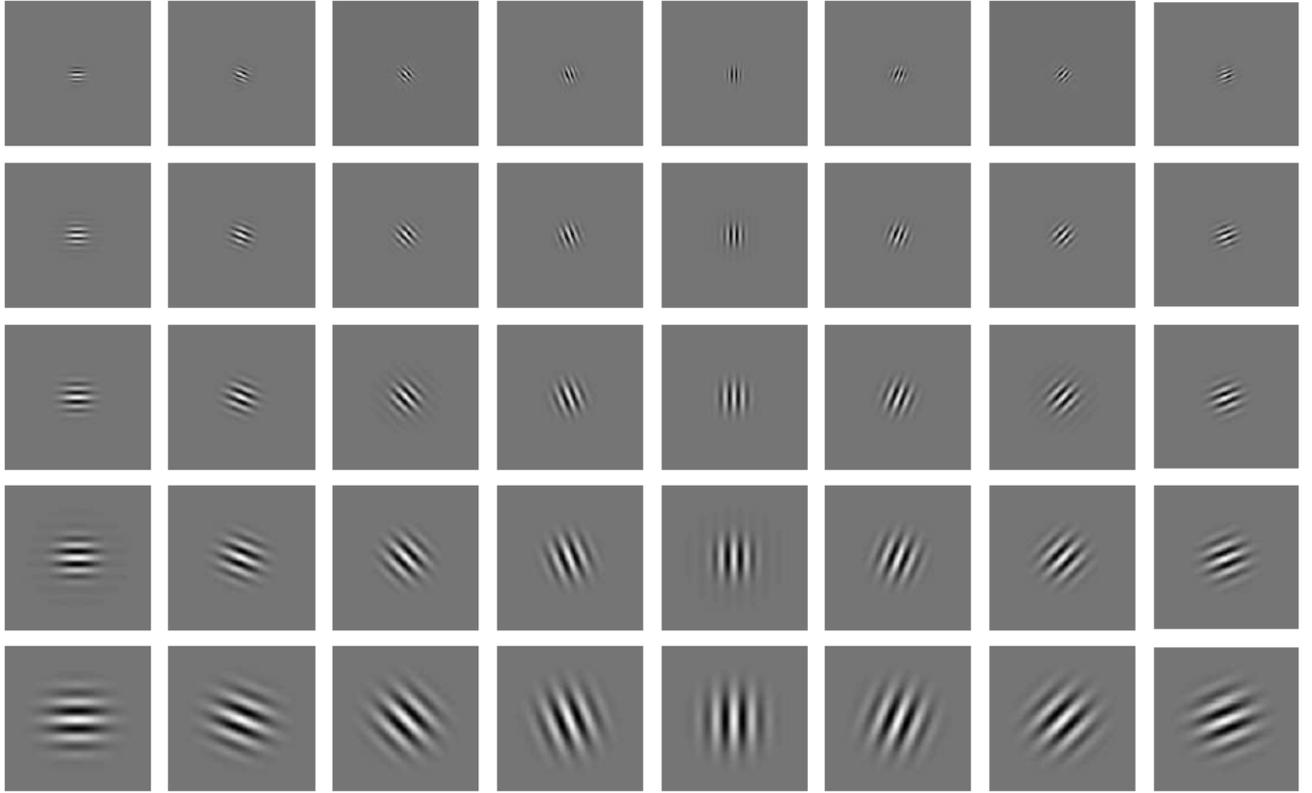
$$\psi_{\mu,\nu}(z) = \frac{\|k_{\mu,\nu}\|^2}{\sigma^2} e^{-\frac{\|k_{\mu,\nu}\|^2 \|z\|^2}{2\sigma^2}} \left[e^{ik_{\mu,\nu}z} - e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \right], \quad (16)$$

где μ и ν определяют поворот и масштаб вейвлетов Габора, соответственно, $z = (x, y)$, $\| \cdot \|$ обозначает оператор нормы, а волновой вектор $k_{\mu,\nu}$ определяется как

$$k_{\mu,\nu} = k_\nu e^{i\phi_\mu}, \quad (17)$$

где $k_\nu = k_{\max}/f^\nu$, а $\phi_\mu = \pi\mu/8$. k_{\max} — максимальная частота, а f — пространственный множитель. Вейвлеты Габора в (16) самоподобны, т.к. они могут быть сгенерированы из одного главного вейвлета масштабированием и поворотом с помощью волнового вектора $k_{\mu,\nu}$. В

настоящей работе генерируется 40 вейвлетов Габора: пяти разных масштабов $\nu \in \{0, \dots, 4\}$ и восьми ориентаций $\mu \in \{0, \dots, 7\}$ (см. рис. 47).



Р и с. 47. Действительная часть вейвлетов Габора при 5 разных коэффициентах масштабирования и поворота, $\sigma = 2\pi$, $k_{\max} = \pi/2$, $f = \sqrt{2}$ (иллюстрация из работы [121]).

Свертка изображения с помощью семейства вейвлетов Габора (16) осуществляется следующим образом. Пусть $I(x, y)$ — изображение, переведенной в градации серого. Свертка изображения I с помощью вейвлета Габора $\psi_{\mu,\nu}$ определяется следующим образом:

$$O_{\mu,\nu}(z) = I(z) * \psi_{\mu,\nu}(z), \quad (18)$$

где $z = (x, y)$, $*$ обозначает оператор свертки, а $O_{\mu,\nu}(z)$ — результат свертки с вейвлетом Габора поворота μ и масштаба ν . Таким обра-

зом, множество $\mathcal{S} = \{O_{\mu,\nu}(z): \mu \in \{0, \dots, 7\}, \nu \in \{0, \dots, 4\}\}$ является представлением изображения $I(z)$ с помощью вейвлетов Габора. Применяя теорему о свертке из уравнения (18) с помощью быстрого преобразования Фурье можно получить:

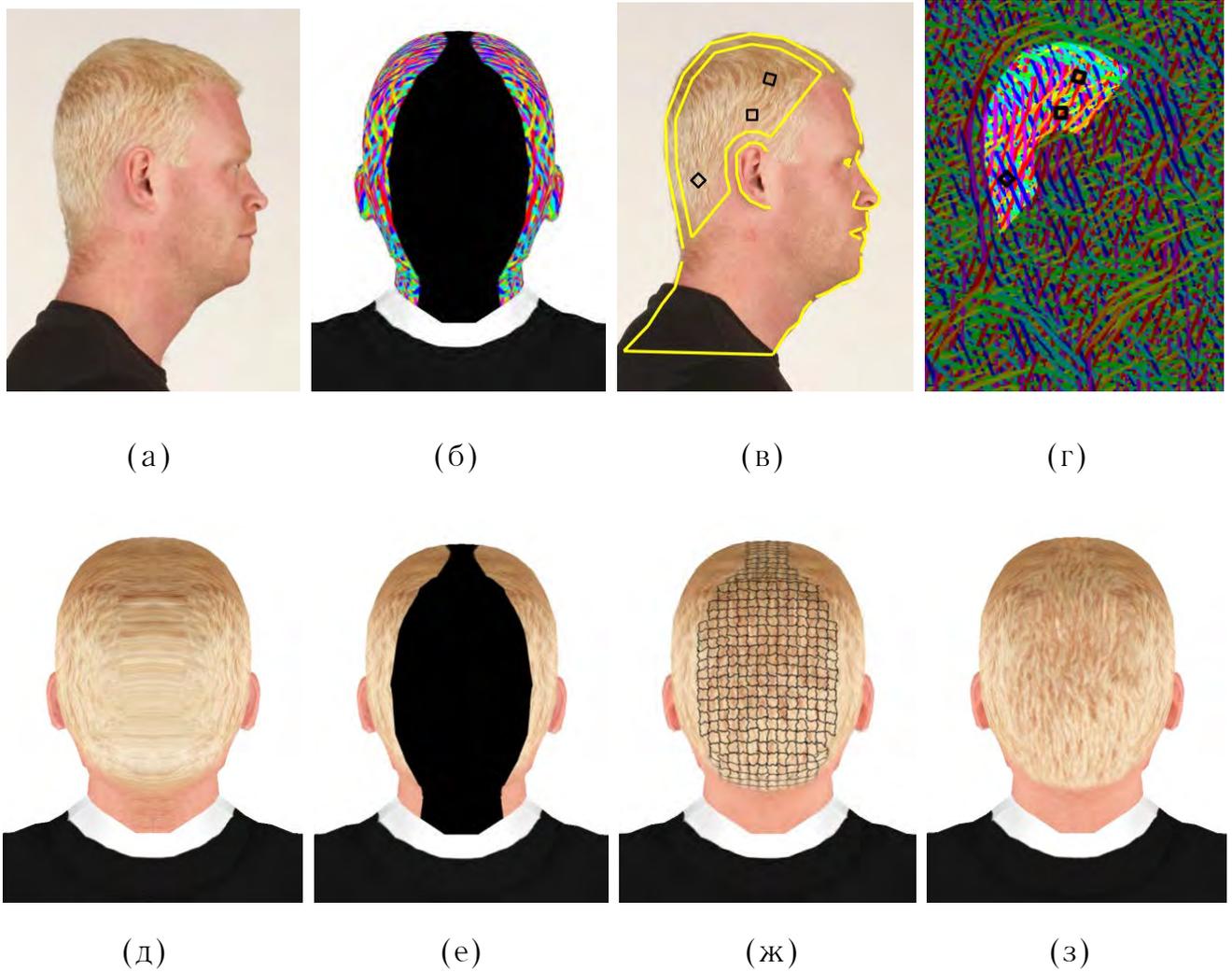
$$\mathfrak{F}\{O_{\mu,\nu}(z)\} = \mathfrak{F}\{I(z)\}\mathfrak{F}\{\psi_{\mu,\nu}(z)\}, \quad (19)$$

$$O_{\mu,\nu}(z) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}\{I(z)\}\mathfrak{F}\{\psi_{\mu,\nu}(z)\}\}, \quad (20)$$

где \mathfrak{F} и \mathfrak{F}^{-1} — преобразование Фурье и обратное преобразование Фурье, соответственно.

Свертка с помощью вейвлетов Габора осуществляется для двух изображений: входной фотографии в профиль (см. рис. 48г) и имеющейся текстуры головы (см. рис. 48б).

Синтез текстуры происходит последовательно, область за областью, каждая новая область накладывается на уже сгенерированную текстуру с перекрытием. Поиск оптимальных образцов осуществляется из части фотографии в профиль, обозначенной на рис. 48в, причем для обеспечения фотореалистичных результатов при минимальных входных данных в предложенном алгоритме поиск образцов происходит под разными углами, как показано там же, на рис. 48в. Мера сходства для поиска оптимальных образцов определена как $m = \omega_c c + \omega_d d$, где c — невязка карт цвета, d — невязка карт направленности, ω_c и ω_d — соответствующие эмпирически подобранные веса.



Р и с. 48. (а) — входная фотография в профиль, использованная для генерации текстуры головы, (б) — маскированная текстура, полученная в результате свертки с вейвлетами Габора, (в) — входная фотография с отмеченной областью, из которой берутся образцы для синтеза текстуры, (г) — свертка входной фотографии вейвлетами Габора (область, используемая для синтеза текстуры, также выделена), (д) — первоначальная текстура головы, (е) — маскированная текстура головы, (ж) — синтезированная текстура затылка и темени с визуализацией границ областей, (з) — синтезированная текстура затылка и темени.

Результаты работы предложенного алгоритма приведены на рис. 49.



Р и с. 49. Примеры синтезированных текстур.

§ 5. Синтез текстуры глаза

Как отмечено в обзоре области трехмерного моделирования глаза [85], исследований по моделированию частей лица достаточно мало. Для синтеза текстуры глаза были предложены диффузионные алгоритмы [122], что, очевидно, дает размытую текстуру в невидимых на исходных фотографиях областях и является неприемлемым для решения поставленной задачи. Ранние работы по синтезу текстуры глаза по образцу [123, 106], как показано на иллюстрациях в самих же работах, дают результаты достаточно низкого качества. Высококачественных результатов

с помощью алгоритмов синтеза по образцу добились Ж. Вей и др. [124]. Однако алгоритмы синтеза по образцу имеют ограничения: так, на фотографиях, где достаточно много бликов (как, например, на первой фотографии на рис. 51) для синтеза по образцу недостаточно качественных данных и результатом работы является текстура с одним и тем же повторяющимся бликом, что выглядит неестественно [122].

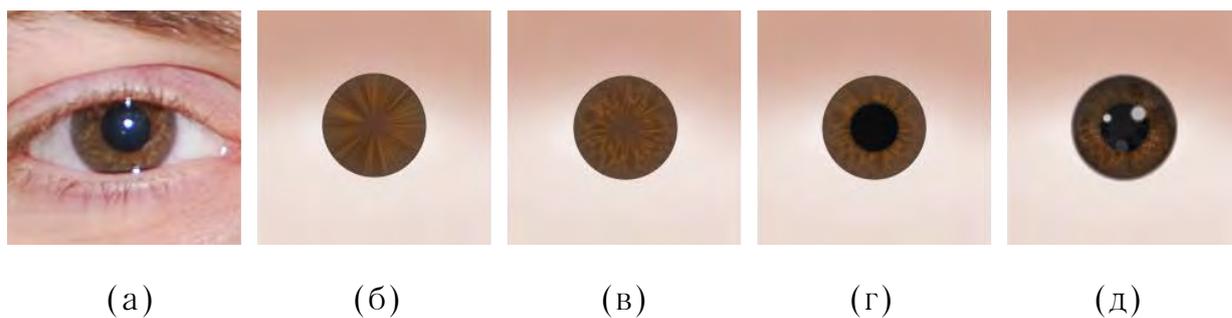
В рамках настоящей диссертационной работы предложен алгоритм полного многослойного синтеза текстуры глаза. Данный алгоритм не требует большого образца для синтеза и работает на любых фотографиях лица, удовлетворяющих общим требованиям, описанным в § 3 главы 1 (см. рис. 13).

Проблемой алгоритмов полного многослойного синтеза текстуры глаза является отсутствие фотореалистичности, полученная текстура выглядит неестественно [125, 126, 127]. Соответственно, в рамках настоящей диссертационной работы стояла задача разработать алгоритм получения синтетической текстуры глаза, который а) дает реалистичные, естественно воспринимаемые результаты; б) кроме того, синтезированная текстура должна соответствовать входной фотографии; в) алгоритм работает полностью автоматически, без участия пользователя.

Стоит отметить, что для получения входных данных о внешнем виде глаза нам не требуется дополнительных алгоритмов [128], т. к. предложенные алгоритмы обнаружения антропометрических точек (см. § 3 главы 1) и алгоритмы подгонки разметки к найденным антропометриче-

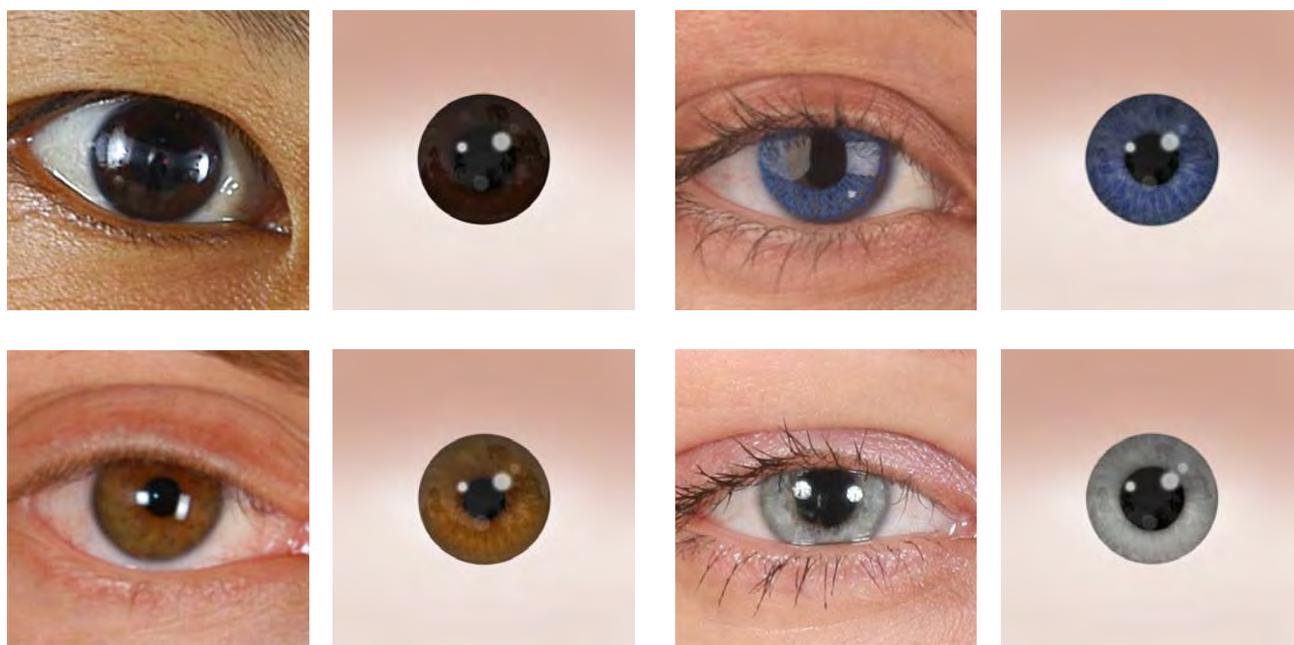
ским точкам (см. § 2 главы 2) позволяют точно оценивать положение и контуры глаз.

Таким образом, предложенный алгоритм выглядит следующим образом. На первом этапе производится анализ области глаза на фотографии и определение геометрических и цветовых характеристик глаза, на втором этапе производится синтез многослойной текстуры глаза. К характеристикам, определяемым на первом этапе, относятся центры и радиусы зрачка и радужки, оттенок белка, два преобладающих оттенка внешней части радужки и два преобладающих оттенка внутренней части радужки, определяемые как пики гистограмм октантов, соответственно, внешнего и внутреннего колец радужки. На втором этапе на основе оцененных характеристик синтезируется текстура. Основными шагами этапа являются изменение оттенка текстурного слоя белка, построение двух радиальных градиентов на основе определенных на первом этапе цветов, сложение градиентов по маске, полученной с помощью шума Перлина (см. рис. 50б, 50в), добавление слоя зрачка, добавление слоев бликов с помощью проецирования слоев, добавление внутренних тени и отсвета с помощью перекрытия слоев (см. рис. 50г, 50д, все используемые формулы наложения слоев, в том числе проецирования и перекрытия, приведены в таблице 1 параграфа 2 главы 4).



Р и с. 50. (а) — часть входной фотографии, (б) — радиальные градиенты без применения шума Перлина, (в) — радиальные градиенты, сложенные по маске, полученной с помощью шума Перлина, (г) — текстура глаза со зрачком, (д) — финальная текстура.

Результаты работы предложенного алгоритма приведены на рис. 51.

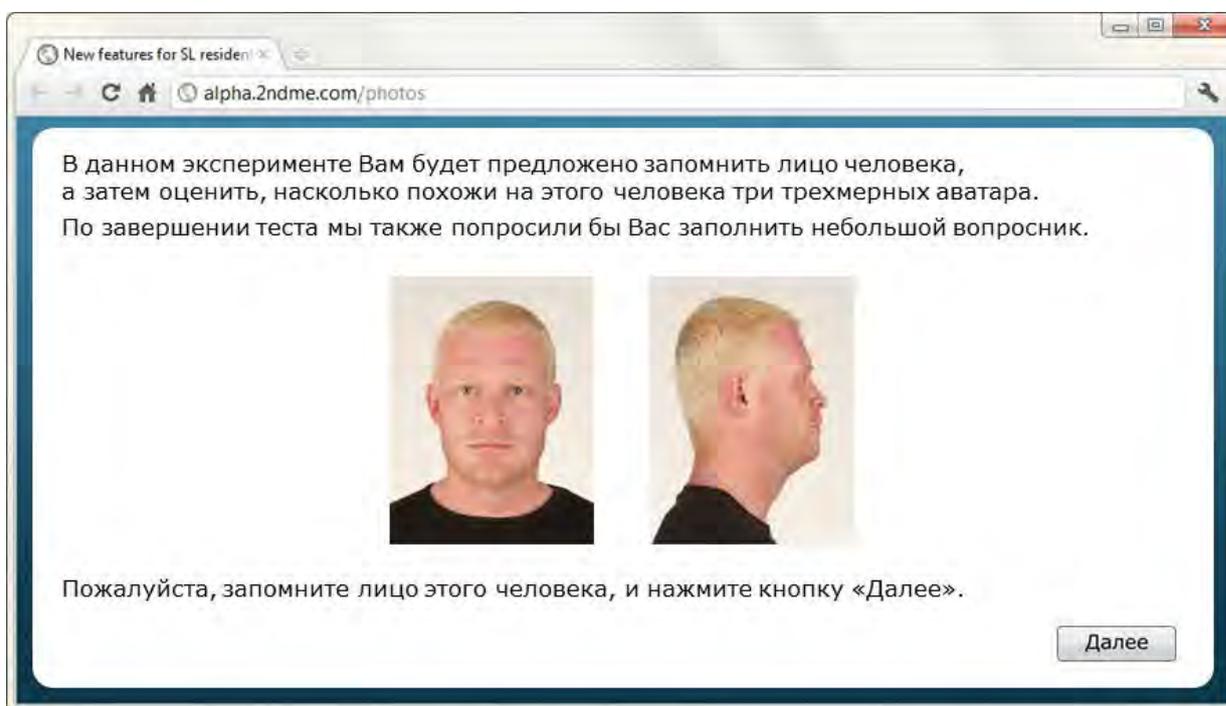


Р и с. 51. Примеры синтезированных текстур глаза.

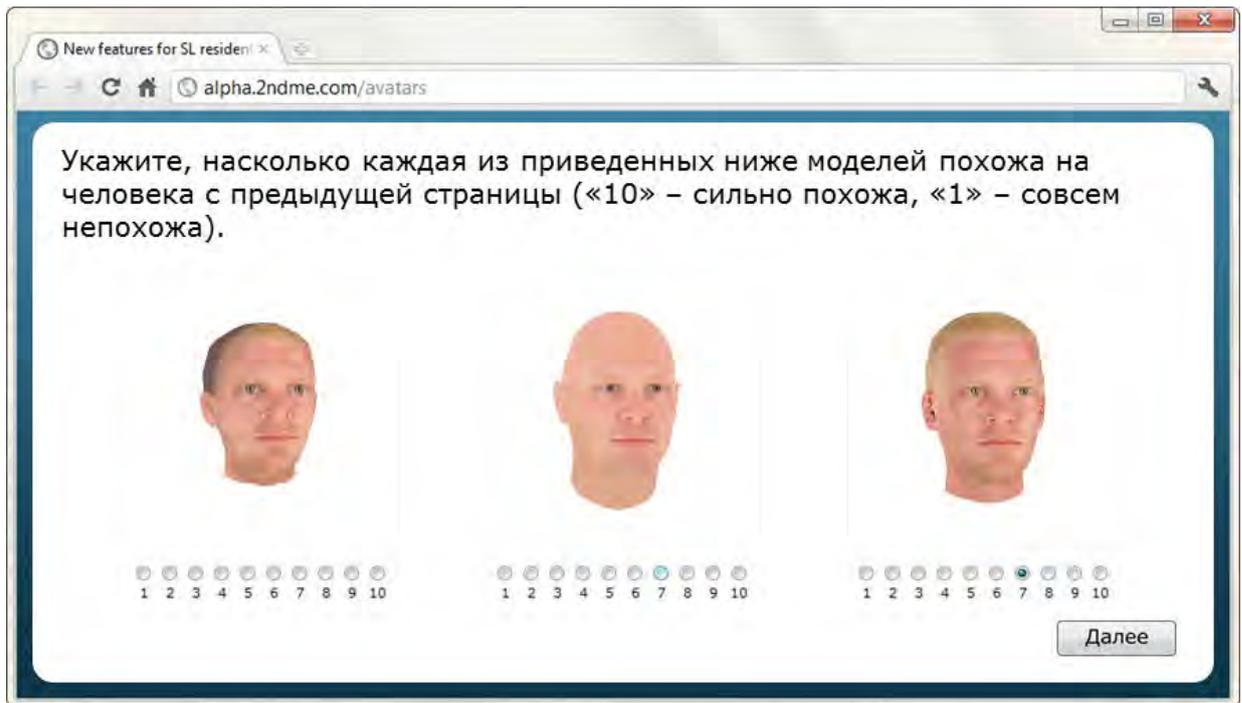
§ 6. Эксперименты и сравнение

Для оценки воспринимаемого качества был разработан и проведен сравнительный эксперимент. Тестирование производилось на базах фотографий лиц PAL Face DB [81] и SIBC Human Photo References DB [78], содержащих цветные фотографии анфас и в профиль лиц разных рас и национальностей в возрасте от 18 до 94 лет (см. рис. 34, 40). 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, разработанный американской компанией CyberExtruder Inc., работающий с той же моделью LAD [97], и FaceGen, разработанный канадской компанией 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 (см. рис. 52а), затем, на следующем экране, участнику демонстрировались выстроенные в случайном порядке текстурированные модели, построенными тремя сравниваемыми алгорит-

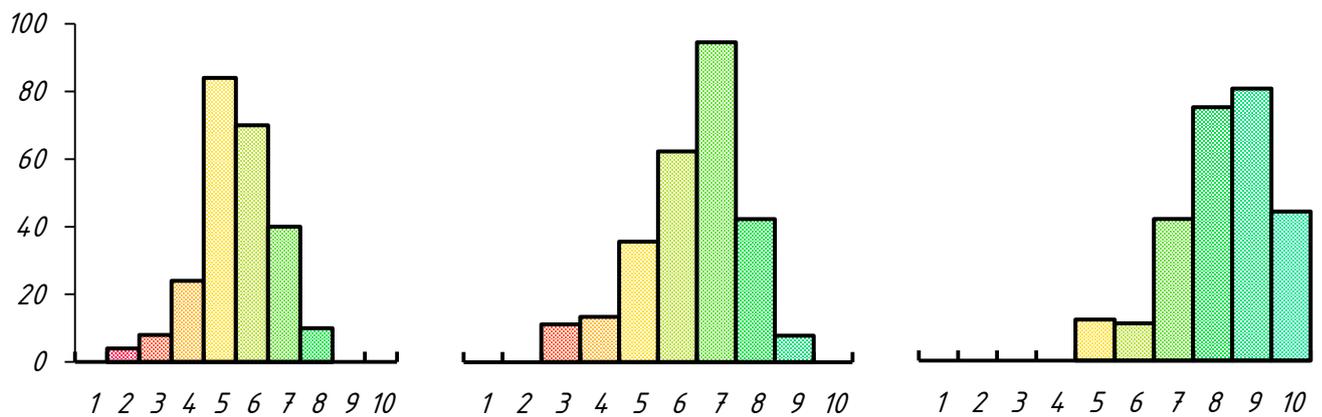
мами, с возможностью поставить каждой модели оценку от 1 до 10 (см. рис. 52б). 17 участникам-добровольцам в возрасте от 16 до 48 лет было предложено оценить 20 наборов текстурированных моделей. Усредненная оценка AvMaker составила 5,41, FaceGen — 7,69, предложенного метода — 9,08, что демонстрирует существенное превосходство предложенного алгоритма над существующими. Категориальные гистограммы голосов приведены на рис. 52в—52д.



(a)



(б)



(в)

(г)

(д)

Р и с. 52. (а), (б) — снимки экрана сравнительного эксперимента для оценки воспринимаемого качества. (в)—(д) — рейтинг в виде категориальных гистограмм (по оси абсцисс отложены оценки от 1 до 10, по оси ординат — количество голосов): (в) — CyberExtruder, (г) — FaceGen, (д) — предложенный комплекс алгоритмов.

§ 7. Заключение

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 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 основании проведенного обзора алгоритмов синтеза текстур, которые можно разделить на две основные категории — диффузионные алгоритмы и алгоритмы синтеза по образцу, предложены новые алгоритмы, сочетающие преимущества обоих подходов.

Для решения задачи синтеза текстуры за ухом предложен новый алгоритм, осуществляющий перенос характеристик цвета с имеющейся текстурой на предварительно подготовленную типовую текстуру за ухом

и ее бесшовную вставку в итоговую текстуру с помощью решения уравнений Пуассона с краевыми условиями Дирихле.

Для решения задачи генерации текстуры затылка и темени предложен новый алгоритм синтеза текстуры: синтез происходит последовательно, область за областью, каждая новая область накладывается на уже сгенерированную текстуру с перекрытием. Поиск оптимальных образцов происходит под разными углами на соответствующей области фотографии в профиль. Мера сходства для поиска оптимальных образцов определена как взвешенная сумма, учитывающая невязка цветовой информации, а также невязку направленности, рассчитываемую с использованием вейвлетов Габора.

По результатам проведенного обзора существующих алгоритмов синтеза текстуры глаза, и в первую очередь — радужки, предложен новый алгоритм полного многослойного синтеза текстуры глаза, который дает реалистичные, естественно воспринимаемые результаты, обеспечивает соответствие синтезированной текстуры входной фотографии, работает автоматически, без участия пользователя.

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. Сравнение было проведено методом субъективного тестирования, для чего было выбрано 20 пар фотографий, по каждой паре были построены модели и сгенерированы текстуры. 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, построенные тремя сравниваемыми алгоритмами, с возможностью поставить каждой модели оценку. 17 участникам-добровольцам было предложено оценить полученные текстурированные модели. Построенные в результате эксперимента категориальные гистограммы голосов показывают, что предложенный комплекс алгоритмов существенно превосходит аналоги.

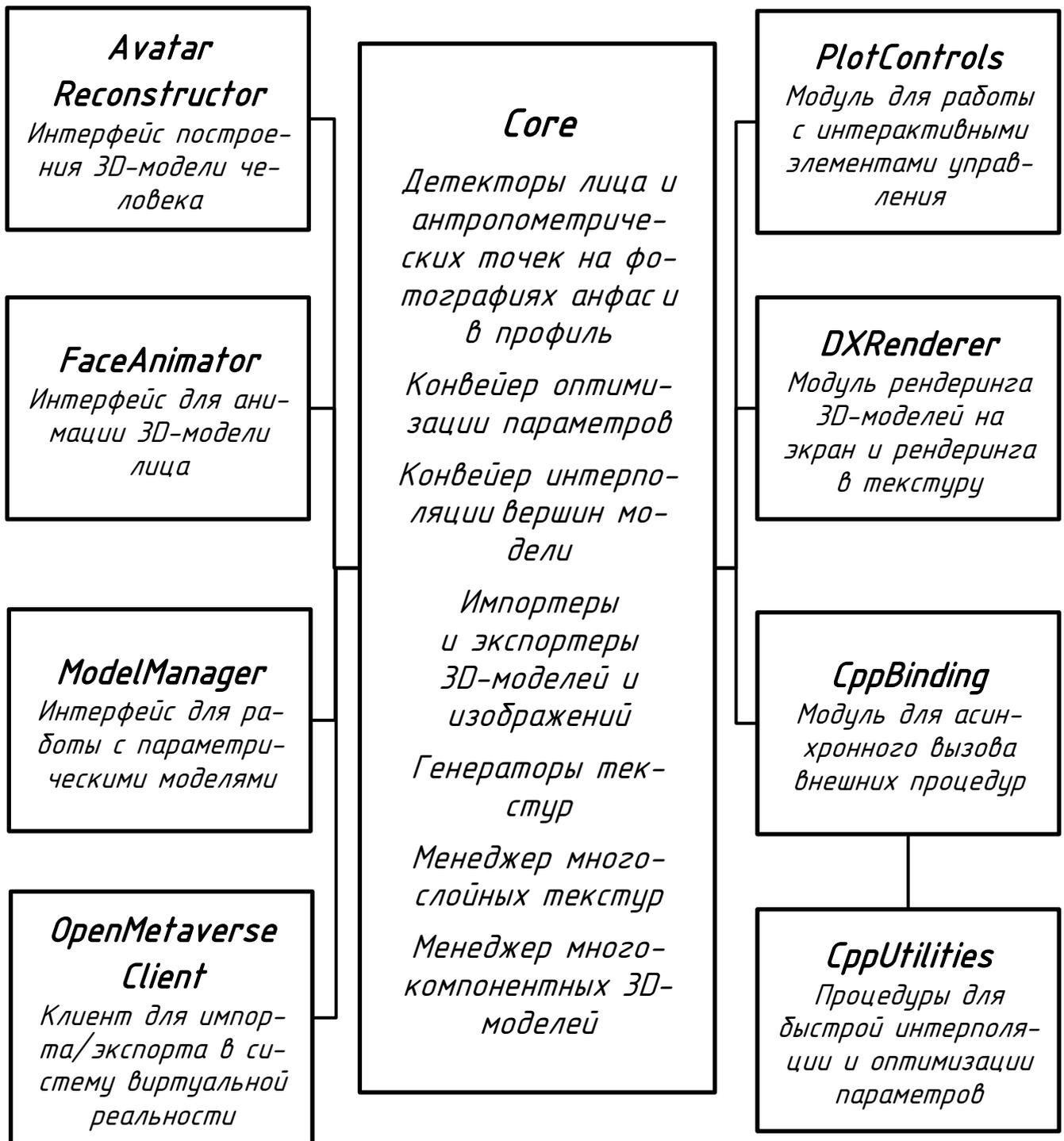
ГЛАВА 4

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

§ 1. Организация программного комплекса

Все предложенные алгоритмы реализованы в единой программной системе построения трехмерной модели человека по изображениям. Разработанная система, не требующая большого объема взаимодействия с пользователем, позволила создавать фотореалистичные трехмерные модели быстрее и качественнее, по сравнению с существующими аналогами. Помимо алгоритмов, описанных в предыдущих главах, для повышения эффективности и интеграции с существующими системами был предложен ряд технических решений, описанных в данной главе.

Основные реализованные программные модули представлены на рис. 53. Весь основной функционал реализован в ядровом модуле Core, весь логически обособленный функционал вынесен в отдельные модули (PlotControls, DXRenderer и другие), каждый из этих модулей компилируется в динамически подключаемую библиотеку.



Р и с. 53. Основные модули разработанной программной системы.

Помимо основной программной системы (исполняемый модуль *Avatar Reconstructor*) реализован ряд дополнительных исполняемых модулей, использующих тот же функционал ядра, но предоставляющих поль-

зователю другой интерфейс. Так, модуль Model Manager дает возможность работать с параметрическими моделями, позволяя визуализировать связанные с каждым параметром вершины, вектора сдвига этих вершин и т. п., модуль Face Animator позволяет пользователю осуществлять полностью автоматическое «оживление» фотографии, функционал модуля Open Metaverse Client облегчает работу с системами виртуальной реальности, модуль Avatar Reconstructor for 3ds Max позволяет создавать трехмерные модели по фотографиям внутри распространяемого пакета 3ds Max. Подробно каждый модуль описан в последующих параграфах настоящей главы.

Программный комплекс написан на языках программирования на C#, C++, HLSL, LSL [129] и MaxScript [130] и содержит в сумме более 80 тысяч строк кода.

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).

Диаграмма компонентов модуля Avatar Reconstructor показана на рис. 54.

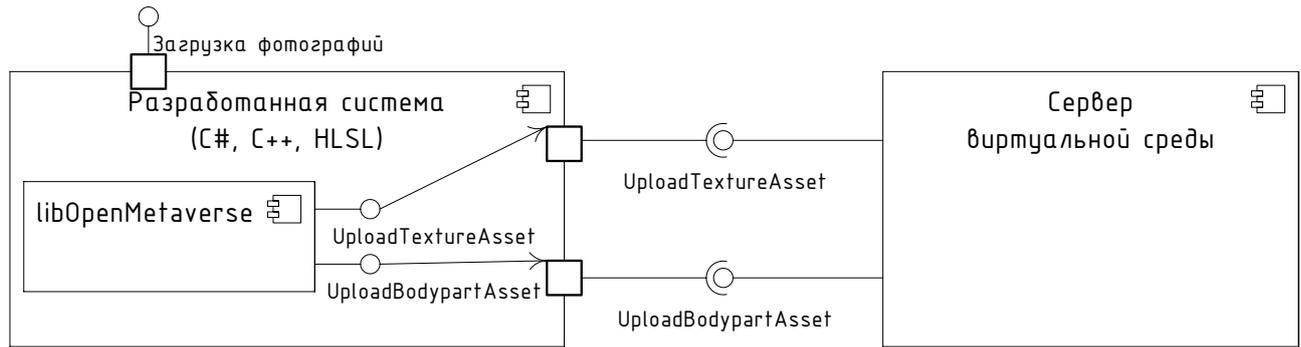
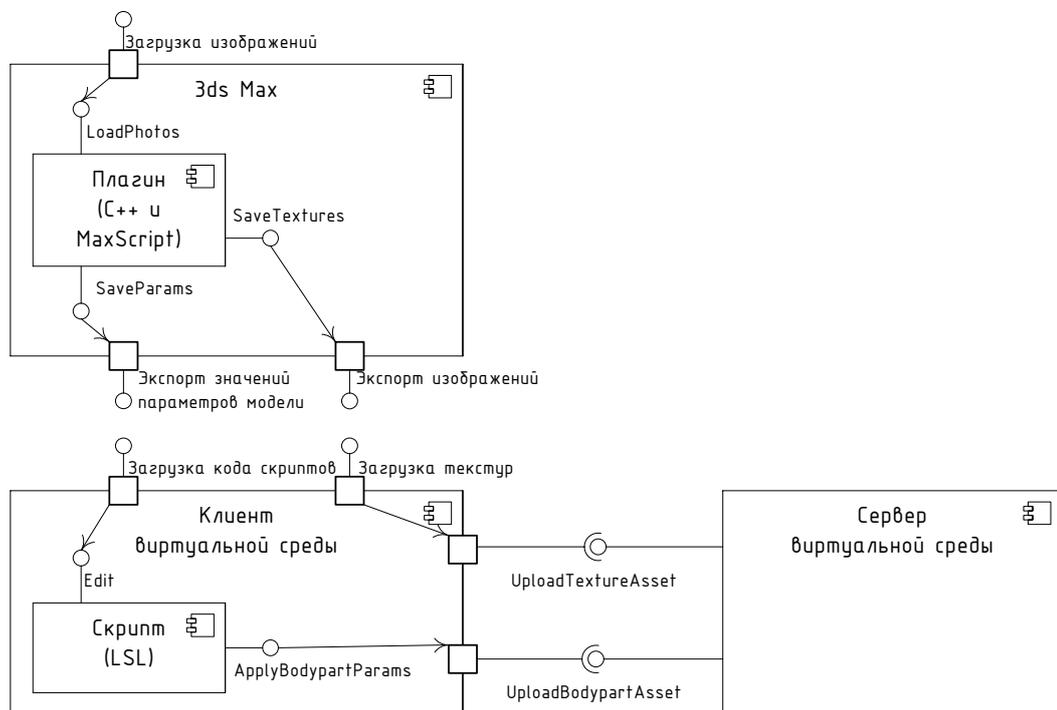


Рис. 54. Диаграмма компонентов Avatar Reconstructor на языке UML 2.

Диаграмма компонентов, а также схема работы системы по ГОСТ 19.701—90 модуля Avatar Reconstructor for 3ds Max показана на рис. 55.



(а)

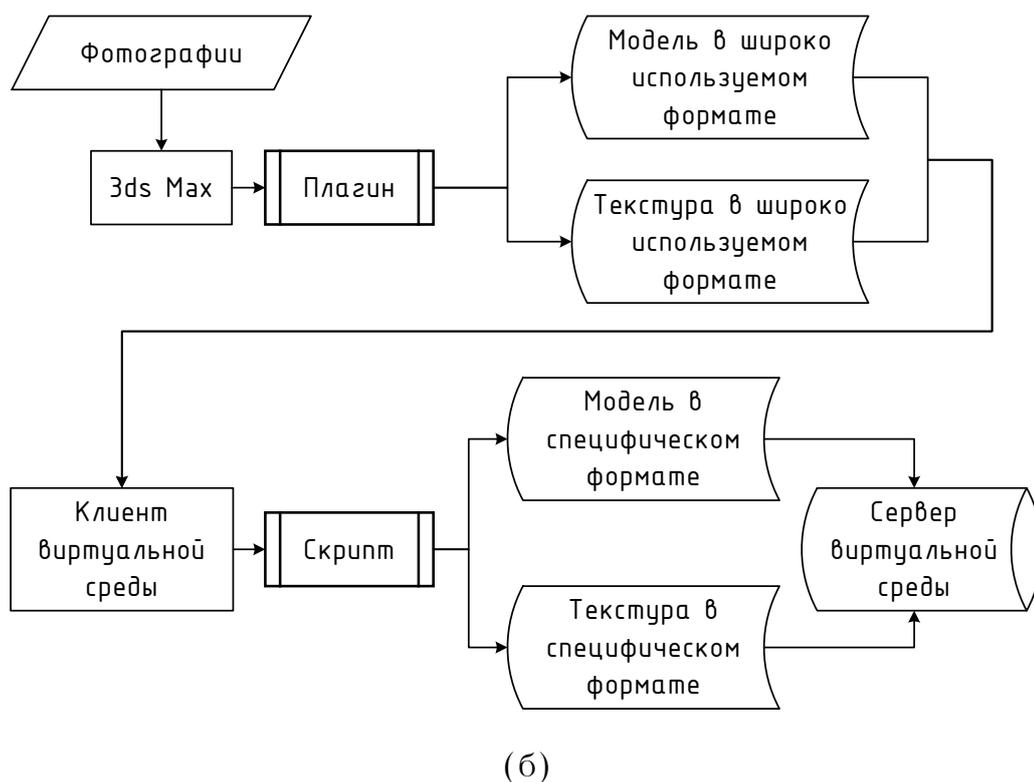
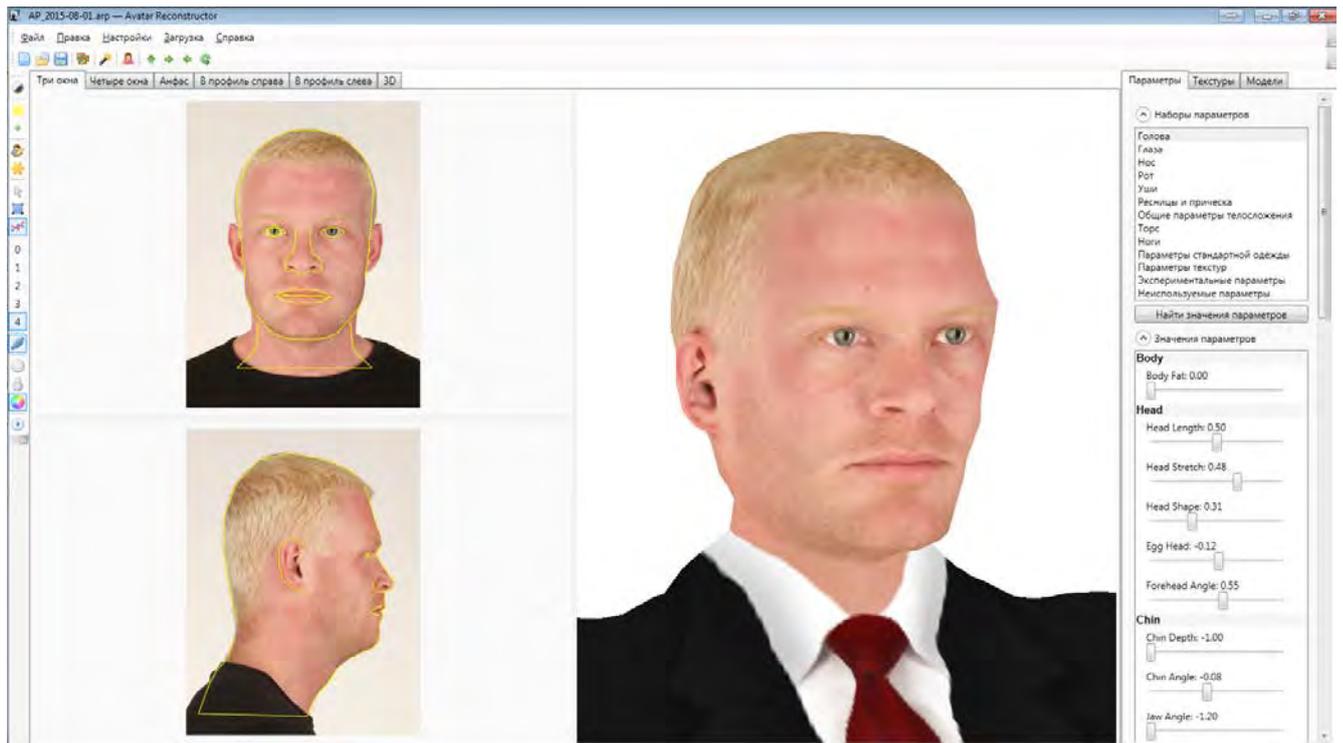


Рис. 55. (а) — диаграмма компонентов Avatar Reconstructor for 3ds Max, (б) — схема работы системы, оформленная в соответствии с ГОСТ 19.701—90.

§ 2. Исполняемые модули

Основным программным модулем разработанного программного комплекса является Avatar Reconstructor. Его интерфейс представлен на рис. 56.



Р и с. 56. Интерфейс разработанной программной системы.

Описание элементов управления модуля приведено ниже.

Строка меню

Файл

Новый проект...

Ctrl+N

Открывает мастер нового проект, позволяющий создать новый проект как с нуля, так и по шаблону, включающему в себя все текстуры, маски и редактирующие слои (см. рис. 57), а затем выбрать фотографии для построения модели (см. рис. 58).

Открыть проект...

Ctrl+O

Сохранить проект

Ctrl+S

Сохранить проект как...

Ctrl+Shift+S

Сохранить зашифрованный проект как...

Позволяет сохранить зашифрованный файл проекта, который можно

открыть и посмотреть на любом компьютере, где установлен Avatar Reconstructor, но такой проект невозможно проэкспортировать.

Импорт

Параметры из XML...

Позволяет загрузить значения параметров модели в формате XML (полученного из OpenSim, Second Life либо в самом Avatar Reconstructor).

Модель из LLM...

Позволяет загрузить трехмерную модель в формате LLM (полученную из OpenSim или Second Life).

Модель из OBJ...

Позволяет загрузить трехмерную модель в формате OBJ.

Модель из COLLADA...

Позволяет загрузить трехмерную модель в формате COLLADA.

Анимация из BVH...

Позволяет загрузить анимацию либо статичную позу из распространенного формата BVH.

Экспорт

Параметры в XML...

Позволяет экспортировать значения параметров в формате XML.

Текстуры в PNG...

Позволяет экспортировать все сгенерированные текстуры в PNG-файлы.

Модель в OBJ...

Позволяет экспортировать трехмерную модель в формате OBJ (генерируются файлы OBJ, MTL и PNG).

Модель в COLLADA...

Позволяет экспортировать трехмерную модель в формате COLLADA (генерируются файлы DAE и PNG).

Последние файлы

Список десяти последних открываемых проектов

Правка

Отменить Ctrl+Z

Повторить Ctrl+Y

Фотографии... Ctrl+H

Открывает окно управления фотографиями (загрузка, экспорт, поворот, см. рис. 58).

Подгонка разметки Ctrl+M

Осуществляет обнаружение лиц на загруженных фотографиях, обнаружение антропометрических точек на этих лицах и подгонку разметки трехмерной модели к этим точкам.

Сброс разметки

Осуществляет сброс разметки в состояние по умолчанию. Может быть полезно, если пользователь произвел некорректные манипуляции с элементами разметки на фотографиях вручную.

Генерация всех текстур F5

Генерирует все текстуры модели, либо регенерирует их заново, если все либо часть текстур уже были сгенерированы кнопкой на правой па-

нели.

Переименовать проект...

Позволяет переименовать текущий проект.

Настройки

Генерировать текстуры высокого разрешения

По умолчанию включено.

Генерация текстур высокого разрешения (2048×2048 пикселей) может быть избыточной для некоторых приложений виртуальной реальности, поэтому, при необходимости, эту настройку можно отключить.

Интерполировать с помощью тонкопластинных сплайнов

По умолчанию включено.

Если галочку снять, интерполяция будет производиться с помощью свободных преобразований Дирихле, что дает более низкое качество, но может быть интересно в исследовательских целях.

Использовать пирамиду Гаусса—Лапласа

По умолчанию включено.

Если галочку снять, пирамида Гаусса—Лапласа использоваться не будет, что дает более низкое качество, но может быть интересно в исследовательских целях.

Выставить камеру анфас

Выставить камеру в профиль справа

Выставить камеру в профиль слева

Сбросить камеру в положение по умолчанию

Язык / Language

Русский

English

Загрузка

Модель и текстуры в OpenSim Ctrl+I

Загрузка параметров модели и текстур в приложение виртуальной реальности OpenSim (см. рис. 59).

Модель и текстуры в Second Life Ctrl+F

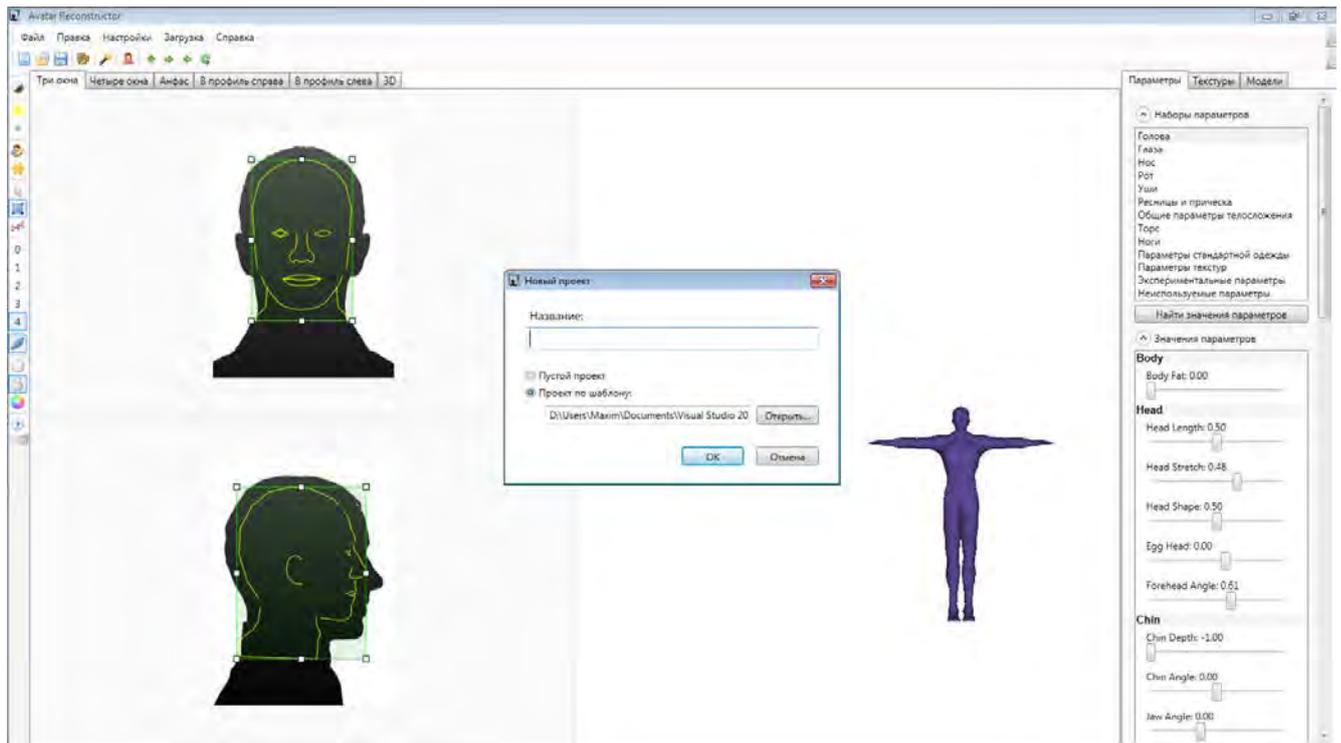
Загрузка параметров модели и текстур в приложение виртуальной реальности Second Life.

Справка

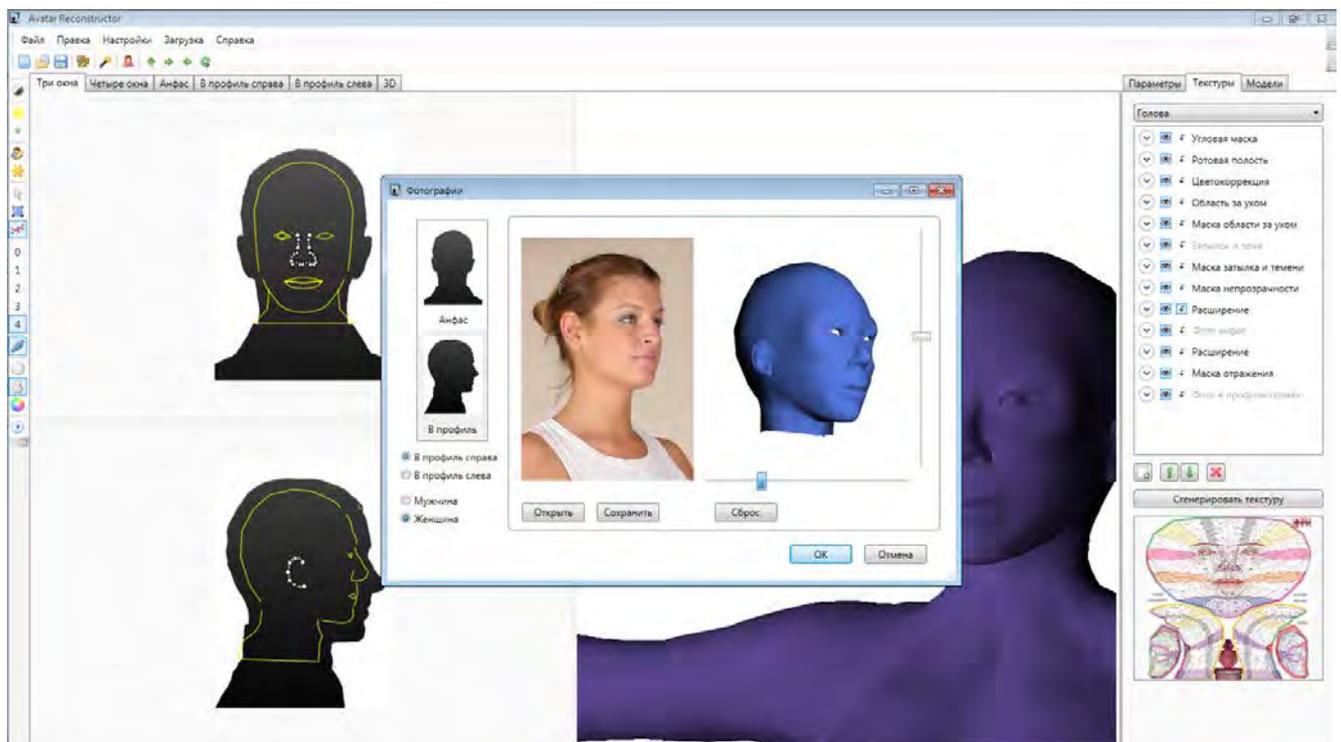
Открыть справку... F1

Открывает файл справки, содержащий информацию об интерфейсе приложения, необходимых библиотеках под Windows (.NET Framework, Microsoft XNA Framework Redistributable, C++ Redistributable) и сведения о системах виртуальной реальности, которые могут оказаться полезны (средний рост аватаров в системах виртуальной реальности, ссылки на бесплатный высококачественный инвентарь и пр.).

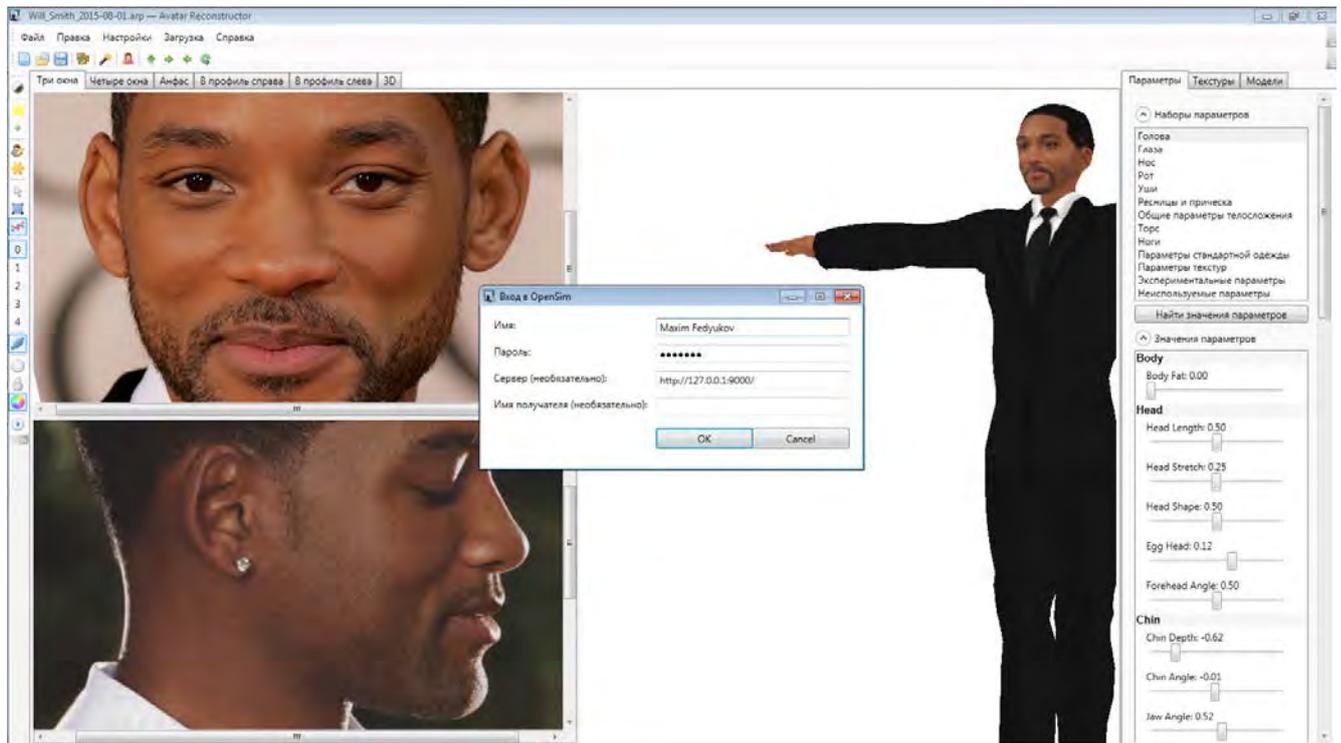
О программе



Р и с. 57. Интерфейс создания нового проекта.



Р и с. 58. Интерфейс управления фотографиями.



Р и с. 59. Интерфейс загрузки параметров модели и текстур в систему виртуальной реальности.

Верхняя панель инструментов содержит наиболее часто используемые пункты меню в удобной для нового пользователя последовательности.

Верхняя панель инструментов

Новый проект...	Ctrl+N
Открыть проект...	Ctrl+O
Сохранить проект	Ctrl+S
Фотографии...	Ctrl+H
Подгонка разметки	Ctrl+M
Генерация всех текстур	F5
Выставить камеру анфас	
Выставить камеру в профиль справа	

Выставить камеру в профиль слева

Сбросить камеру в положение по умолчанию

Левая панель инструментов содержит наиболее часто используемые настройки интерфейса.

Левая панель инструментов

Показывать фотографии в оттенках серого Ctrl+G

Показывать рамки лица Ctrl+R

Показывает результат работы детекторов лиц (см. рис. 14).

Показывать антропометрические точки Ctrl+J

Показывает обнаруженные антропометрические точки (см. рис. 14).

Показывать разметку 3D-модели Ctrl+K

Показывает разметку на 3D-модели, а также проекцию разметки на фотографиях (см. рис. 30).

Показывать интерполированные точки на фотографиях Ctrl+U

Показывает интерполированные проекции вершин полигональной модели на фотографиях (см. рис. 37).

Отключить режим редактирования Ctrl+E

Редактировать ограничивающий параллелепипед разметки Ctrl+B

Редактировать ломаные разметки Ctrl+P

Скрыть разметку Ctrl+0

Показывать только линии разметки Ctrl+1

Показывать базовую разметку Ctrl+2

Показывать подробную разметку Ctrl+3

Показывать полную разметку Ctrl+4

Использовать взвешенно-групповые преобразования	Ctrl+L
<i>Позволяет использовать взвешенно-групповые преобразования, также известные как «мягкий выбор» (soft selection), см. рис. 60.</i>	
Визуализировать без сглаживания	Ctrl+D
<i>Переключает показ трехмерной модели: фасеточная визуализация / визуализация с гладким затенением по Фонгу.</i>	
Показывать модель с затенением	Ctrl+W
<i>Переключает показ трехмерной модели: с затенением / с равномерным освещением.</i>	
Показывать текстуры	Ctrl+T
Включить анимацию	Ctrl+A
<i>Включает загруженную анимацию аватара либо статичную позу, если количество кадров анимации в загруженном файле равно 1.</i>	



Р и с. 60. Реализованные взвешенно-групповые преобразования, также известные как «мягкий выбор» (soft selection), позволяющие при необходимости править разметку быстро и интуитивно. Разметка содержит точки трех типов: 1) нижнего уровня, визуализируемых как маленький квадрат, при перетаскивании которых перемещается только сама эта точка; 2) среднего уровня, визуализируемых как большой квадрат, при перетаскивании которых перемещается сама эта точка, а также все соседние точки нижнего уровня; 3) верхнего уровня, визуализируемых как круг, при перетаскивании которых (что проиллюстрировано на данном рисунке) перемещается сама эта точка, а также все соседние точки нижнего и среднего уровней.

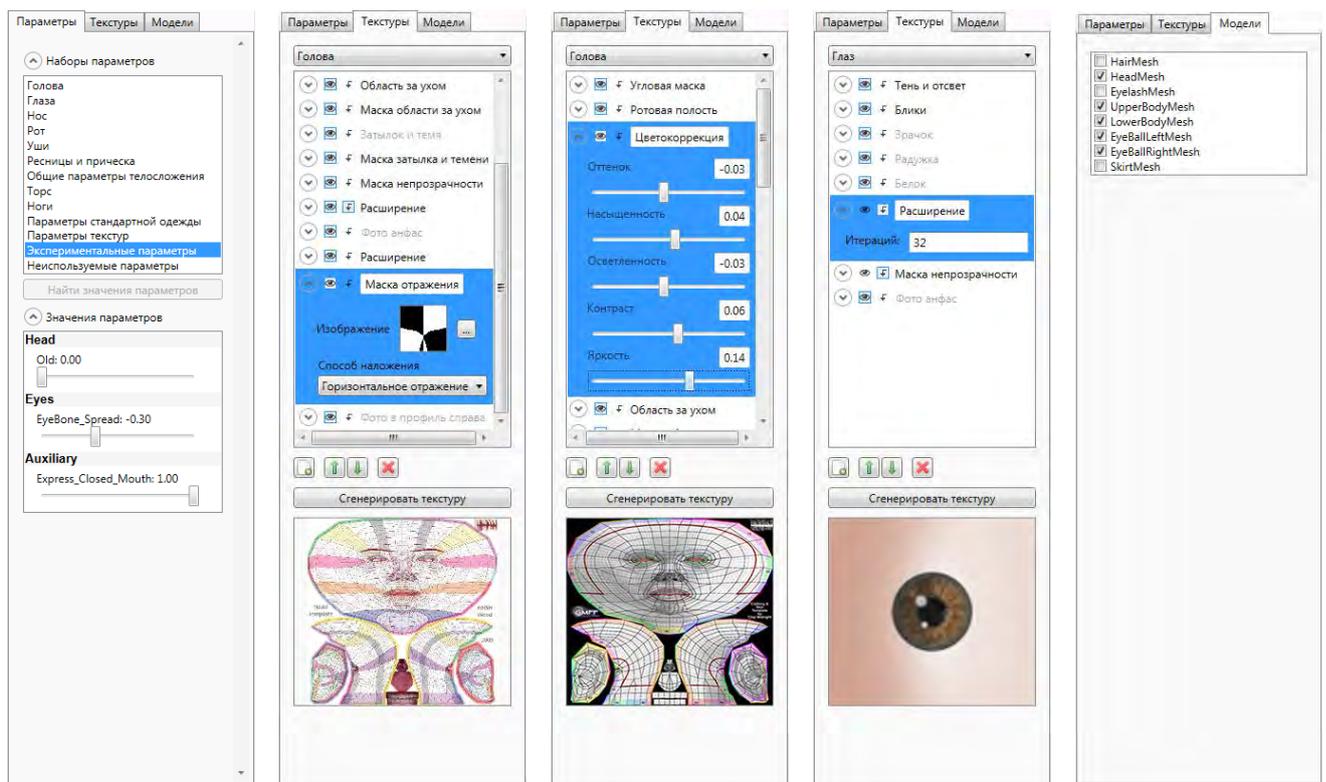
Правая панель включает в себя три вкладки (см. рис. 61).

Первая вкладка — «Параметры» — содержит все доступные наборы параметров, а также кнопку «Найти значения параметров» для

автоматической оценки параметров геометрической модели, описанной в главе 2.

Вторая вкладка — «Текстуры» — содержит выпадающий список текстур, разрешенных в системе виртуальной реальности; стек слоев (синтезированных разверток фотографий, масок и пр.), дающий в результате требуемую текстуру, кнопки «Новый слой», «Переместить слой вверх», «Переместить слой вниз», «Удалить слой» и «Сгенерировать текстуру» и визуализацию текстуры.

Третья вкладка — «Модели» — содержит список полигональных моделей и возможно включать и отключать их визуализацию.



(а)

(б)

(в)

(г)

(д)

Р и с. 61. Вкладки правой панели: (а) — параметры аватара, (б), (в), (г) — текстуры аватара, (д) — полигональные модели аватара.

Отдельно стоит отметить стек текстур, реализованный аналогично стеку, присутствующему во многих профессиональных пакетах работы с изображениями, такими как GIMP и Adobe Photoshop. Стек организован по стандартным принципам: нижележащий слой берется как есть и каждый вышележащий слой один за другим накладывается поверх в соответствии с каналами прозрачности, выбранным способом наложения и параметрами слоя.

Слои бывают трех типов (при нажатии на кнопку «Новый слой» пользователю предлагается выбрать один из трех): изображение, модификатор-расширение и модификатор-цветокоррекция. Модификатор-расширение применяет операцию морфологического расширения (см. примеры на рис. 38). Модификатор-цветокоррекция (см. рис. 61в) позволяет при желании произвести коррекцию оттенка, насыщенности, освещенности, контраста и яркости.

Слой изображения, как показано на рис. 61б, имеет кнопку «...», позволяющую загрузить внешний файл, и выпадающий список «Способ наложения». Кнопка загрузки неактивна у автоматически создаваемых слоев (они выделяются в стеке серым цветом). Реализованные в программной системе способы наложения приведены в таблице ниже. Принятые в таблице обозначения: $\alpha^{\mathfrak{A}}$ — альфа-канал (канал прозрачности) текущего пикселя вышележащего изображения, $\alpha^{\mathfrak{B}}$ — альфа-канал текущего пикселя нижележащего изображения, $\alpha^{\mathfrak{C}}$ — альфа-канал текущего пикселя результирующего изображения, $c_i^{\mathfrak{A}}$ ($c_i^{\mathfrak{B}}$, $c_i^{\mathfrak{C}}$) — i -ая цветовая компонента ($i \in \{0, 1, 2\}$) текущего пикселя соответствующего изоб-

ражения, I — все изображение, (x, y) — координаты текущего пикселя на I , $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$.

Т а б л и ц а 1. Реализованные способы наложения слоев

Название	Описание
Обычный <i>Normal</i>	<p>Накладывает одно изображение поверх другого в соответствии с формулами:</p> $\alpha^e = \alpha^a + \alpha^b(1 - \alpha^a)$ $c_i^e = \begin{cases} c_i^a, & \alpha^e = 0 \\ \frac{c_i^a \alpha^a + c_i^b \alpha^b(1 - \alpha^a)}{\alpha^e}, & \alpha^e \neq 0 \end{cases}$
Умножение <i>Multiply</i>	<p>Осуществляет умножение значений пикселей в соответствии с формулами:</p> $c_i^e = c_i^a c_i^b$ $\alpha^e = \alpha^a + \alpha^b(1 - \alpha^a)$
Проецирование <i>Screen</i>	<p>Осуществляет так называемое «негативное умножение» в соответствии с формулами:</p> $c_i^e = 1 - (1 - c_i^a)(1 - c_i^b)$ $\alpha^e = \alpha^a + \alpha^b(1 - \alpha^a)$
Перекрытие <i>Overlay</i>	<p>Комбинация двух способов наложения — умножения и проецирования — которые применяются в зависимости от значения нижележащего пикселя:</p> $c_i^e = \begin{cases} c_i^a c_i^b, & c_i^a \leq 0,5 \\ 1 - (1 - c_i^a)(1 - c_i^b), & c_i^a > 0,5 \end{cases}$ $\alpha^e = \alpha^a + \alpha^b(1 - \alpha^a)$
Мягкий свет <i>Soft Light</i>	<p>В то время как предыдущий способ наложения — перекрытие — дает жесткий контраст в наиболее ярких и наиболее темных областях изображения, данный способ наложения дает «мягкие» цвета даже в экстре-</p>

Название	Описание
	<p>мурах изображения:</p> $c_i^e = \begin{cases} (2c_i^a - 1)(1 - c_i^b)c_i^b + c_i^b, c_i^a \leq 0,5 \\ (2c_i^a - 1)(\sqrt{c_i^b} - c_i^b) + c_i^b, c_i^a > 0,5 \end{cases}$ $\alpha^e = \alpha^a + \alpha^b(1 - \alpha^a)$
<p>Горизонтальное отражение <i>Horizontal Reflection</i></p>	<p>Отражает относительно центральной вертикальной оси изображения в соответствии с маской, загруженной в текущий слой: отражаются только те пиксели, координаты которых соответствуют белым пикселям маски:</p> $c^e = \begin{cases} I_{1-x,y}, \alpha^a = 1 \wedge (0,21c_0^a + 0,72c_1^a + 0,07c_2^a) = 1 \\ c^b, \alpha^a \neq 1 \vee (0,21c_0^a + 0,72c_1^a + 0,07c_2^a) \neq 1 \end{cases}$
<p>Вертикальное отражение <i>Vertical Reflection</i></p>	<p>Отражает относительно центральной горизонтальной оси изображения в соответствии с маской, загруженной в текущий слой: отражаются только те пиксели, координаты которых соответствуют белым пикселям маски:</p> $c^e = \begin{cases} I_{x,1-y}, \alpha^a = 1 \wedge (0,21c_0^a + 0,72c_1^a + 0,07c_2^a) = 1 \\ c^b, \alpha^a \neq 1 \vee (0,21c_0^a + 0,72c_1^a + 0,07c_2^a) \neq 1 \end{cases}$
<p>Заменяющая маска <i>Replacing Mask</i></p>	<p>Заменяет маску (альфа-канал) нижележащего слоя на изображение текущего слоя:</p> $c_i^e = c_i^b$ $\alpha^e = (0,21c_0^a + 0,72c_1^a + 0,07c_2^a)$
<p>Корректирующая маска <i>Correcting Mask</i></p>	<p>Заменяет полупрозрачные пиксели альфа-канала нижележащего слоя на пиксели текущего слоя:</p> $c_i^e = c_i^b$ $\alpha^e = \begin{cases} \alpha^b(1 - \alpha^a) + (0,21c_0^a + 0,72c_1^a + 0,07c_2^a)\alpha^a, \alpha^b > 0 \\ 0, \alpha^b = 0 \end{cases}$

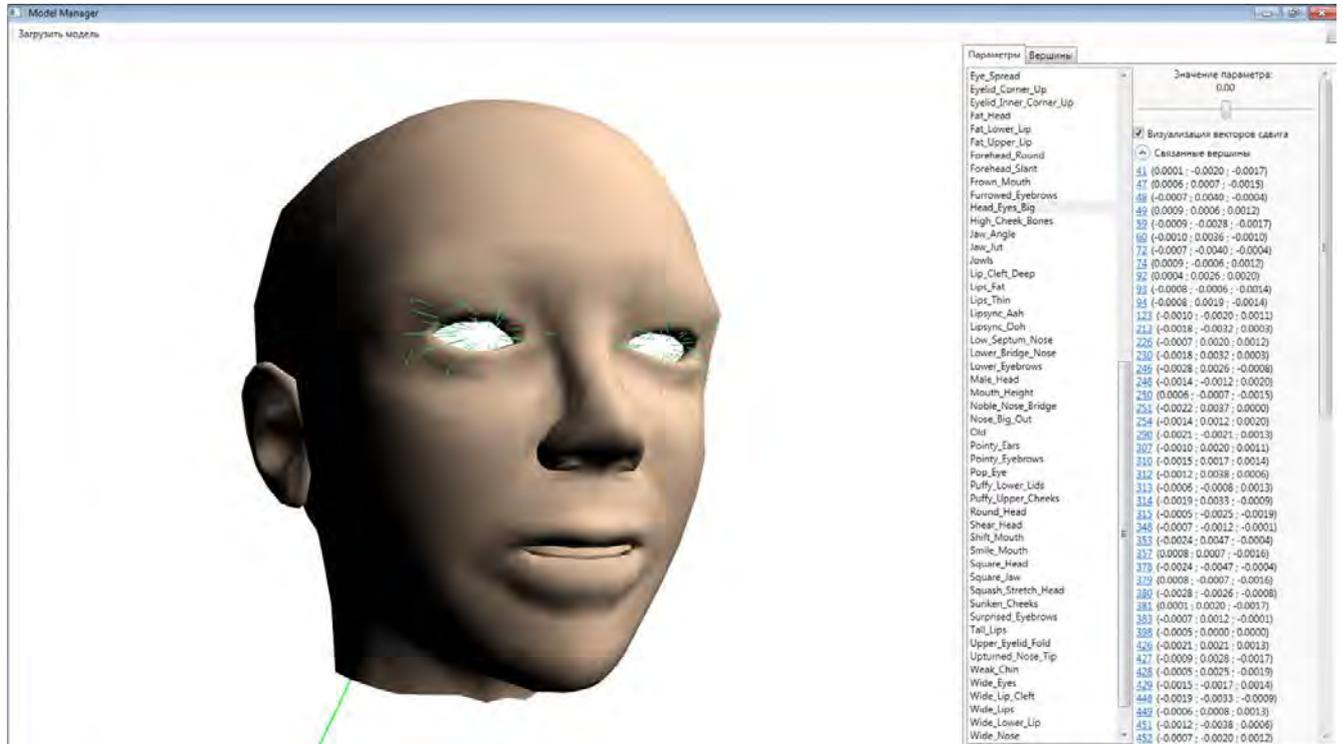
Название	Описание
Использование нижней маски <i>Use Bottom Mask Only</i>	Использует только имеющуюся на нижележащем слое маску: $c_i^{\mathcal{C}} = c_i^{\mathcal{B}} \alpha^{\mathcal{B}} + c_i^{\mathcal{A}} (1 - \alpha^{\mathcal{A}})$ $\alpha^{\mathcal{C}} = \max(\alpha^{\mathcal{A}}, \alpha^{\mathcal{B}})$
Вписывание <i>Inpaint</i>	Использует только имеющуюся на нижележащем слое маску, осуществляет перенос цвета и бесшовную вставку, описанные в §3 главы 3.

Каждый слой можно отключить с помощью кнопки видимости с пиктограммой глаза, расположенной перед названием каждого слоя. Кроме того, также по аналогии с функционалом профессиональных пакетов работы с изображениями, реализован еще один параметр слоя (кнопка с пиктограммой стрелки, расположенная также перед названием каждого слоя), позволяющий менять порядок наложения слоев стека: сначала накладывается каждый слой с включенной кнопкой «✓» на нижележащий под ним слой, и только потом снизу вверх идет наложение всех оставшихся слоев стека.

Как было отмечено выше, помимо основной программной системы Avatar Reconstructor реализован ряд дополнительных исполняемых модулей, использующих тот же функционал ядра.

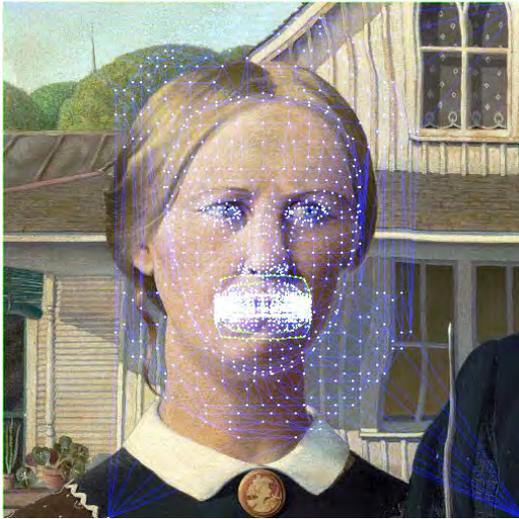
Модуль Model Manager (см. рис. 62) позволяет работать с параметрическими моделями формата LLM, широко используемых в современных распространенных системах виртуальной реальности, обеспечивая визуализацию связанных с каждым параметром вершин, вектора

сдвига этих вершин, подсветки произвольных вершин, применения модификаций как к модели головы, так и ко всем остальным моделям аватара.

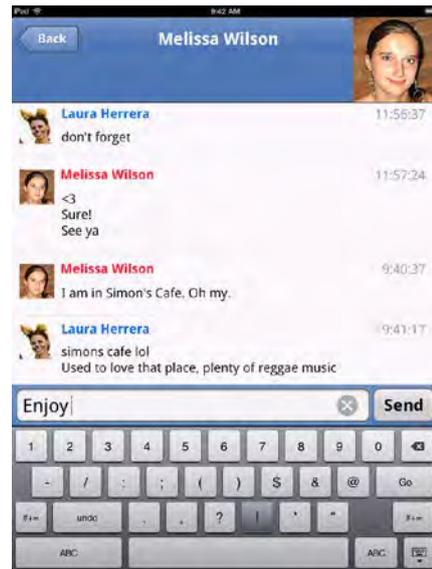


Р и с. 62. Модуль Model Manager.

Модуль Face Animator (см. рис. 63) позволяет пользователю осуществлять полностью автоматическое «оживление» фотографии: на вход подается фотография лица, а на выходе получается анимированная фотография, лицо на которой «оживает», моргая, смотря в разные стороны, улыбаясь или грустя в соответствии с состояниями, получаемыми от обработчиков внешних событий. Данный модуль был также реализован как веб-приложение для социальной сети Facebook и приложения под операционные системы Android и iOS.



(a)



(б)



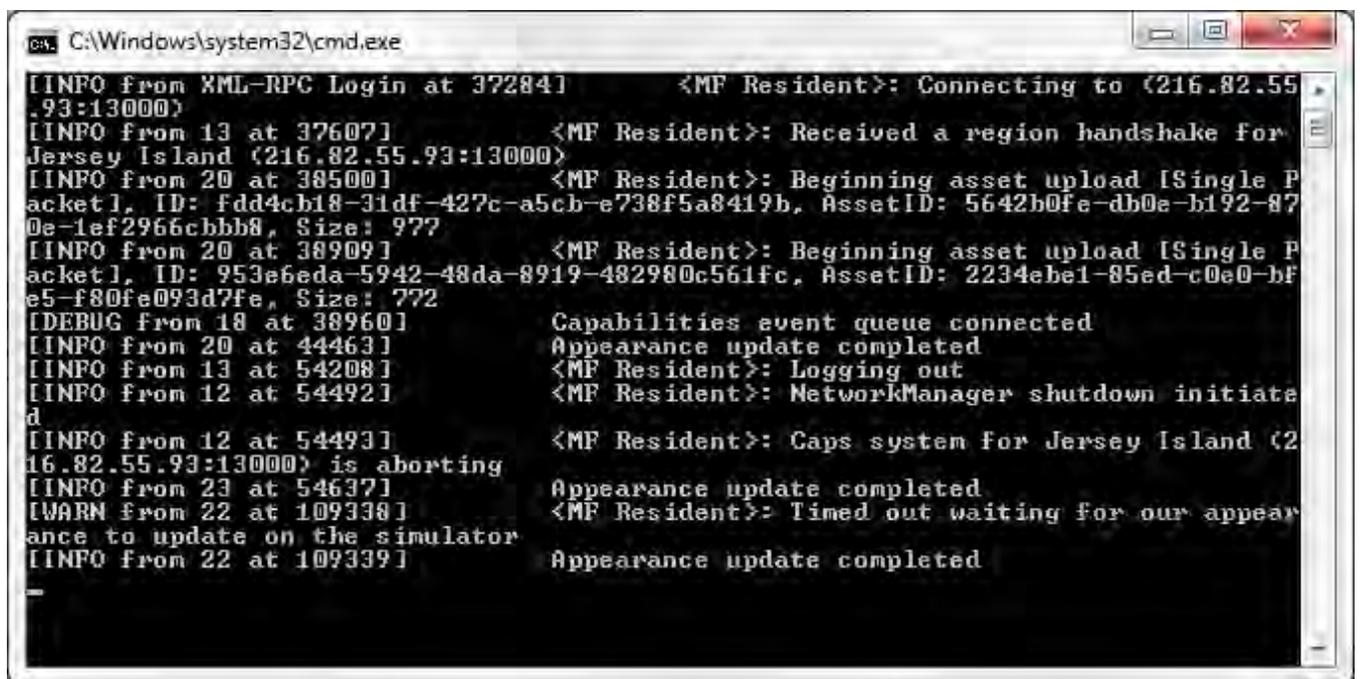
(в)



(г)

Р и с. 63. Интерфейсы Face Animator: (a) — визуализация полигональной модели; (б) — приложение-чат на основе Face Animator; (в) — приложение для Facebook на основе Face Animator; (г) — редактор разметки, который может быть полезен в том случае, когда на вход приложению подаются некорректные фотографии (животные, рисунки и т. п.).

Консольный модуль Open Metaverse Client облегчает дополнительную работу с системами виртуальной реальности, позволяя импортировать и экспортировать ресурсы (в том числе параметры моделей аватара и текстуры), применять изменения текущего аватара, пересылать ресурсы другим пользователям системы виртуальной реальности, отслеживать статус всех операций и т. п. (см. рис. 64).

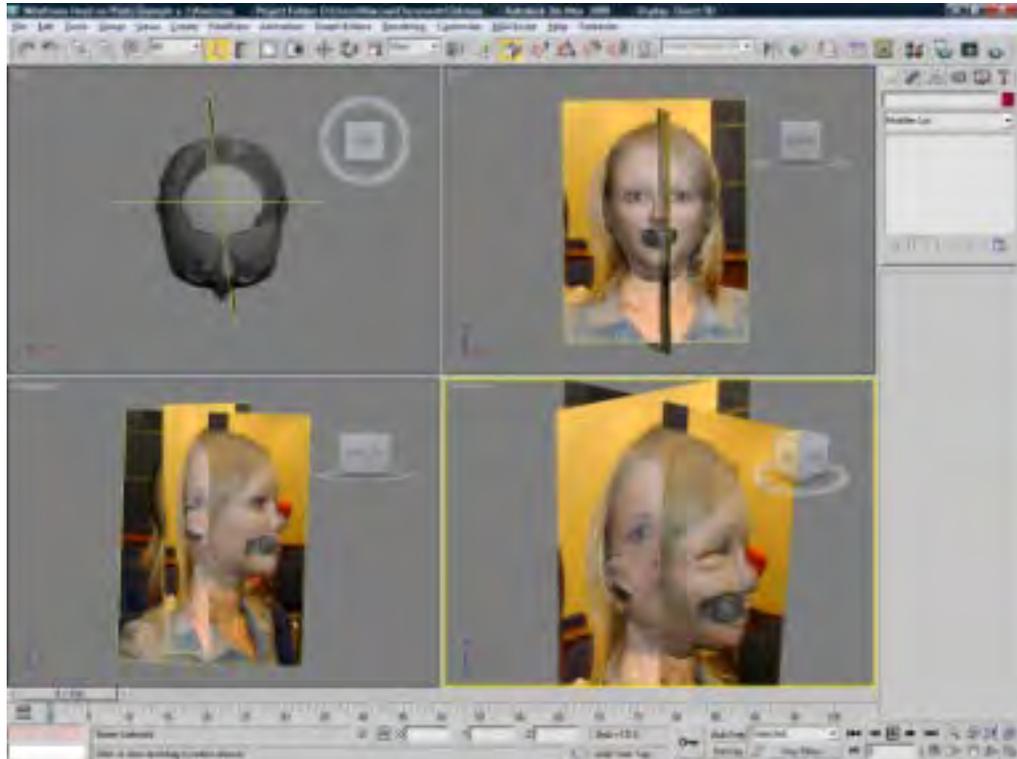


```
C:\Windows\system32\cmd.exe
[INFO from XML-RPC Login at 372841] <MF Resident>: Connecting to (216.82.55.93:13000)
[INFO from 13 at 376071] <MF Resident>: Received a region handshake for Jersey Island (216.82.55.93:13000)
[INFO from 20 at 385001] <MF Resident>: Beginning asset upload [Single Packet], ID: fdd4cb18-31df-427c-a5cb-e738f5a8419b, AssetID: 5642b0fe-db0e-b192-870e-1ef2966cbbb8, Size: 977
[INFO from 20 at 389091] <MF Resident>: Beginning asset upload [Single Packet], ID: 953e6eda-5942-48da-8919-482980c561fc, AssetID: 2234ebel-85ed-c0e0-bfe5-f80fe093d7fe, Size: 772
[DEBUG from 18 at 389601] Capabilities event queue connected
[INFO from 20 at 444631] Appearance update completed
[INFO from 13 at 542081] <MF Resident>: Logging out
[INFO from 12 at 544921] <MF Resident>: NetworkManager shutdown initiated
[INFO from 12 at 544931] <MF Resident>: Caps system for Jersey Island (216.82.55.93:13000) is aborting
[INFO from 23 at 546371] Appearance update completed
[WARN from 22 at 1093381] <MF Resident>: Timed out waiting for our appearance to update on the simulator
[INFO from 22 at 1093391] Appearance update completed
```

Р и с. 64. Консольный модуль Open Metaverse Client.

Модуль Avatar Reconstructor for 3ds Max (см. рис. 65) позволяет осуществлять построение трехмерных моделей человека по фотографиям внутри пакета Autodesk 3ds Max. Модуль компилируется в динамически подключаемую библиотеку с расширением DLO (dynamic link library with procedural objects plugin, динамически подключаемая библиотека с плагином процедурных объектов). Модуль имеет сокращенный функционал по сравнению с самостоятельным приложением Avatar Reconstructor.

tor, однако позволяет создавать модели по фотографиям не выходя из привычной пользователю среды трехмерного моделирования.



Р и с. 65. Плагин процедурных объектов Avatar Reconstructor для пакета работы с трехмерной графикой 3ds Max.

§ 3. Модуль ядра и вспомогательные модули

Для обеспечения максимальной гибкости весь алгоритмический функционал вынесен в модуль ядра и ряд вспомогательных модулей.

В частности, модуль ядра содержит:

- детекторы лица и антропометрических точек на фотографиях анфас и в профиль, описанные в главе 1;
- конвейер оптимизации параметров геометрической модели, описанный в главе 2;

- конвейер интерполяции вершин модели, описанный в главе 3;
- импортеры и экспортеры 3D-моделей и изображений;
- генераторы текстур, описанные в главе 3;
- менеджер многослойных текстур, интерфейс которого описан в § 2 настоящей главы;
- менеджер многокомпонентных 3D-моделей, интерфейс которого также описан в предыдущем параграфе.

Весь вышеперечисленный функционал написан на языке C#. Часть функционала — алгоритмы интерполяции и оптимизации параметров — написаны на C++ и собраны в отдельном библиотечном модуле CppUtilities. Доступ к ним из модуля Core осуществляется с помощью модуля CppBinding, предоставляющего оберточные функции для вызова функций из CppUtilities, а также функционал обратных вызовов для демонстрации индикатора выполнения хода задания.

Также в отдельные модули вынесен следующий функционал, использующийся или потенциально используемый в разных исполняемых модулях. Функционал для работы с интерактивными элементами управления (точки, ломаные, ограничивающие параллелепипеды, функционал выделения, переноса, масштабирования, взвешенно-групповых преобразований) вынесен в модуль PlotControls. Весь функционал работы с DirectX (визуализация моделей, точек, ломаных, работы со светом, с камерой, рендеринга в текстуру, а также все шейдеры, используемые в текстурном стеке для реализации различных способов наложения текстур) вынесен в модуль DXRenderer. Функционал визуализации

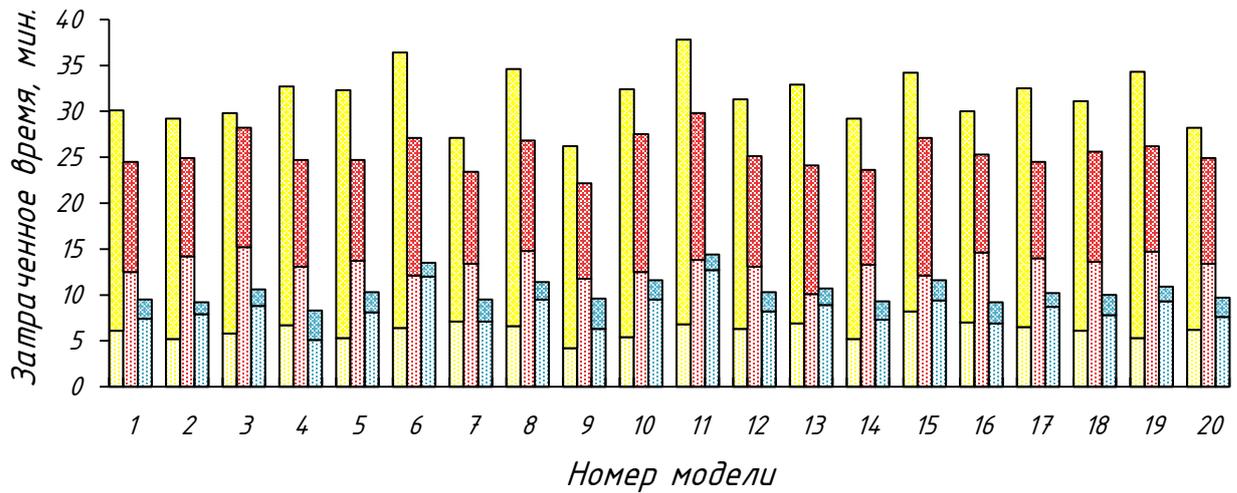
с использованием WPF (связка с Direct3D, оберточные функции, утилиты для конвертации параметров) вынесен в модуль WPFRenderer. Функционал непосредственной работы с системами виртуальной реальности (вход, инициализация работы с системой виртуальной реальности, шифрование, импорт и экспорт параметров модели, импорт и экспорт текстур, импорт анимаций, параметрических примитивов и полигональных моделей, конвертации параметрических примитивов в полигональные модели, кеширование текстур, автоматическая оплата за заливку ресурсов и их хостинг, бот для обеспечения автоматической оплаты, протоколирование операций, применение изменений текущего аватара пользователя, пересылка ресурсов другим пользователям) вынесен в модуль OpenMetaverseAgent.

§ 4. Эксперименты и сравнение

Для экспериментальной оценки времени, затрачиваемого на построение трехмерных моделей, из баз фотографий лиц PAL [81] и SIBC [78] были отобраны 20 пар фотографий анфас и в профиль, на которых присутствуют лица разного пола, возрастов и национальностей (см. рис. 34).

Было проведено сравнение предложенной системы с двумя другими, уже упомянутыми ранее — AvMaker от CyberExtruder Inc., работающий с той же моделью LAD [97], и FaceGen от Singular Inversions Inc., работающий с собственной параметрической моделью. Кроме того, в связи с тем, что функционал имеющихся систем меньше, чем в пред-

ложенной системе, в связке с AvMaker и FaceGen 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. 66.



Р и с. 66. 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.).

§ 5. Заключение

В данной главе описан программный комплекс, включающий в себя все предложенные в рамках настоящей диссертационной работы алгоритмы, а также ряд технических решений для повышения эффективности работы и интеграции с существующими системами. Реализованная система построения модели человека совместима с современными приложениями виртуальной реальности на базе самых распространенных платформ OpenSim и Second Life.

В главе проведено сравнение с коммерческими системами AvMaker от CyberExtruder Inc. и FaceGen от Singular Inversions Inc., показавшее, что с помощью предложенной системы можно создавать модели человека аналогичного либо более высокого качества, затрачивая при этом в 2—3 раза меньше времени.

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 предприятия в научно-технической сфере. 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. На рис. 67 приведены фотография Анджея Аршавского, главы отдела разработки систем хранения данных Российской лаборатории систем и технологий IBM, во время презентации на конференции «TEDx — Воробьевы горы», и трехмерная модель Анджея Аршавского в приложении виртуальной реальности OpenSim, построенная с помощью разработанной в рамках настоящей диссертационной работы системы (слайд из представленной на конференции презентации).



Р и с. 67. Презентация Анджея Аршавского (IBM) на конференции «TEDx — Воробьевы горы».

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.

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.

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.

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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность научному руководителю Ю. М. Баяковскому, А. С. Конушину, А. В. Игнатенко, Д. С. Ватолину, В. А. Галактионову, А. Г. Волобою за содействие и помощь в работе, ценные консультации и плодотворные совместные обсуждения, способствовавшие реализации идеи диссертации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bishop G., Bricken W., Brooks F., Brown M., Burbeck C., Durlach N., Ellis S., Fuchs H., Green M., Lackner J., et al. Research Directions in Virtual Environments // Computer Graphics, Vol. 26, No. 3, 1992. P. 153—183.
2. Гебель М., Клименко С.В. Научная визуализация в виртуальном окружении // Программирование, Т. 4, 1994. С. 29—46.
3. Афанасьев В.О., Байгозин Д.А., Батурич Ю.М., Даниличева П.П., Долговесов Б.С., Еремченко Е.Н., Казанский И.П., Клименко А.С., Клименко С.В., Леонов А.В. и др. Системы визуализации и виртуального окружения в задачах исследования космоса: настоящее и будущее // В кн.: Космонавтика XXI века. Попытка прогноза развития до 2101. РТСофт, 2010. С. 185—256.
4. Baturin Y.M., Danilicheva P.P., Klimenko S.V., Serebrov A.A. Virtual Space Experiments and Lessons from Space // Proceedings of ED-MEDIA 2007. Vancouver BC. 2007. Vol. 1. P. 4195—4200.
5. Даниличева П.П., Фомин С.А., Клименко С.В., Батурич Ю.М., Серебров А.А., Щербинин Д.Ю. Виртуальное повествование как инновационная образовательная технология // Труды Первой международной конференции «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Кластерные технологии моделирования». Ижевск. 2009. Т. 2. С. 123—125.

-
6. Клименко С.В., Никитин И.Н., Никитина Л.Д. Аванго: система разработки виртуальных окружений. Москва—Протвино: Институт физико-технической информатики, 2006. 252 с.
 7. 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.
 8. Palermo R., Rhodes G. Are you always on my mind? A review of how face perception and attention interact // Neuropsychologia, Vol. 45, No. 1, 2007. P. 75—92.
 9. 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.
 10. Ярбус А.Л. Исследование закономерностей движений глаз в процессе зрения // Доклады АН СССР, № 4, 1954. С. 89—92.
 11. Tullis T., Siegel M., Sun E. Are people drawn to faces on webpages? // CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. 2009. P. 4207—4212.
 12. Файн В.С. Оpozнaвание изображений. Основы непрерывно-групповой теории и ее приложения. Москва: Наука, 1970. 295 с.
 13. Файн В.С. Алгоритмическое моделирование формoобразования. Москва: Наука, 1975. 141 с.
 14. Parke F.I. Computer generated animation of faces // Proceedings of the ACM annual conference — Volume 1. 1972. P. 451—457.

15. Parke F.I. A model for human faces that allows speech synchronized animation // *Computers & Graphics*, Vol. 1, No. 1, 1974. P. 3—4.
16. Leo M.J., Manimegalai D. 3D modeling of human faces — A survey // *3rd International Conference on Trends in Information Sciences and Computing (TISC)*. 2011.
17. Бармак О.В., Барабан К.М. Інформаційна технологія моделювання трьохмірної голови людини // *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5, 2009. С. 87—93.
18. Тюкавкин Д.В., Беклемишев Н.Д. Contour-based computer stereo vision system // *Digital Photogrammetry and Remote Sensing — Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Санкт-Петербург. 1995. Т. 2646. С. 261—267.
19. Тюкавкин Д.В., Беклемишев Н.Д. False target filtering for a computer stereo vision system // *The 5th International Conference on Computer Graphics & Vision*. Санкт-Петербург. 1995. Т. 1. С. 144—148.
20. Дышкант Н.Ф., Местецкий Л.М. Сравнение однолистных поверхностей полученных при 3D сканировании // *Труды XVIII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон»*. Москва. 2008. С. 270—277.
21. Вежневцев В.П. Задача восстановления формы объекта по закраске // *Научно-образовательный журнал «Графика и мультимедиа»*. 2004.

-
22. Глаз А.Б., Тимухин А.А. Восстановление 3D поверхности лиц на базе исходных 2D изображений // Труды 12-й Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов». Москва. 2005. С. 69—72.
23. Рябоконт Д.І. Створення тривимірних моделей об'єктів за їх стереопарами зображень для віртуальних музеїв // Матеріали міжнародної конференції «Електронні зображення та візуальні мистецтва». 2002. С. 61—68.
24. Бовырин А.В., Губанов А.В., Колесов А.И., Курякин В.Ф., Родюшкин К.В., Чудинович Б.М. Библиотека функций векторной обработки видеоизображений в реальном времени // Доклады IX Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов». Москва. 1999. С. 145—147.
25. Манолов А.И., Соколов А.Ю., Степаненко О.В., Тумачек А.С., Тяхт А.В., Цискаридзе А.К., Заварикин Д.Н., Кадейшвили А.А. Некооперативная биометрическая идентификация по 3D-моделям лица с использованием видеокамер высокого разрешения // Труды XIX международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Москва. 2009. С. 210—214.
26. Князь В.А. Photogrammetric System for Frontal Face Image Acquisition // Труды XIV международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Москва. 2004. С. 41—44.

-
27. 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.
28. Жислина В.Г., Иванов Д.В., Курякин В.Ф., Лемпицкий В.С., Мартынова Е.М., Родюшкин К.В., Фирсова Т.В., Хропов А.А., Шокуров А.В. Создание персонифицированных моделей головы и их анимация по цифровым фотографиям и видео // Программирование, Т. 30, № 5, 2004. С. 242—257.
29. Федоров А.В., Фирсова Т.В., Курякин В.Ф., Мартынова Е.М., Миндлина О.И., Родюшкин К.В., Жислина В.Г. Talking Head: Synthetic Video Facial Animation in MPEG-4 // Труды XIII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Москва. 2003. С. 37—41.
30. Breuer P., Kim K.I., Kienzle W., Schölkopf B., Blanz V. Automatic 3D face reconstruction from single images or video // 8th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. 2008. P. 1—8.
31. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // The computer journal, Vol. 7, No. 4, 1965. P. 308—313.
32. 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. P. 317.

-
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. Федюков М.А. Моделирование головы человека по изображениям для систем виртуальной реальности // Международный журнал «Программные продукты и системы», 2011. С. 210—213.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Роспатента № 2008612029 «Система реконструкции параметрической модели головы человека», автор: М. А. Федюков.
44. Milborrow S. Locating facial features with active shape models. Doctoral dissertation, Faculty of Engineering, University of Cape Town, 2007.

45. Wang N., Gao X., Tao D., Li X. Facial Feature Point Detection: A Comprehensive Survey // International Journal of Computer Vision, 2015.
46. Rathod D., Vinay A., Shylaja S.S., Natarajan S. Facial Landmark Localization – A Literature Survey // International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 4, No. 3, 2014. P. 1901—1907.
47. Bakshi U., Singhal R. A survey on face detection methods and feature extraction techniques of face recognition // International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science, Vol. 3, No. 3, 2014. P. 233—237.
48. Rath S.K., Rautaray S.S. A Survey on Face Detection and Recognition // I.J. Modern Education and Computer Science, No. 8, 2014. P. 34—44.
49. Sinsinwar T., Dwivedi P.K. A survey on feature extraction method and dimension reduction techniques in face recognition // Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, Vol. 3, No. 3, 2014. P. 734—740.
50. Cristinacce D., Cootes T. Automatic feature localisation with constrained local models // Pattern Recognition, Vol. 41, No. 10, 2008. P. 3054—3067.
51. Saragih J.M., Lucey S., Cohn J.F. Face alignment through subspace constrained mean-shifts // International Conference on Computer

-
- Vision. 2009. P. 1034—1041.
52. Cootes T.F., Taylor C.J. Statistical models of appearance for computer vision, 2004.
53. Рейер И.А., Жукова К.В. Comparison of face profiles based on homeomorphism // Pattern Recognition and Image Analysis, Т. 16, № 1, 2006. С. 43—45.
54. Gao X., Su Y., Li X., Tao D. A review of active appearance models // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Vol. 40, No. 2, 2010. P. 145—158.
55. Базанов П.В., Джосан О.В. Методы выделения информативных признаков изображений лица в задаче распознавания лица // Труды XV международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Новосибирск. 2005.
56. Xiong X., De la Torre F. Supervised descent method and its applications to face alignment // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2013. P. 532—539.
57. Valstar M., Martinez B., Binefa X., Pantic M. Facial point detection using boosted regression and graph models // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2010. P. 2729—2736.
58. Zhu X., Ramanan D. Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2012. P. 2879—2886.

59. Huang Y., Liu Q., Metaxas D. A component based deformable model for generalized face alignment // IEEE 11th International Conference on Computer Vision (ICCV). 2007. P. 1—8.
60. Zhao X., Chai X., Shan S. Joint face alignment: Rescue bad alignments with good ones by regularized re-fitting // Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV). 2012. P. 616—630.
61. Smith B.M., Zhang L. Joint face alignment with non-parametric shape models // Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV). 2012. P. 43—56.
62. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Ососков М.В. Система распознавания и визуализации характерных черт человеческого лица в реальном времени на персональной ЭВМ с использованием web-камеры // Труды XII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Нижний Новгород. 2002.
63. Вежневцев В.П., Солдатов С.А., Дегтярева А.А., Парк И.К. Automatic extraction of frontal facial features // Proceedings of Asian Conference on Computer Vision. 2004. Т. 2. С. 1020—1025.
64. Фазылов Ш.Х., Тухтасинов М.Т., Старовойтов В.В., Самаль Д.И., Ригол Г. Локализация фрагментов лица на цветных фотопортретах // Тезисы докладов 4-й Международной научной конференции «Обработка информации и управление в чрезвычайных и экстремальных ситуациях». Минск. 2004.

-
65. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В., Ососков М.В., Каратеев С.Л., Бекетова И.В. Автоматическое выделение на цветных цифровых изображениях лица человека и его характерных черт // Вестник компьютерных и информационных технологий, № 10, 2005. С. 2—7.
66. Luo P., Wang X., Tang X. Hierarchical face parsing via deep learning // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2012. P. 2480—2487.
67. Sun Y., Wang X., Tang X. Deep convolutional network cascade for facial point detection // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2013. P. 3476—3483.
68. Cootes T.F., Edwards G.J., Taylor C.J. Comparing Active Shape Models with Active Appearance Models // BMVC. 1999. Vol. 99. P. 173—182.
69. Horesh N.P. Face and facial feature tracking: ASM, AAM, CLM, Haifa, 2013.
70. Saragih J.M., Lucey S., Cohn J.F. Deformable Model Fitting by Regularized Landmark Mean-Shift // International Journal of Computer Vision, Vol. 91, No. 2, 2011. P. 200—215.
71. Пункт 25 Административного регламента ФМС России, утв. Приказом ФМС России от 30.11.2012 № 391 (ред. от 02.02.2015).
72. Farkas L.G., Katic M.J., Forrest C.R. International anthropometric study of facial morphology in various ethnic groups/races // Journal of Craniofacial Surgery, Vol. 16, No. 4, 2005. P. 615—625.

73. Rhodes G., Maloney L.T., Turner J., Ewing L. Adaptive face coding and discrimination around the average face // *Vision Research*, Vol. 47, No. 7, 2007. P. 974—989.
74. Jesorsky O., Kirchberg K.J., Frischholz R.W. Robust Face Detection Using the Hausdorff Distance // *Third International Conference on Audio- and Video-based Biometric Person Authentication*. Halmstad. 2001. P. 90—95.
75. Huang G.B., Ramesh M., Berg T., Learned-Miller E. Labeled Faces in the Wild: A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments, University of Massachusetts, Amherst, Technical Report 07-49 2007.
76. The MPLab GENKI Database // Machine Perception Laboratory, UC San Diego. URL: <http://mplab.ucsd.edu/> (дата обращения: 01.12.2015).
77. CMU AMP Face Expression Database // Carnegie Mellon University. URL: <http://vasc.ri.cmu.edu/idb/html/face/> (дата обращения: 01.12.2015).
78. Human Photo References for 3D Artists and Game Developers // Smartnet IBC. URL: <http://www.3d.sk> (дата обращения: 01.12.2015).
79. Milborrow S., Morkel J., Nicolls F. The MUCT landmarked face database // *Pattern Recognition Association of South Africa*, Vol. 201, No. 0, 2010.
80. Cristinacce D. Automatic Detection of Facial Features in Grey Scale

- Images. Doctoral Thesis, Faculty of Medicine, Dentistry, Nursing and Pharmacy, University of Manchester, 2004.
81. Minear M., Park D.C. A lifespan database of adult facial stimuli // Behavior Research Methods, Instruments & Computers: A Journal of the Psychonomic Society, Vol. 36, No. 4, 2004. P. 630—633.
82. Cristinacce D., Cootes T. Boosted Regression Active Shape Models // Proceedings of British Machine Vision Conference. 2007. Vol. 2. P. 880—889.
83. Wang Y., Liu Z., Guo B. Face Synthesis. 2nd ed. // In: Handbook of Face Recognition / Ed. by Li S.Z., Jain A.K. Springer, 2011. P. 521—547.
84. Ersotelos N., Dong F. Building highly realistic facial modeling and animation: a survey // The Visual Computer, Vol. 24, No. 1, 2008. P. 13—30.
85. Chandra D., Karmakar S., Hegadi R. Techniques of Facial Synthesis: A Comprehensive Literature Review // International Journal of Computer Applications, Vol. 61, No. 10, 2013. P. 34—41.
86. Knothe R., Amberg B., Romdhani S., Blanz V., Vetter T. Morphable Models of Faces. 2nd ed. // In: Handbook of face recognition / Ed. by Jain A.K., Li S.Z. Springer Science and Business Media, 2011. P. 137—168.
87. Noh J., Neumann U. A survey of facial modeling and animation techniques, USC, Technical Report 99/705, 1998.

-
88. Lee W., Goto T., Kshirsagar S., Molet T. Face cloning and face motion capture // In: Handbook of Virtual Humans / Ed. by Magnenat-Thalmann N., Thalmann D. Wiley Online Library, 2004. P. 26—51.
89. Sheng Y., Kucharski K., Sadka A.H., Skarbek W. Automatic Face Synthesis and Analysis. A Quick Survey // Computer Vision and Graphics, 2006. P. 147—160.
90. Suen C.Y., Langaroudi A.Z., Feng C., Mao Y. A survey of techniques for face reconstruction // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2007. P. 3554—3560.
91. Иванов Д.В., Лемпицкий В.С., Кузьмин Е.П. 3D Talking Heads: Personalized and Animated // The magazine of Norwegian Computer Society, Т. 1, № 3, 2003. С. 4—8.
92. Востриков М.С. Method for the recognition using 3D face model // 8-й Открытый российско-немецкий семинар «Распознавание образов и понимание изображений». Нижний Новгород. 2011. С. 347—348.
93. Соловьева А. Алгоритм модификации типового трехмерного портрета по заданным фотоизображениям // Труды XX международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». 2010. P. 346—347.
94. Blanz V., Scherbaum K., Vetter T., Seidel H.P. Exchanging faces in images // Computer Graphics Forum. 2004. Vol. 23. P. 669—676.
95. Дружинин А.А., Клименко С.В., Протасов В.И., Потапова З.Е.

- Разработка и создание системы распознавания лиц с помощью объемных фотороботов на основе общедоступных установок виртуальной реальности // Труды 13-й Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов». Зеленогорск. 2007. С. 584—585.
96. Иванов Д.В., Лемпицкий В.С., Кузьмин Е.П. High-Quality Head Model Calibration Pipeline // Труды XII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Нижний Новгород. 2002.
97. Agent appearance definition // OpenMV Library Developer Wiki. URL: <http://lib.openmetaverse.co/wiki/AgentSetAppearance> (дата обращения: 01.12.2015).
98. Ху В., Чен И.К., Ванг Д., Жоу Д.Е. 一种三维人头生成方法在 Second Life 中的应用 (Метод создания трехмерной модели головы человека и его практическое применение в Second Life) // 计算机仿真, Т. 1, № 27, 2010. С. 235—238.
99. Ванг Д., Чен И.К., Лиу Д.Ф., Ян К.С. 基于点匹配的 3D 人脸网格自动转换方法 (Автоматическая трансформация трехмерной сетки лица на основе сопоставления точек) // 计算机工程与设计, Т. 31, № 17, 2010. С. 3861—3863.
100. 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.
101. 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.
102. Wallraven C., Schwaninger A., Bühlhoff H.H. Learning from humans: computational modeling of face recognition // *Network: Computation in Neural Systems*, Vol. 16, No. 4, 2005. P. 401—418.
103. Schwaninger A., Carbon C.C., Leder H. Expert face processing: Specialization and constraints // *Development of face processing*, 2003. P. 81—97.
104. Lee W., Goto T., Kshirsagar S., Molet T. Face cloning and face motion capture // In: *Handbook of Virtual Humans*. Wiley Online Library, 2004. P. 26—51.
105. Лемпицкий В.С., Иванов Д.В., Кузьмин Е.П. Texturing Calibrated Head Model from Images // *EuroGraphics Proceedings*. 2002. С. 281—288.
106. Tarini M., Yamauchi H., Haber J., Seidel H.P. Texturing Faces // *Proc. of Graphics Interface*. Calgary. 2002. P. 89—98.
107. Yamauchi H., Lensch H.P., Haber J., Seidel H.P. Textures revisited // *The Visual Computer*, Vol. 21, No. 4, 2005. P. 217—241.
108. Zhou X., Wang Y., Li J., Zhou D. ABF Based Face Texturing //

- Technologies for E-Learning and Digital Entertainment, 2008. P. 664—674.
109. Weiss B. Fast median and bilateral filtering // ACM Transactions on Graphics. 2006. Vol. 25. P. 519—526.
110. Oliveira M.M., Bowen B., McKenna R., Chang Y.S. Fast digital image inpainting // Proceedings of the International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing. 2001. P. 261—266.
111. Wei L.Y., Levoy M. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization // SIGGRAPH. 2000. P. 479—488.
112. Pérez P., Gangnet M., Blake A. Poisson image editing // ACM Trans Graph, Vol. 22, No. 3, 2003. P. 313—318.
113. Reinhard E., Ashikhmin M., Gooch B., Shirley P.S. Color transfer between images // IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 21, No. 5, 2001. P. 34—41.
114. Pouli T., Reinhard E. Progressive histogram reshaping for creative color transfer and tone reproduction // Proceedings of NPAR. 2010. P. 81—90.
115. Ruderman D.L., Cronin T.W., Chiao C.C. Statistics of Cone Responses to Natural Images: Implications for Visual Coding // Journal of Optical Society of America, Vol. 15, No. 8, 1998. P. 2036—2045.
116. Efros A.A., Leung T. Texture synthesis by non-parametric sampling // The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference.

1999. Vol. 2. P. 1033—1038.
117. Efros A.A., Freeman W.T. Image quilting for texture synthesis and transfer // SIGGRAPH. 2001. P. 341—346.
118. Ramanarayanan G., Bala K. Constrained texture synthesis via energy minimization // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 13, No. 1, 2007. P. 167—178.
119. Han C., Risser E., Ramamoorthi R., Grinspun E. Multiscale texture synthesis // ACM Transactions on Graphics. 2008. Vol. 27. P. 51—58.
120. Zhou S.R., Yin J.P., Zhang J.M. Local binary pattern (LBP) and local phase quantization (LBQ) based on Gabor filter for face representation // Neurocomputing, Vol. 116, 2013. P. 260—264.
121. Liu C., Wechsler H. Gabor feature based classification using the enhanced fisher linear discriminant model for face recognition // IEEE Transactions on Image processing, Vol. 11, No. 4, 2002. P. 467—476.
122. Иванов Д.В., Лемпицкий В.С., Шокуров А.В., Хропов А.А., Кузьмин Е.П. Creating Personalized Head Models from Image Series // Труды XIII международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Москва. 2003.
123. Makthal S., Ross A. Synthesis of iris images using Markov random fields // 13th European Signal Processing Conference. 2005. P. 1—4.
124. Wei Z., Tan T., Sun Z. Synthesis of large realistic iris databases using patch-based sampling // 19th International Conference on

- Pattern Recognition. 2008. P. 1—4.
125. Zuo J., Schmid N., Chen X. On generation and analysis of synthetic iris images // IEEE Transactions on Information Forensics and Security, Vol. 2, No. 1, 2007. P. 77—90.
126. Cui J., Wang Y., Huang J., Tan T., Sun Z. An iris image synthesis method based on PCA and super-resolution // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. 2004. Vol. 4. P. 471—474.
127. Генераторы текстур радужки глаза Filter Forge URL: <http://www.filterforge.com/filters/search.html?q=iris&h=r> (дата обращения: 01.12.2015).
128. Джосан О.В. Использование скрытых марковских моделей для детектирования радужки на изображении лица // Труды XVI международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон». Новосибирск. 2006.
129. Документация Linden Scripting Language (LSL) [Электронный ресурс] URL: <http://lslwiki.net/lslwiki/> (дата обращения: 01.12.2015).
130. Язык программирования MAXScript // Документация Autodesk 3ds Max. URL: http://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2016/ENU/?guid=__files_GUID_F039181A_C072_4469_A329_AE60FF7535E7_htm (дата обращения: 01.12.2015).