

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук

На правах рукописи

Матвеев Иван Алексеевич

**Методы и алгоритмы автоматической
обработки изображений радужной оболочки
глаза**

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных
машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук.

Научный консультант: доктор физико-математических наук Цурков Владимир Иванович

Официальные оппоненты: Себряков Герман Георгиевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» Государственный научный центр Российской Федерации, заместитель директора

Гостев Иван Михайлович, доктор технических наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», профессор кафедры управления разработкой программного обеспечения

Жизняков Аркадий Львович, доктор технических наук, Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», заместитель директора по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем обработки изображений РАН, г.Самара

Защита состоится «30» октября 2014 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 002.017.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, расположенном по адресу: 119333, г.Москва, ул.Вавилова, д.40

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук и на сайте <http://www.ccas.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.017.02,

д.ф.-м.н., профессор

В.В.Рязанов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Аутентификация человека, то есть подтверждение того, что он является тем, за кого себя выдаёт, вне всяких сомнений является актуальной задачей, практическим решением которой заняты тысячи и миллионы человек по всему миру: паспортные столы, контрольно-пропускные пункты и т.п. Автоматизация этого процесса, в том числе при помощи новейших технологий — важная составляющая развития современного общества. То же самое можно сказать и о задаче идентификации, то есть установлении личности человека путём поиска его записи в базе данных. Развитие систем компьютерного зрения, цифровой обработки изображений, увеличение мощности вычислительных средств в последнее десятилетие дало возможность ставить и решать задачи автоматической регистрации, выделения, распознавания таких сложных, изменчивых, трудно моделируемых и формализуемых объектов как биометрические признаки живых организмов. Таким образом, задачи аутентификации и идентификации человека теперь решаются при помощи автоматических биометрических систем, составляя одну из новых областей прикладной математики, *биометрическую идентификацию*.

Предложено, исследуется, практически используется большое количество типов биометрических признаков, называемых *биометрическими модальностями*: рисунок папиллярных линий пальца, изображения лица, радужки глаза, рисунки вен сетчатки глаза, форма кисти руки, особенности походки, почерка, характеристики голоса. Многие из этих модальностей использовались в целях идентификации задолго до появления электроники и вычислительных средств. Изображения радужки глаза среди прочих модальностей выделяются в двух отношениях. С одной стороны, практическое распознавание по радужке реализовано совсем недавно, на рубеже столетия, с появлением электронных цифровых камер и достаточно мощных ЭВМ. С другой стороны, именно распознавание по радужке на сегодняшний день — признанный лидер по точности и надёжности среди биометрических признаков. Таким образом, обработка изображений радужки является наиболее быстро развивающейся областью систем биометрической идентификации.

Основные научные коллективы в России, занимающиеся проблемами обработки и распознавания изображений, формировались в: Вычислительном Центре РАН (под руководством академика РАН Ю. И. Журавлёва); Институте систем обработки изображений РАН (под руководством член-корреспондента РАН В. А. Сойфера); Государственном НИИ авиационных систем (под руководством член-корреспондента РАН Г. Г. Себрякова); Научно-исследовательском институте системных исследований РАН (под руководством академика РАН В. Б. Бетелина); Институте системного анализа РАН (под руководством член-корреспондента РАН В. Л. Арлазарова); Институте математики им. С. Л. Соболева СО РАН (под руководством д.т.н. Н. Г. Загоруйко); Военно-воздушной инженерной академии им. Жуковского (под руководством д.т.н. И. Н. Белоглазова); Курском государственном техническом университете (под руководством д.т.н. В. С. Титова); Владимирском государственном университете (под руководством д.т.н. С. С. Садыкова); Институте проблем управления РАН (под руководством д.т.н. В. Н. Вапника); МГУ им. М. В. Ломоносова (под руководством д.ф.-м.н. Ю. П. Пытьева); Институте проблем передачи информации РАН (под руководством д.ф.-м.н. Л. П. Ярославского).

В России и Беларуси проблемами обработки и распознавания изображений радужки занимаются: коллектив лаборатории математических методов обработки изображений факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ им.М.В. Ломоносова под руководством проф. А.С.Крылова; исследовательская группа в Институте физики имени Б.И.Степанова Национальной академии наук Беларуси под руководством д.ф.-м.н. Г.И.Желтова; ЗАО «ПАПИЛОН», Институт систем обработки изображений РАН.

Большое внимание уделяется распознаванию по радужке за рубежом. Основные исследовательские группы работают в США (University of Notre Dame, P.J.Flynn, K.W.Bowyer, Michigan State University, A.Ross), Англии (University of Cambridge, J.Daugman), Португалии (University of Beira Interior, H.Proenca), Польше (Warsaw University of Technology, A.Czajka). Системы распознавания по радужке разработаны фирмами Iritech, LG, OKI, Panasonic, Sagem, Neurotechnology, Morpho.

В целом теория, прикладные методы и системы распознавания по радужке достигли высокого уровня, современные коммерческие системы позволяют

производить распознавание с ошибками первого и второго рода (ложный отказ и ложный пропуск), не превышающими таковые для систем с вводом четырёхзначного пин-кода посредством клавиатуры (банкоматы). Основными направлениями развития этой области являются: дальнейшая разработка моделей радужки и её изображения; построение и исследование новых моделей и информативных признаков радужки; создание методов и систем распознавания, работающих в оптическом диапазоне, без сотрудничества распознаваемого человека; разработка методов защиты от подделок, ускорение поиска в больших базах биометрических эталонов.

Цели и задачи диссертационной работы: В работе были поставлены следующие **цели**:

- Создать методы и алгоритмы, обеспечивающие выделение области радужки на изображении глаза, с показателями точности, надёжности и скорости работы, приемлемыми для практического использования.
- Разработать методы и алгоритмы для генерации биометрических эталонов по изображениям радужки и их последующего сравнения, обеспечивающие характеристики по точности (ошибки первого и второго рода), сравнимые с вводом четырёхзначного пин-кода.
- Создать методы и алгоритмы оценки качества и выявления попыток подделки изображений радужки.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

- Создание, исследование и подбор методов обработки изображений по критериям соответствия задачам выделения элементов радужки и временным ограничениям.
- Исследование и разработка методов выделения признаков с целью создания биометрического эталона и сопряжённых методов сравнения эталонов.
- Создание методов обработки изображений, пригодных для позиционирования при вводе изображений радужки, в том числе на изображениях низкого качества.

- Исследование и разработка методов противодействия подделкам изображений радужки.
- Сбор и разметка базы данных изображений радужки глаза, в которой представлены изображения и последовательности изображений, реализующие приведённые выше задачи.
- Создание тестовых приложений и проведение вычислительных экспериментов по определению работоспособности перечисленных методов с опорой на собранную базу изображений.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Созданы модели радужной оболочки глаза, позволяющие с большой точностью описывать движения её элементов при изменении размеров зрачка;
2. Созданы новые методы выделения области радужки на изображениях, отличающиеся высокой устойчивостью и работающие с низкокачественными изображениями;
3. Разработана система методов выделения, основанная на начальных приближённых оценках с последующими уточнениями;
4. Созданы методы определения качества исходных изображений, найденных областей радужки, эталонов радужки;
5. Разработаны методы распознавания поддельных изображений радужки (определения живости глаза);
6. Разработаны новые методы генерации эталонов радужки;
7. На основании собранной базы данных изображений проведены статистические исследования характеристик радужки и апробация методов.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты, изложенные в диссертации, применены для создания систем ввода и обработки изображений радужной оболочки глаза.

Рекомендации автора, основанные на результатах, представленных в диссертации, использованы при создании международного стандарта на запись и передачу изображений радужки в целях идентификации: «*ISO/IEC 19794-6 Automatic identification. Biometrics. Biometric data interchange formats. Part 6. Iris image data*», а также его российского аналога «*ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-6-2006. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 6. Данные изображения радужной оболочки глаза*».

Система методов и алгоритмов сегментации радужки неоднократно представлялась на международные тесты IREX, проводимых Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST). В тестах 2009 года система заняла первое место по точности сегментации изображения глаза на низкокачественных изображениях и точности распознавания.

Результаты работы реализованы и используются в следующих системах:

- Устройства ввода и распознавания изображений радужки глаза серии IriShield, монокулярное (IriShield USB МК 2120U) и бинокулярное (IriShield USB ВК 2121);
- Бинокулярная система ввода изображений радужки глаза IriMagic;
- Модуль ввода изображений радужки глаза IriHerald;
- Программное обеспечение IrisSDK, предназначенное для разработки систем распознавания по радужке на платформах Intel-x86 и AMD64 под управлением операционных систем Windows и Linux, равно как и отдельно поставляющиеся подсистемы IriCore, IriMatchEnhancer, IriVerifier, IriTemplateGenerator, IriTracker и основанное на IrisSDK серверное решение IriMaster.

Устройство IriShield USB ВК 2121 выбрано и сертифицировано правительством Индии для участия в программе создания биометрических документов UIDAI (Unique Identification Authority of India).

Результаты работы применены в устройствах диагностики функционального состояния человека по зрачковой реакции SM2010 (Iritech), SSAS (Sambon).

Методы исследования. Всесторонне применялись методы обработки изображений: линейная и нелинейная фильтрация; спектральный анализ, в том числе спектры Фурье, Адамара, Уолша, Хаара; вейвлет-преобразования; сегментация изображений методами квадрирования, лесного пожара, итеративной кластеризации; выделение контуров и остовов, в том числе фильтрами Кэнни; пирамидальная обработка; методы главных компонент и линейного дискриминантного анализа; поиск параметрически заданных форм при помощи идеологии преобразования Хафа. При изучении и разработке методов создания и сравнения эталонов радужки применялись методы классификации и анализа данных, такие как метод k -средних, методы кластеризации, дискриминантного и факторного анализа, Адабуст. В задачах, связанных с позиционированием и распознаванием подделок, применялись методы проективной геометрии, метод Виолы-Джонса, спектральный анализ.

Положения, выносимые на защиту.

- Осуществлены исследование и анализ характеристик радужки глаза человека и её изображений как объекта распознавания, представлены статистические характеристики изображений радужки, на их основе разработаны статическая модель изображения радужки и модели движения её элементов.
- Исследована и разработана группа методов обнаружения радужки на изображении и выделения её информативной части, основанных на моделях радужки и полученной статистике, описаны соответствующие алгоритмы и осуществлена их программная реализация, выполнены численные эксперименты с базой изображений радужки, приведены характеристики точности методов, охарактеризованы области их применимости.
- Разработана целостная система алгоритмов поиска и выделения области радужки на изображении, основанная на исследованных методах, выбранных согласно их установленным областям применимости так, что в начале работы системы устанавливаются наиболее общие характеристики радужки, которые затем уточняются на следующих шагах.

- Предложены и программно реализованы методы анализа качества изображений и выделенной на них области радужки с точки зрения точности дальнейшего распознавания, разработано совместное решающее правило для объединения различных показателей качества, предложена методика выбора компромисса между ошибкой отказа в регистрации и ошибкой распознавания.
- Исследованы и разработаны новые методы выделения индивидуальных признаков радужки, создания эталонов радужки, сравнения полученных эталонов с целью идентификации человека.
- Рассмотрена проблема защиты систем распознавания от предъявления поддельных моделей глаза, изучены способы обнаружения таких ситуаций, основанные на различных физических принципах, часть этих способов реализована алгоритмически и программно, осуществлена проверка работоспособности на собранной базе данных поддельных изображений.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 23rd International Congress on High-Speed Photography and Photonics - Москва, 1998; 5th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing - Минск, 1999; International Conference on Computer Vision and Graphics, Graphicon'99 - Москва, 1999; 5-я Международная конференция «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» - Самара, 2000; 6th Open Russian-German Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding - Алтай, 2003; Всероссийская конференция BIOMETRICS 2003 AIA - Москва, 2003; Samsung developers conference - г.Сеул, Республика Корея, 2004; 4-я Международная биометрическая конференция BIOMETRICS AIA «Транспортные и пассажирские системы» - Москва, 2006; 5-я Международная биометрическая конференция BIOMETRICS AIA «Паспортные и правоохранные системы» - Москва, 2006; 7-я Международная биометрическая конференция BIOMETRICS AIA «Транспортные и пассажирские системы» - Москва, 2007; 9th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis, PRIA-9-2008 - Нижний Новгород, 2008; 3rd International Workshop on Image

Mining. Theory and Applications. IMTA-2010 - г.Анже, Франция, 2010; International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing. CGVCVIP-2010 - г.Фрайбург, Германия, 2010; 10th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis, PRIA-10-2010 - С.Петербург, 2010; Международная конференция по прикладной математике и информатике, посвящённая 100-летию со дня рождения академика А.А.Дородницына - Москва, 2010; 11th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing, PRIP-2011 - Минск, 2011; International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, CGVCVIP-2011 - г.Рим, Италия, 2011; Математические методы распознавания образов: 15-я Всероссийская конференция - Петрозаводск, 2011; 4th International Workshop on Image Mining. Theory and Applications. - г. Барселона, Испания, 2013; International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing. CGVCVIP-2013 - г.Прага, Чехия, 2013; 11th International Conference Pattern Recognition and Image Analysis. PRIA-2013 - Самара, 2013; Конференция «Математические методы распознавания образов». ММРО-16 - Казань, 2013; SIAM Conference on Imaging Science. SIAM-IS14 - г.Гонконг, Китай, 2014.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 43 печатных работах, из них 13 статей в журналах из списка ВАК.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объём диссертации 290 страниц, из них 226 страниц текста, включая 70 рисунков и 23 таблицы. Библиография включает 496 наименований на 49 страницах.

Диссертация представляется по специальности 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» и соответствует пункту 7. «Человеко-машинные интерфей-

сы; модели, методы, алгоритмы и программные средства машинной графики, визуализации, обработки изображений, систем виртуальной реальности, мультимедийного общения».

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе рассмотрены вопросы регистрации и предобработки изображений радужной оболочки глаза (РОГ), представлены её модели.

Проанализированы изображения глаз нескольких баз данных, собрана статистика по размерам и форме элементов изображения радужки. Внешний контур радужки (её граница со склерой) постоянен и имеет практически одинаковую форму и размеры для всех людей. Это почти идеальный эллипс, сжатый в вертикальном направлении, с отношением осей около 0.95. Внутренняя граница радужки задаётся зрачком. Зрачок приблизительно круглый (в среднем по популяции — почти идеальный круг). Индивидуальные отклонения по радиусу для 95% людей не превышают 5%, для 1% людей — превышают 10%. Центр зрачка смещён относительно центра радужки по направлению к кончику носа в среднем на $1/15$ радиуса радужки.

На основании анализа баз изображений сформулированы ограничения, обусловленные природой РОГ:

$$\frac{1}{7}r_I < r_P < \frac{3}{4}r_I, \quad d = \|\vec{c}_P - \vec{c}_I\| < r_P, \quad 2(r_I - r_P - d) > r_I - r_P + d, \quad (1)$$

где $\vec{c}_P = (x_P, y_P)$, $\vec{c}_I = (x_I, y_I)$ — центры зрачка и радужки, d — расстояние между ними. А именно, радиус радужки не может более чем в 7 раз превосходить радиус зрачка; радиус зрачка не может превосходить $3/4$ радиуса радужки; центр радужки лежит внутри зрачка; длины двух отрезков, отсекаемых между внутренней и внешней границами радужки на прямой, проходящей через её центр, не могут отличаться более чем в 2 раза.

Радужка может изменять свою форму, при этом её элементы смещаются от своих начальных положений. Поэтому требуются модели, которые учитывают и позволяют скомпенсировать эти движения, с тем, чтобы на двух изображениях радужки, зарегистрированных с разным размером зрачка, сопоставить соответствующие элементы текстуры. Разработаны несколько моделей деформации радужки при изменении размеров зрачка. Высказывая различные модельные предположения об изменении толщины и, соответственно, упругости радужки в зависимости от расстояния до центра зрачка, можно получить различные модели движения её элементов. Экспериментальная проверка этих моделей проводилась на базе данных пупиллометрических изображений Iritech. Наиболее адекватной оказалась модель, полученная в предположении линейной зависимости толщины радужки от расстояния до её центра.

$$A(r) = (r'_P - r_P) \frac{r_P}{r_I - r_P} \left(\frac{r_I}{r} - 1 \right) , \quad (2)$$

где $A(r)$ — смещение элемента радужки в зависимости от начального радиуса, r_P и r'_P — начальный и конечный радиусы зрачка, r_I — радиус радужки.

Исследованы несколько моделей конформного преобразования изображения радужки при движениях зрачка. На основании тестов определена наилучшая модель, проиллюстрированная на Рис. 1. Зрачок совершает движения

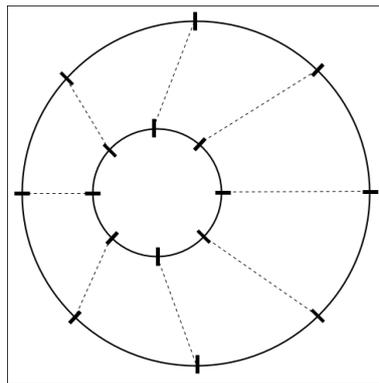


Рис. 1. Модель эквивалентных углов.

таким образом, что все расстояния от точек его границы, отложенных вдоль неё под определённым углом, до соответствующих точек границы радужки, отложенных под тем же углом, меняются пропорционально. Можно объяснить это так: изначально радужка имеет полностью радиально-симметричную форму. При этом точки границы радужки и границы зрачка, имеющие

одинаковые угловые координаты (лежащие на одном радиусе), связаны друг с другом радиальными мышцами-сократителями. Затем зрачок смещается относительно радужки, оставаясь круглым, при этом связи соответственных точек сохраняются, хотя и деформируются. При дальнейших движениях граница зрачка перемещается таким образом, чтобы расстояния между соответственными точками изменялись пропорционально. Такое движение порождает окружности зрачка, полученные при сжимающем отображении плоскости с неподвижной точкой, находящейся на линии, соединяющей центры зрачка и радужки. Поместим начало координат в центр радужки. Тогда окружность радужки описывается уравнением $x^2 + y^2 = r_I^2$. Окружность зрачка описывается уравнением $(x - x_P)^2 + (y - y_P)^2 = r_P^2$. Точка с углом ϕ на окружности радужки имеет координаты $(\cos \phi r_I, \sin \phi r_I)$, точка на окружности зрачка — координаты $(x_P + \cos \phi r_P, y_P + \sin \phi r_P)$. Конформное преобразование задаётся как

$$\begin{aligned} x &= x_P + r_P \cos \phi + T\left(\frac{\rho}{R}(r_I \cos \phi - x_P - r_P \cos \phi)\right) \quad , \\ y &= y_P + r_P \sin \phi + T\left(\frac{\rho}{R}(r_I \sin \phi - y_P - r_P \sin \phi)\right) \quad , \\ R &= \sqrt{(r_I \cos \phi - x_P - r_P \cos \phi)^2 + (r_I \sin \phi - y_P - r_P \sin \phi)^2} \quad , \end{aligned} \quad (3)$$

где $T(r)$ — одна из моделей растяжения, например (2). Экспериментальная проверка адекватности конформных преобразований проводилась методом оценки качества распознавания.

Все существующие в настоящее время методы автоматического распознавания радужки глаза по её изображениям реализуют следующую схему: регистрация изображений глаза; выделение области интереса (радужки) на изображении; оценка качества изображения и качества выделения; вычисление признаков и формирование из них эталона радужки; сравнение двух наборов признаков. Эта последовательность представлена блок-схемой на Рис.2.

Разработаны практические методы пространственной и яркостной калибровок изображений. Для обоих видов калибровки используется модель аппроксимации радиально-симметричными полиномиальными функциями. Обозначим несмещённое расстояние (которое получилось бы при регистрации идеальной системой) U , расстояние, полученное реальной системой — D .

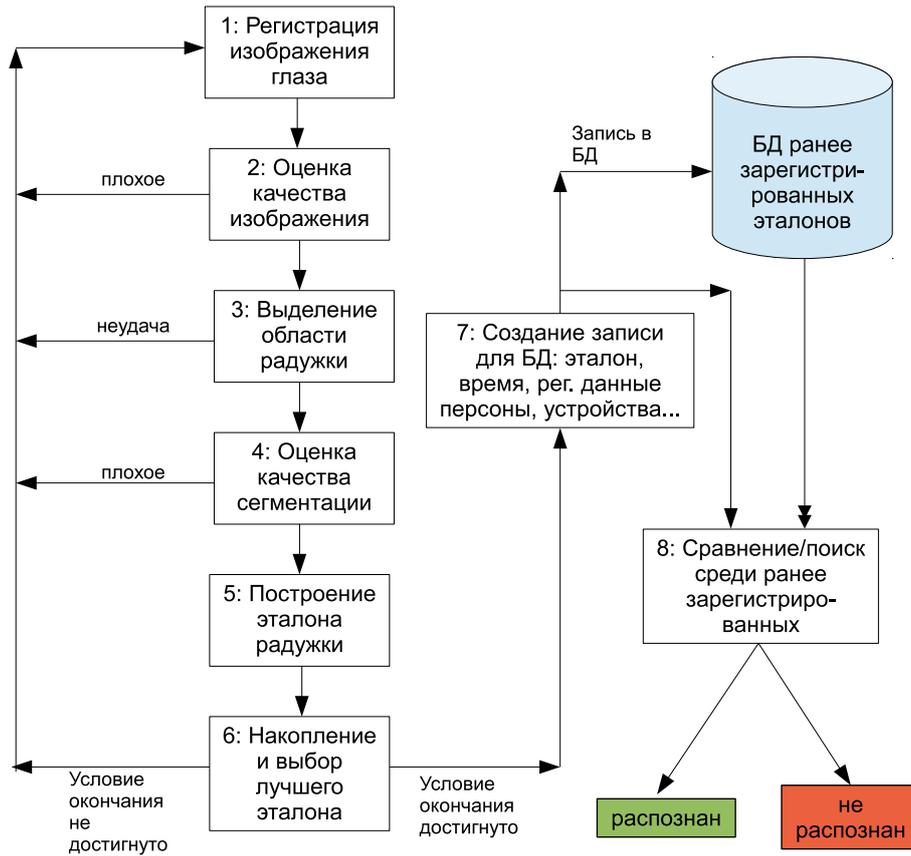


Рис. 2. Схема распознавания по радужке глаза.

Несмещённое расстояние при радиальном искажении может быть получено как

$$U = D \sum_{p=0} k_p D^{2p}. \quad (4)$$

Экспериментально показано, что для компенсации искажения достаточно квадратичного представления, то есть $p \leq 1$. Измеряя расстояния D_i на изображении сетки, и задавая восстановленный вид этой сетки, дающий расстояния U_i , получаем систему уравнений $U_i = D_i (k_0 + k_1 D_i^2)$. Воспользовавшись методом наименьших квадратов, получим коэффициенты калибровки:

$$\begin{aligned} k_0 &= \frac{1}{Z} \left(\sum D_i^3 U_i \sum D_i^4 - \sum D_i U_i \sum D_i^6 \right), \\ k_1 &= \frac{1}{Z} \left(\sum D_i U_i \sum D_i^4 - \sum D_i^3 U_i \sum D_i^6 \right), \\ Z &= \left(\sum D_i^4 \right)^2 - \sum D_i^6 \sum D_i^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Исправление яркостной дисторсии даётся формулой

$$I = B (\alpha + \beta R^4) \quad (6)$$

где B — яркость пиксела зарегистрированного (искажённого) изображения, I — яркость пиксела исправленного изображения, R — расстояние от проекции оптической оси, являющейся центром дисторсии. Если снимать равномерно освещённый фон, то можно считать $I = const$, и можно положить $I = \sum B_i/N$, чтобы суммарная яркость исправленного изображения была равна суммарной яркости исходного. Взяв значения яркости в пикселах изображения и их расстояние до центра дисторсии, получим решение:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{NZ} \sum B_i \left(\sum B_i \sum B_i^2 R_i^8 - \sum B_i R_i^4 \sum B_i^2 R_i^4 \right) , \\ \beta &= \frac{1}{NZ} \sum B_i \left(\sum B_i^2 \sum B_i R_i^4 - \sum B_i \sum B_i^2 R_i^4 \right) , \\ Z &= \sum B_i^2 \sum B_i^2 R_i^8 - \left(\sum B_i^2 R_i^4 \right)^2 . \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты первой главы опубликованы в работах [18, 20, 24, 26].

Во второй главе рассматриваются методы выделения области радужки на изображении, основанные на различных принципах. Признаки, по которым происходит выделение можно разбить на такие классы как: яркостная область; текстурная область; границы области. По методу факторизации (выделения) искомой информации можно разбить на: проекционные методы; методы Хафа; контурные методы. Поскольку область радужки на изображении представляет собой кольцо, методы поиска в основном сводятся к обнаружению её границ — окружностей или кругов зрачка и самой радужки. Во всём многообразии методов поиска окружностей и кругов рассматривались методы, обладающие высоким быстродействием и устойчивостью к шумам.

Используется понятие пикселя-кандидата \vec{k} и множества кандидатов K . Кандидаты — это пиксели изображения, которые с большой вероятностью могут принадлежать искомому объекту. Большинство созданных методов реализует двухшаговую схему поиска объектов. На первом шаге выделяются кандидаты, на втором происходит объединение кандидатов в наборы, могущие соответствовать искомому объекту (построение гипотез) и выбор максималь-

но правдоподобной гипотезы. Конкретный вид шагов задаётся в соответствии с решаемой задачей.

Проекционные методы обладают высоким быстродействием за счёт уменьшения размерности пространства поиска. Многомерное исходное пространство отображается (проецируется) в пространство или несколько пространств меньшей размерности, что для изображений означает вычисление одной или нескольких одномерных функций-проекций по двумерному исходному сигналу. Признаки исходного сигнала могут иметь различную природу, быть яркостными, граничными, текстурными. Исполнение проекционного метода состоит из следующих шагов: выделение кандидатов, проекции в одномерные пространства, обработка проекций. Каждый из этих шагов видоизменяется в зависимости от природы детектируемого объекта и используемых для этого элементарных признаков изображения.

Наиболее простым является использование **проекций яркости**. Такой метод обнаруживает на изображении тёмную область. Выделение множества кандидатов происходит бинаризацией по порогу:

$$K = \left\{ \vec{k} : I(\vec{k}) < T \right\} , \quad (8)$$

где $I(\vec{p})$ — яркость изображения (функция двумерного дискретного аргумента \vec{p}), T — порог бинаризации. Проекция на горизонтальную ось (одномерный массив):

$$\Pi(x) = \left| \vec{k} : k_x = x \right| . \quad (9)$$

Координата центра зрачка (радужки) по оси абсцисс ищется как положение максимума проекции: $x_P = \arg \max \Pi(x)$.

Метод **круговых проекций градиентов яркости** обнаруживает на изображении круг, при условии, что известны координаты некоторой точки, принадлежащей ему. Метод основан на анализе гистограмм — круговых проекций локальных градиентов яркости. Входными данными метода служат растровые монохромные изображения. Обозначим: $\vec{c} = (c_x, c_y)^T$ — известная точка, лежащая внутри искомого круга. Далее для простоты начало координат переносится в эту точку. $\vec{p} = (p_x, p_y)^T$ — вектор координаты точки на изображении $b(\vec{p})$ — яркость изображения в заданной точке, $\vec{g}(\vec{p}) = (g_x, g_y)^T =$

$\nabla b(\vec{p})$ — градиент яркости. Распределение градиента — число точек, имеющих величину градиента не больше заданной: $H(G) = |\{\vec{z} : \|\vec{g}(\vec{z})\| \leq G\}|$, где $\|\cdot\|$ — евклидова норма вектора, $|\cdot|$ — мощность множества. Используются точки, величина градиента в которых входит в верхнюю часть этого распределения, т.е. удовлетворяющие условию

$$H(\|\vec{g}(\vec{x})\|) \geq (1-l)N, \quad (10)$$

где N — число пикселей изображения, $l \in (0; 1)$ — доля распределения, в которую попадают кандидаты. Поскольку контуры зрачка и радужки имеют приблизительно круглую форму, векторы градиентов яркости в точках этих границ лежат на прямых, проходящих близко к центру, а точнее, на прямых, образующих малый угол с направлением из точки на центр. Учитывая перенос начала координат, градиенты яркости в точках границы должны удовлетворять условию

$$\phi = \arccos \frac{\vec{g}(\vec{x}) \cdot \vec{x}}{\|\vec{g}(\vec{x})\| \|\vec{x}\|} < T_\phi. \quad (11)$$

Величина T_ϕ — пороговый угол. Таким образом, кандидаты выбираются как пиксели, удовлетворяющие условиям (10) и (11). Вычисляется круговая проекция множества кандидатов относительно центра:

$$\Pi(r) = \frac{|\{\vec{x} : r - 0.5 \leq \|\vec{x}\| < r + 0.5, \vec{x} \in K\}|}{|\{\vec{x} : r - 0.5 \leq \|\vec{x}\| < r + 0.5\}|}. \quad (12)$$

Проекция делается отдельно для четырех квадрантов, на которые плоскость делится прямыми $x = y$ и $x = -y$: левого, правого, верхнего и нижнего. Окружности с центрами, близкими центру проекции, (например, зрачок или радужка) дают два локальных максимума на круговой проекции, см Рис.3.

Комбинируя положения максимумов, можно получить координаты центров $\vec{c} = (c_x, c_y)^T$, радиусы ρ и показатели качества Q этих окружностей:

$$p_x^{n,m} = \frac{1}{2} \left(\arg \operatorname{loc} \max_{n,r} \Pi_R(r) - \arg \operatorname{loc} \max_{m,r} \Pi_L(r) \right),$$

$$p_y^{u,v} = \frac{1}{2} \left(\arg \operatorname{loc} \max_{u,r} \Pi_T(r) - \arg \operatorname{loc} \max_{v,r} \Pi_B(r) \right),$$

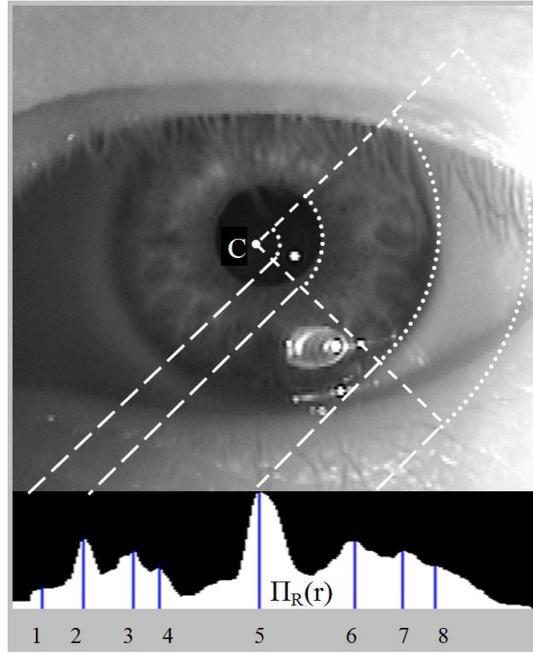


Рис. 3. Пример круговой проекции и положений локальных максимумов

$$\rho^{n,m,u,v} = \frac{1}{4} \left(\arg \operatorname{loc} \max_{n,r} \Pi_R(r) + \arg \operatorname{loc} \max_{m,r} \Pi_L(r) + \right. \\ \left. \arg \operatorname{loc} \max_{u,r} \Pi_T(r) + \arg \operatorname{loc} \max_{v,r} \Pi_B(r) \right) , \quad (13)$$

$$Q_{n,m,u,v} = \operatorname{loc} \max_{n,r} \Pi_R(r) + \operatorname{loc} \max_{m,r} \Pi_L(r) + \\ \operatorname{loc} \max_{u,r} \Pi_T(r) + \operatorname{loc} \max_{v,r} \Pi_B(r) .$$

Выбирается окружность с максимальным качеством.

Метод проекций градиента используется также для поиска пары приблизительно концентрических окружностей — границ зрачка и радужки. Строятся различные гипотетические окружности зрачка и радужки. Обозначим окружности их через параметры — координаты центра и радиус: (x_P, y_P, r_P) и (x_I, y_I, r_I) . На основе круговых проекций с учётом полученных эмпирических взаимных ограничений на параметры радужки (1) построен метод совместного одновременного определения зрачка и радужки как приблизительно концентрическим контуров. Из всех пар окружностей, удовлетворяющих условиям (1), выбирается такая, сумма показателей качества компонент которой максимальна.

Радиальные проекции градиента яркости используются для определения видимых границ радужки. Градиенты яркости пикселей границы радужки должны удовлетворять (10) и (11). Такое утверждение справедливо только

в случае, если граница радужки видна на изображении, т.е. не затенена веками, ресницами или бликами. Выход градиента яркости за эти ограничения свидетельствует о том, что граница радужки искажена или закрыта посторонним объектом. Суть используемого метода состоит в анализе направления градиента яркости вдоль границы радужки и поиске областей, где происходит существенное нарушение его поведения. Радиальная проекция определяется как количества точек-кандидатов в секторах:

$$P(\Phi) = \frac{|\{\vec{x} : \vec{x} \in R, \phi(\vec{x}) \in [\Phi - \delta\phi; \Phi + \delta\phi], \vec{x} \in K\}|}{|\{\vec{x} : \vec{x} \in R, \phi(\vec{x}) \in [\Phi - \delta\phi; \Phi + \delta\phi]\}|}, \quad (14)$$

где $R = \{\vec{x} : 0.9r_I < \|\vec{x}\| < 1.1r_I\}$ — кольцо, покрывающее границу радужки, $\phi(\vec{x})$ — угловая координата точки \vec{x} , $\delta\phi$ — шаг дискретизации при построении проекции. Точки проекции (сегменты кольца, покрывающего внешнюю границу радужки) классифицируются на содержащие и не содержащие видимую границу при помощи порога. Проекции приписывается значение 0 в точках, соответствующих видимому сегменту границы радужки, и 1, если данный участок границы распознан как закрытый. Обработанная проекция представляет собой последовательность нулей и единиц, где единицы стоят на позициях, соответствующих закрытым участкам границы радужки. Области радужки в преобладающем большинстве случаев закрыты веками. На изображении строятся хорды, стягивающие концы последовательностей единиц в проекции, отсекаемые этими хордами сегменты считаются закрытыми. На Рис. 4 представлен пример работы алгоритма.

Большой класс алгоритмов использует **методологию Хафа**. Для фигуры F из определённого класса задаётся её параметрическое представление Φ вектором параметров $\vec{t}: F \xleftrightarrow{\Phi} \vec{t}$. Например, одно из параметрических представлений окружности: $\Phi = \{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2\}$, вектор параметров $\vec{t} = (x_0, y_0, r)$. На изображении фигура отображается во множество пикселей: $F \xleftrightarrow{\Phi} \{\vec{p}_i\}$, где \leftrightarrow — отношение «один ко многим». Поиск на изображении всех фигур данного класса производится следующим образом. Выбираются *кандидаты* $\{\vec{q}_j\}$, которые могут принадлежать таким фигурам. В рассматриваемых задачах это пиксели с высоким градиентом яркости, также возможно использование других признаков. Каждый кандидат \vec{q} может принадлежать

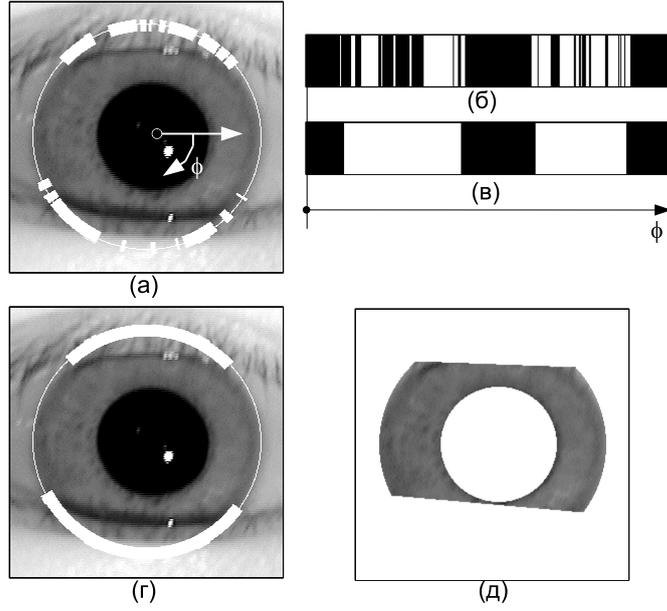


Рис. 4. Пример работы алгоритма определения затенения радужки. (а) - исходное изображение, отмечена граница радужки и сегменты, в которых определены нарушения граничных условий, также указана полярная система координат; (б) - циклическая последовательность, белые элементы соответствуют белым участкам на (а); (в) - последовательность после удаления шумов; (г) - отображение последовательности (в) на исходном изображении; (д) - полученная область радужки без затенений.

одной или несколькими гипотетическим фигурам F_k заданного класса: $\vec{q} \in F_k$, $F_k \xleftrightarrow{\Phi} \{\vec{x}_{i_k}\} \exists i_k : \vec{x}_{i_k} = \vec{q}$. Можно записать: $\vec{q} \xleftrightarrow{\Phi^{-1}} \{F_k\}$, учитывая соответствие фигуры и её параметров $\vec{q} \xleftrightarrow{\Phi^{-1}} \{\vec{p}_k\}$. Таким образом, каждый пиксель-кандидат порождает набор точек в пространстве параметров, что можно представить в виде индикаторной функции:

$$v(\vec{q}, \vec{p}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \vec{p} \in \{\vec{p}_k\} \xleftrightarrow{\Phi^{-1}} \vec{q}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

Пространство \vec{p} называется *аккумулятором*, а построение функции $v(\vec{q}, \vec{p})$ — *голосованием*. Преобразование Хафа заключается в том, что для каждого кандидата помечаются соответствующие точки аккумулятора, что эквивалентно вычислению и суммированию функций-индикаторов:

$$V(\vec{p}) = \sum_{q_j} v(\vec{q}_j, \vec{p}) . \quad (16)$$

Точка аккумулятора, получившая наибольшее количество голосов, т.е. мак-

симум $p^* = \arg \max_{\vec{p}} V(\vec{p})$, отвечает наилучшему найденному положению фигуры заданного класса на изображении. В случае поиска нескольких фигур рассматривается не единственный глобальный максимум аккумулятора, а несколько локальных. Перед поиском максимумов аккумулятор обрабатывается фильтром низкой частоты. Исследовано и разработано несколько модификаций метода.

Непосредственный поиск трёх параметров (координат центра и радиуса окружности) голосованием в трёхмерном аккумуляторе:

$$v(\vec{q}, \vec{p}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \|\vec{p}' - \vec{q}\| = p_3^2, \\ 0, & \text{otherwise}, \end{cases} \quad (17)$$

где \vec{p}' — двумерный вектор, составленный из первых двух координат трёхмерного вектора \vec{p} , соответствующих координатам центра окружности, p_3 — третья координата этого вектора, соответствующая радиусу. Фактически, в трёхмерном пространстве \vec{p} для каждого фиксированного значения p_3 в плоскости (p_1, p_2) проводится окружность, индикаторная функция $v(\vec{q}, \vec{p})$ представляет собой конус в пространстве параметров с вершиной в точке $(q_1, q_2, 0)$ и осью в направлении p_3 .

При использовании информации о **направлении градиента яркости** в пикселе-кандидате возможно сократить индикаторную функцию до единственной точки, находящейся в направлении градиента яркости:

$$v(\vec{q}, \vec{p}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \vec{p}' = p_3 \vec{g} + \vec{q}, \\ 0, & \text{otherwise}, \end{cases} \quad (18)$$

где \vec{g} — градиент яркости в точке \vec{q} . Индикаторное множество из конуса сокращается до одной из его образующих, проходящих в направлении, задаваемом градиентом яркости.

Возможно **сократить размерность аккумулятора** до двух, исключив в предыдущем методе координату p_3 , отвечающую за радиус искомой окружности. В этом случае голосование осуществляется не проведением лу-

ча в трёхмерном пространстве, а построением его проекции в двумерном:

$$v(\vec{q}, \vec{p}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \vec{p}' = r\vec{g} + \vec{q}, r > 0, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

На Рис.5 и Рис.6 представлен пример работы алгоритма, использующего направление градиента и двумерный аккумулятор.



Рис. 5. *a* — пример исходного изображения глаза; *б* — карта точек-кандидатов

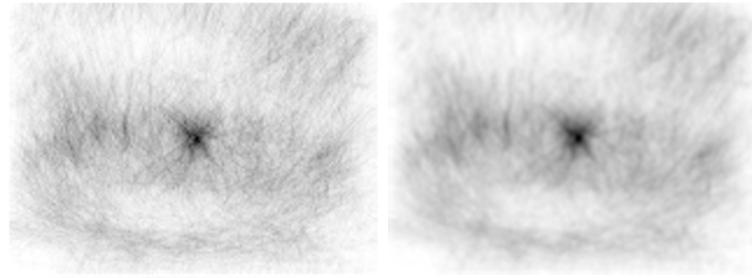


Рис. 6. *a* — аккумулятор, полученный из Рис.5а при голосовании (19); *б* — сглаженный аккумулятор

Существенное расширение разнообразия алгоритмов, охватываемых методологией Хафа достигается, если кандидатами при голосовании являются не пиксели, а более сложные объекты. Среди таких подходов можно выделить использование пар и троек точек.

Рассмотрим **пару пикселей-кандидатов** $Q = \{\vec{q}_1, \vec{q}_2\}$. Центры гипотетических окружностей, проходящих через них, лежат на срединном перпендикуляре к соединяющему их отрезку, и голосование производится как:

$$v(Q, \vec{p}) = \begin{cases} 1, & \text{if } (\vec{q}_2 - \vec{q}_1) \cdot \vec{p} = \frac{1}{2} (\vec{q}_2 + \vec{q}_1) \cdot \vec{p}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

Однако, проводить голосование для всех пар кандидатов нецелесообразно. Отбросить пары кандидатов, не могущие соответствовать окружности, поз-

воляет анализ направлений градиентов. Один из способов — **метод парных градиентов**, в котором рассматриваются пары точек, лежащих на противоположных сторонах окружности, т.е. являющихся концами её диаметра. В таких точках векторы градиента яркости направлены в противоположные стороны и коллинеарны отрезку их соединяющему (т.е. гипотетическому диаметру). С учётом погрешности вычислений, можно записать следующие условия для кандидатов:

$$\begin{aligned}
\|\vec{g}(\vec{q}_1)\| &> T_g , \\
\|\vec{g}(\vec{q}_2)\| &> T_g , \\
\angle(\vec{g}(\vec{q}_1), \vec{q}_1 - \vec{q}_2) &< T_\varphi , \\
\angle(\vec{g}(\vec{q}_2), \vec{q}_1 - \vec{q}_2) &< T_\varphi , \\
\vec{g}(\vec{q}_1) \cdot \vec{g}(\vec{q}_2) &< 0 .
\end{aligned} \tag{21}$$

Здесь первые два условия выбирают точки с высоким градиентом яркости. Вторые два условия задают приблизительную коллинеарность вектора градиента яркости гипотетическому диаметру с точностью до порога T_φ , определяемого погрешностью вычисления градиента. Последнее — условие на разнонаправленность векторов градиентов. Голосование производится в единственной точке — центре гипотетической окружности, лежащей посередине между \vec{q}_1 и \vec{q}_2 :

$$v(Q, \vec{p}) = \begin{cases} 1, & \text{if } p = \frac{1}{2} (\vec{q}_1 + \vec{q}_2) , \\ 0, & \text{otherwise} . \end{cases} \tag{22}$$

Перебор троек точек или *триангуляция* похожа на метод парных градиентов. Условия выбора точек при триангуляции аналогичны (21), с учётом того, что углы между направлениями градиентов яркостей составляют $2\pi/3$, так чтобы тройки точек образовывали приблизительно равносторонние треугольники (что даёт наилучшую точность определения центра). На Рис. 7 представлен пример работы алгоритма триангуляции.

Для задач поиска точных границ (уточнения имеющихся) обосновано применение методов построения оптимального пути, доказано, что их преимущество по сравнению с итеративными методами адаптивных контуров. **Метод оптимального кругового пути** (ОКП) строит замкнутый контур вокруг заданной точки, оптимальный в смысле минимизации некоторого функционала. Значение функционала складывается из *внутренней* и *внешней*

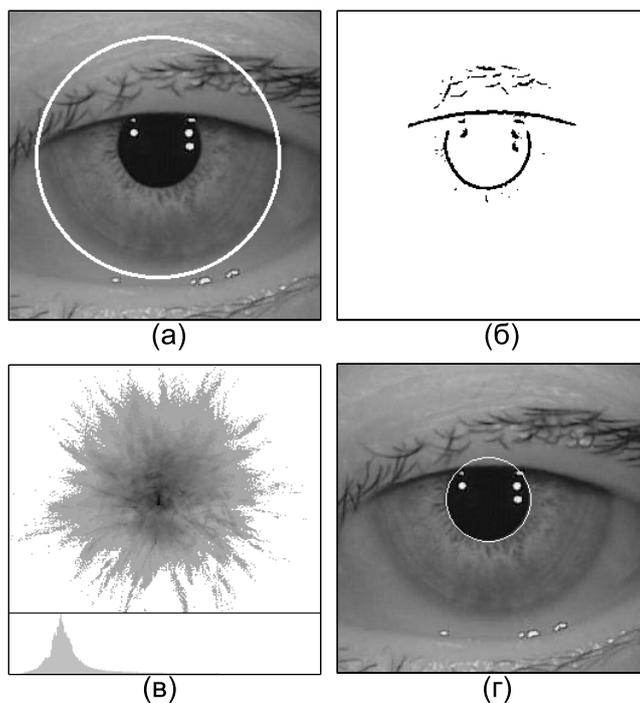


Рис. 7. Пример работы алгоритма поиска зрачка методом триангуляции. (а) — исходное изображение с приблизительно найденной базовой границей радужки; (б) — точки-кандидаты; (в) — аккумуляторы положения центра $A_c(\vec{q})$ и радиуса $A(\rho)$; (г) — найденная окружность зрачка.

энергий. Внутренняя энергия задается формой контура, ее негладкостью и отличием от окружности с центром в заданной точке. Внешняя энергия определяется характеристиками изображения в точках контура. При поиске контура границы между областями разной яркости внешняя энергия максимальна в точках без градиента яркости (т.е. не граничных) и убывает с ростом градиента в направлении, перпендикулярном локальному участку контура. Таким образом, метод ОКП ищет контур, близкий к окружности, проходящий по границе областей.

Задача поиска ОКП посредством конформного преобразования формулируется как задача нахождения оптимального пути между левой и правой сторонами прямоугольника при условии, что начальные и конечные точки пути имеют одинаковую ординату. Вводится стоимость перехода между соседними точками (n, ρ') и $(n + 1, \rho'')$ из соседних столбцов раstra: $C((n, \rho'), (n + 1, \rho'')) \equiv C_n(\rho', \rho'')$. Эта стоимость состоит из *внешней* и *внутренней* частей: $C = C^{(I)} + C^{(O)}$, представляющих внешнюю и внутренние энергии. Внутренняя часть определяется формой кривой и минимальна для прямых горизонтальных линий на растре полярного представления (соответствующих

окружностям в исходном пространстве OXY):

$$C_n^{(I)}(\rho', \rho'') = \begin{cases} 0, & \rho' = \rho'' , \\ T_1, & |\rho' - \rho''| = 1 , \\ \infty, & |\rho' - \rho''| > 1 . \end{cases} \quad (23)$$

Величина $T_1 > 0$ является параметром, который определяет «силу», стягивающую контур к прямой горизонтальной линии (т.е. окружности в исходном пространстве), и зависит от параметров полярного преобразования. Внешняя часть есть цена прохода через точку (n, ρ') раstra, определяемая локальными свойствами изображения так, чтобы быть малой в точках, соответствующих контуру, и большой в других. Цена прохода через точку, в которой выполняются условия (11), равна нулю, через остальные точки – равна T_1 .

Для заданного пути $S = \{\rho_n\}_{n=1}^W$ общая стоимость

$$C(S) = C((0, \rho_0), (W, \rho_W)) = \sum_{n=1}^W C_n(\rho_n, \rho_{n+1}). \quad (24)$$

Оптимальный контур – последовательность, минимизирующая общую стоимость: $S^* = \arg \min_S C(S)$.

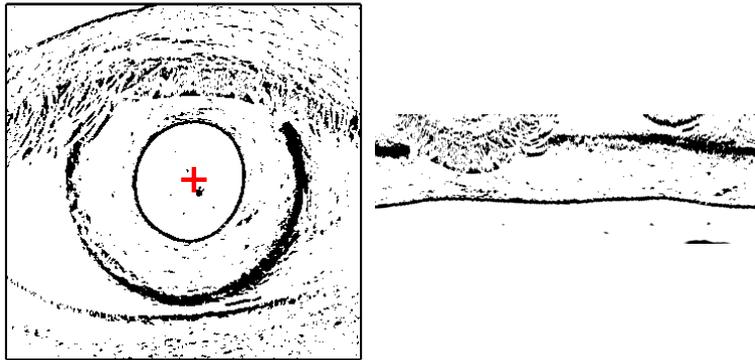


Рис. 8. Пример изображения с пикселями-кандидатами и его полярного преобразования.

Поскольку алгоритм ОКП применяется для уточнения уже найденного первоначального приближения, то он работает в области изображения, являющейся достаточно узким кольцом, построенным вокруг приближающей контур окружности. В такой постановке полный перебор оказывается быстрее за счет малых накладных расходов.

Методы, представленные во второй главе опубликованы следующих работах: [3, 4, 7, 10–13, 21, 22, 27, 32, 36, 38].

В третьей главе представлена система методов для обнаружения и сегментации радужки на изображении глаза. Входными данными являются изображения, используемые в современных системах распознавания, на выходе получают координаты внешней и внутренней границ области радужки и битовая маска, определяющая пиксели области радужки или решение, что радужка приемлемого качества на изображении отсутствует. Работа системы начинается с приближенного определения положения центра глаза, затем следует приближенное определение внешней и внутренней границ радужки. Если одна из этих границ не найдена, производится дополнительная попытка поиска с помощью альтернативного алгоритма. Окончательные точные границы радужки определяются на последних шагах специально разработанными методами.

Область радужки ограничена двумя приблизительно концентрическими контурами, близкими к окружностям, которые являются её внутренней и внешней границами. Здесь и далее граница областей зрачка и радужки называется *внутренней границей* или *границей зрачка*, граница областей радужки и склеры называется *внешней границей* или просто *границей* радужки. Как правило, граница зрачка видна полностью. Граница радужки обычно частично закрыта (затенена) ресницами и/или веками. Следует различать истинные (открытые лишь частично) и видимые границы области радужки. Форма истинных границ близка к окружности, и на начальных шагах сегментации видимые границы также предполагаются окружностями, а затенения рассматриваются как шумовые помехи. На конечных шагах происходит выделение именно этих, более тонких, особенностей границ.

Наиболее общим свойством радужки является положение приближённо совпадающего центра двух граничных окружностей, а значит, самая общая задача сегментации радужки на первом шаге – поиск этого центра. Следует отметить, что радиусы или иные размеры области радужки являются уже следующей ступенью конкретизации, и на этом шаге не определяются. Отказ от определения радиуса (т.е. перенесение этого вычисления на следующие шаги) позволяет задействовать при поиске обе приблизительно концентрические

границы радужки. Для определения положения центра глаза используется модификация метода Хафа.

Следующим шагом после определения положения центра может быть определение радиуса зрачка. Этот подход используется в работах, где сегментация радужки начинается с определения центра глаза. Однако такой путь не является общим и не будет эффективно работать на широком классе изображений радужки и условий регистрации. Определённому центру соответствуют две окружности (внутренняя и внешняя границы), поэтому метод, пытающийся найти единственную окружность, обнаружит одну из них, в качестве, например, внутренней, но нет гарантий, что она действительно будет внутренней. Иными словами, может произойти ложное обнаружение. Такое ложное обнаружение внешней границы в качестве внутренней с большой вероятностью происходит на изображениях с низким контрастом и большим деформированием границы зрачок-радужка и высоким контрастом границы радужка-склера. Исходя из этих соображений, предпочтительно следующим шагом сегментации сделать совместный поиск обеих окружностей. Здесь и далее этот шаг и метод его реализующий будут называться определением *базовых радиусов*, поскольку вычисляются приближённые (базовые) радиусы зрачка и радужки по отношению к приближённо найденному центру глаза. Этот метод основан на круговых проекциях градиента.

В применяемом методе определения базовых радиусов возможны четыре разных результата определения базовых радиусов: оба радиуса (и зрачка, и радужки) определены, определён лишь радиус зрачка, определён лишь радиус радужки, не определён ни один радиус. Последний вариант обозначает отсутствие подходящих контуров с центром приблизительно в заданной точке, то есть отсутствие глаза на изображении; в этом случае алгоритмическая схема прекращает работу. Первый (и лучший) вариант обозначает, что на изображении достоверно найдены приближённые внутренняя и внешняя границы радужки, которые могут быть уточнены на следующем шаге. Два промежуточных варианта, в которых найдена лишь одна из двух окружностей, возникают обычно на изображениях с дефектами: плохим контрастом, высоким шумом, сильным затенением радужки веками и ресницами. Такие изображения не подходят для задач распознавания. Тем не менее, эти изобра-

жения также необходимо обрабатывать и выделять на них область радужки, например для задач слежения. Для доопределения недостающего контура используются два метода: для получения границы зрачка по известной границе радужки и наоборот. Метод, используемый для определения радужки по известному зрачку, аналогичен методу базового радиуса и также использует круговые проекции. Для доопределения границы зрачка по известной границе радужки выбран метод, основанный на триангуляции, то есть определении центра окружности по тройкам точек, предположительно лежащих на ней.

После определения аппроксимирующих окружностей оба контура уточняются. Уточнение границы зрачка производится методом оптимального кругового пути. Уточнение границы радужки представляет собой отсечение областей, занятых веками и ресницами и производится с помощью анализа направлений градиентов в точках границы радужки. Блок-схема системы методов представлена на Рис.9.

Каждый пронумерованный блок представляет один из шагов последовательности исполняемых алгоритмов, описанных выше. Имя используемого метода дано в скобках. Всего есть шесть шагов (не каждый из которых исполняется на каждом отдельном изображении), которые используют пять различных методов. Успешное обнаружение и сегментация радужки происходит в результате исполнения трёх возможных последовательностей: 1 – 2 – 5 – 6, 1 – 2 – 3 – 5 – 6 и 1 – 2 – 4 – 5 – 6. В блоках 1 – 4 процесс выделения области радужки может прерываться с выдачей заключения «глаз не найден». Это случается, когда качество найденной характеристики признаётся недостаточным. В блоках 5 и 6 прерывания процесса сегментации не происходит. Если качество уточнённых признаков, найденных на этих шагах, признаётся неудовлетворительным, используются варианты признаков, найденные на предыдущих шагах (т.е. уточнения не происходит), при этом итоговое качество сегментации занижается.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [10, 12].

В четвёртой главе представлены методы оценки качества выделения радужки на изображении.

Достаточно часто изображение глаза является малоконтрастным, шумным, или по иным причинам не содержит достаточно хорошей текстуры ра-

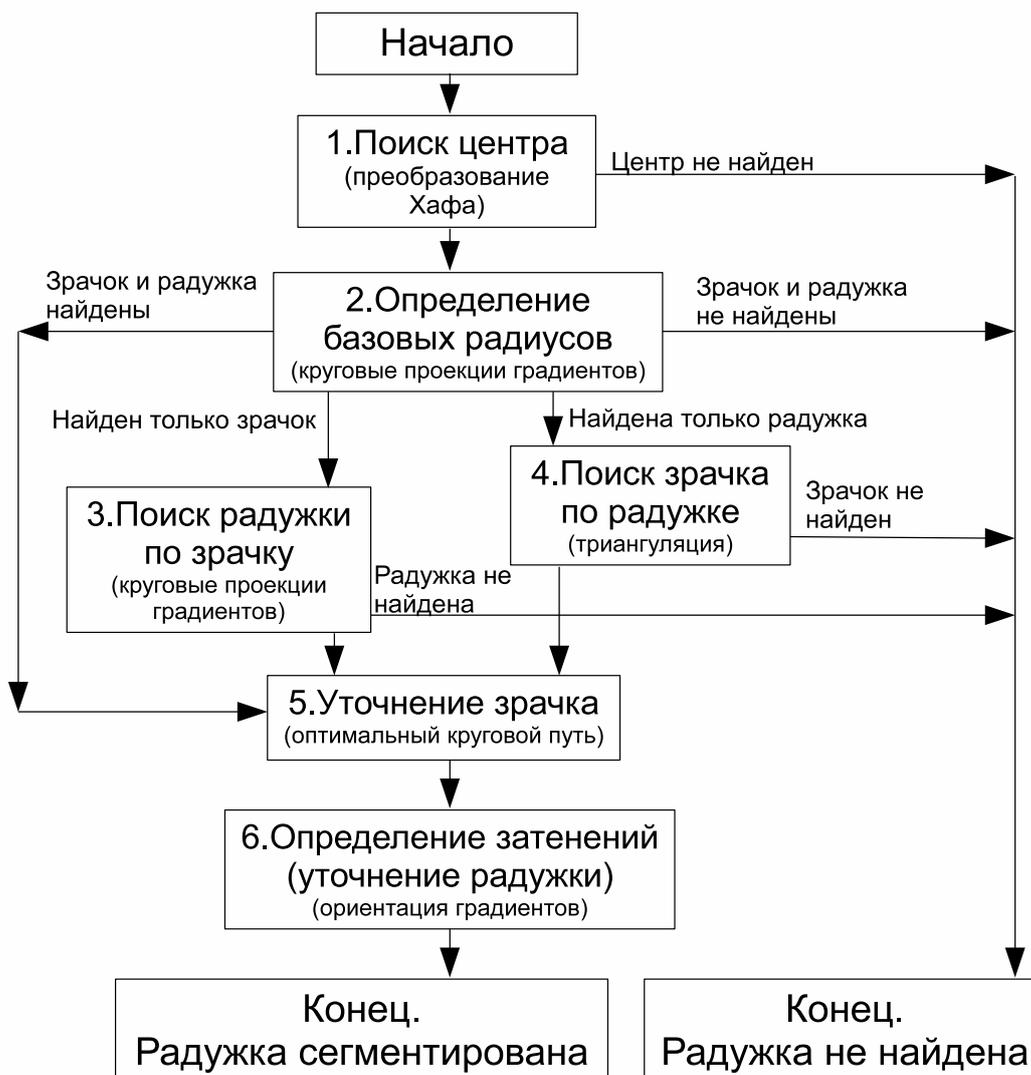


Рис. 9. Блок-схема системы методов.

радужки. При этом на таком изображении может быть выделена область радужки и формально получен биометрический эталон. На Рис.10 показаны примеры изображений одной последовательности с различным качеством. Такой эталон будет порождать большое количество ошибок распознавания. Поэтому оценка качества используемых изображений, найденных характеристик радужки глаза и полученных в результате биометрических эталонов является важным вопросом. Методы оценки качества можно классифицировать по природе оцениваемых признаков на: яркостные, оперирующие с непосредственными значениями яркостей пикселей изображения; пространственные, оценивающие размер и положение найденных объектов; морфологические, опирающиеся на их форму; методы, определяющие и оценивающие условия регистрации изображений; методы оценки полученных эталонов.

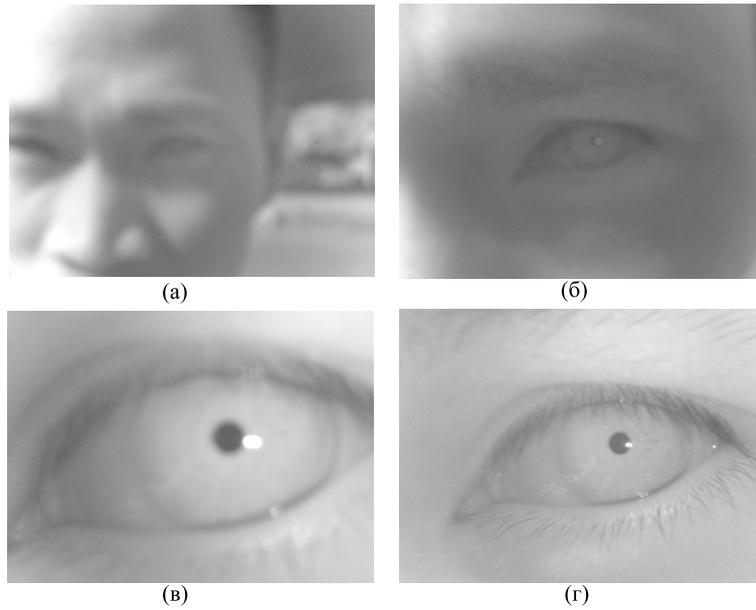


Рис. 10. Изображения одной последовательности с различным качеством: (а) — не-глаз, алгоритмы сегментации не обнаружили глаз; (б, в) — глаза плохого качества, алгоритмы сегментации выделили область радужки, но она отбракована методами оценки качества; (г) — глаз, принятый к распознаванию.

К группе яркостных относятся методы, оперирующие с непосредственными значениями яркостей пикселей изображения. Важной характеристикой изображения в этом случае является *гистограмма яркостей*, которая строится по некоторой области Ω на изображении:

$$h_{\Omega}(B) = |\vec{x} : b(\vec{x}) = B, \vec{x} \in \Omega| \quad (25)$$

Формы областей выбраны экспериментально с использованием баз изображений.

Разработаны следующие яркостные критерии качества изображения: плотность спектра значимых яркостей; величина контраста яркостей на границах; информационная ёмкость. Назовём *плотностью яркостного спектра области* Ω число ненулевых элементов гистограммы яркостей (25):

$$P_{\Omega} = |B : h_{\Omega}(B) \neq 0| \quad (26)$$

Заданный уровень яркости считается *значимым*, если точек с таким уровнем насчитывается не меньше чем половина количества точек с соседними яркостями: $h(X) > 0.5h(X + 1)$ или $h(X) > 0.5h(X - 1)$. Итоговое значение

плотности вычисляется как количество значимых уровней яркости:

$$S = |B : h(B) > 0.5h(B + 1) , h(B) > 0.5h(B - 1)| \quad (27)$$

Информационная ёмкость оценивалась как степени сжатия конформно преобразованной области радужки распространёнными алгоритмами архивации изображений JPEG, JLS, а также как энтропия:

$$V = - \sum p(b) \log(p(b)) , \quad (28)$$

где p_i — доля пикселей с яркостью b в выбранной области. Показано, что степени сжатия являются хорошим критерием качества изображения радужки.

Сами методы оценки качества необходимо также оценивать с точки зрения их полезности для работы системы в целом. Основным подходом к оценке методов отбраковки служит использование точности работы системы распознавания. Метод заключается в следующем. Пусть необходимо определить результативность использования отбраковки по численному показателю качества $Q(I)$; это может быть один из вышеописанных отдельных показателей или их комбинация. Составляется некоторая тестовая база данных, включающая в себя изображения нескольких людей, зарегистрированные в различных условиях. В приложениях имеет смысл брать данные, непосредственно получаемые разрабатываемым устройством биометрической регистрации. По группе изображений генерируется база эталонов и производится перекрёстное сравнение, в результате которого определяются ошибки распознавания. Значение ошибки распознавания, полученное на совокупности изображений без отбраковки, определяется как *базовое*, обозначим его E_0 . Далее моделируется работа системы, использующей показатель качества $Q(I)$ с порогом T_Q , то есть для всех изображений базы вычисляется значение показателя и из базы удаляются все изображения I , для которых $Q(I) < T_Q$. Для полученной подгруппы изображений таким же образом рассчитывается ошибка распознавания. Значение ошибки распознавания зависит от порога: $E(T_Q)$. Также от порога зависит доля изображений, удалённых из базы данных $S(T_Q)$. Варьируя значение T_Q , можно построить параметрическую кривую зависимости ошибки классификации от доли отброшенных изображений, см. Рис.11.

Не все эталоны вносят одинаковый вклад в создание ошибок. Как правило, существуют эталоны для которых все сравнения с чужими дают расстояние большее некоторого порога, а все сравнения со своими — меньшие. Назовём это *полной разделяемостью*. Также существуют эталоны, для которых ни при каком пороге разделяемости нет, то есть при каждом выбранном значении порога существуют сравнения с чужими, дающие расстояние меньше этого значения (ошибка второго рода) и/или сравнения со своими, дающие расстояние больше этого значения (ошибка первого рода). Минимальную по всем значениям порога сумму ошибок первого и второго рода назовём *индексом спутанности*. Можно выделить в базе подмножество эталонов, для которых полная разделяемость достигается при некотором одинаковом для всех пороге, а значит, исключая эталоны, не входящие в это подмножество, из сравнения, можно снижать число ошибок классификации, вплоть до полной разделяемости. Однако может оказаться, что полная разделяемость достигается лишь при исключении неприемлемо большой доли эталонов. Поэтому, возникает задача исключить лишь некоторое число эталонов при этом максимально снизив ошибку. Быстрее всего ошибка уменьшается при исключении эталонов с высокими значениями индекса спутанности. Используя таблицу попарных сравнений, можно вычислить все индексы спутанности и далее последовательно исключать эталоны с высокими значениями, до достижения необходимой точности или доли исключённых эталонов. Таким образом, можно построить кривую зависимости ошибки распознавания от доли отброшенных изображений $E(S)$.

Эта кривая аналогична параметрической кривой $(S(T_Q), E(T_Q))$, которая строится для показателя качества. Использование таблицы попарных сравнений и выбор эталонов (а значит, изображений) с максимальными индекса спутанности является идеальным «предсказателем», позволяющим уменьшать ошибку работы классификатора при отбрасывании изображения максимально быстро. Показатель качества $Q(I)$ можно оценивать по тому, насколько близка получаемая при его использовании кривая $(S(T_Q), E(T_Q))$ к графику $E(S)$. Примерный вид графиков зависимости ошибки распознавания от доли отбракованных изображений показан на Рис. 11 Пунктирная линия — график при идеальном отбраковывании, E_0 — ошибка без отбрако-

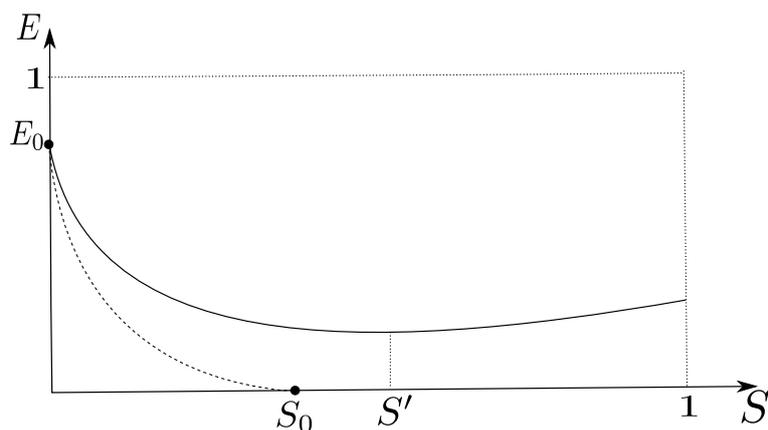


Рис. 11. Примерный вид графиков $E(S)$.

ывания, S_0 — доля отбраковки, при которой ошибка становится нулевой, то есть достигается полная разделимость. Сплошная линия — примерный вид зависимости $E(S)$ при использовании некоторого реального показателя качества.

Исследованы различные методы объединения разнородных показателей для формирования решающего правила: расстояние Махаланобиса, минимальное качество. Показано преимущество последнего метода объединения.

Результаты четвёртой главы опубликованы в работах [6, 9, 18, 24, 26].

В пятой главе рассмотрены методы выделения, создания и сравнения эталонов радужки. Описано конформное преобразование области радужки (кольца, заключённого между внутренней и внешней границами) в прямоугольник. Описаны методы получения информативных признаков при помощи спектрального преобразования Хаара и вейвлет-анализа функциями Габора, а также связанные с этими методами функции-метрики в пространстве признаков. Описаны преимущества и недостатки каждого из подходов.

Рассмотрены способы организации быстрого поиска в базах данных, такие как кластеризация, упрощённое сравнение, создание опорных эталонов. Приведены данные экспериментов.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [2, 6, 8, 18–20].

В Приложении Б представлены устройства, использующие результаты диссертационной работы.

На Рис.12 изображено устройство IriShield USB МК 2120U. Устройство содержит камеру, захватывающую монохромное изображение размером $640 * 480$ пикселей, ИК-диод подсветки, «холодное зеркало» (фильтр, прозрачный



Рис. 12. IriShield USB МК 2120U.

в ближнем ИК-диапазоне и являющийся зеркалом в видимом свете) и вычислительный модуль, осуществляющий обработку изображений глаза, создание и сравнение эталонов. Во встроенной памяти может храниться до 1000 эталонов. Питание и управление устройством осуществляется по шине USB. Устройство может работать под управлением ОС Windows, Linux, Android. Следует подчеркнуть, что вся обработка данных, от получения изображений до выдачи решения «распознан»/«не распознан» осуществляется вычислительным модулем устройства, шина USB используется лишь для самых общих управляющих команд (начать регистрацию, начать распознавание и т.п.).

На Рис.13 представлено бинокулярное устройство IriMagick. По своим

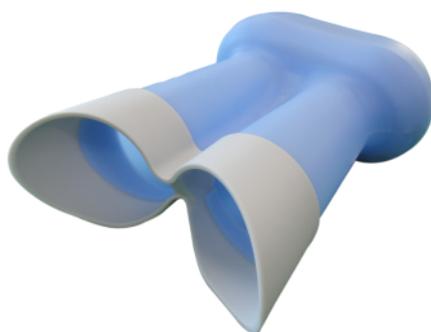


Рис. 13. IriMagick.

основным особенностям оно не отличается от предыдущего, за исключением того, что является бинокулярным, то есть вводит изображения двух глаз одновременно, и снабжено чехлом, для защиты от посторонних засветок и лучшего позиционирования. За счёт этих двух отличий повышены точность и скорость распознавания.

На Рис.14 представлен бинокулярный пупиллограф — устройство диа-

гностики функционального состояния человека по зрачковой реакции SM2010.



Рис. 14. Бинокулярный пупиллограф SM2010.

Выводы

1. Исследованы свойства радужки глаза человека и её изображений, определены их статистические характеристики. На основании статистики построена модель изображения радужки как совокупности распределений яркости, текстурных характеристик, вероятностей затенения. Предложены модели движения элементов радужки глаза, на основании этих моделей создан метод нормирования области радужки, превосходящий по точности существующие аналоги.

2. Разработаны и исследованы методы и алгоритмы, обеспечивающие выделение области радужки на изображении глаза, определены их характеристики и область применимости. Все исследованные методы реализованы программно, их показатели получены в численных экспериментах и сравнены с теоретическими оценками, а также с имеющимися аналогами.

3. На основании полученных характеристик отдельные алгоритмы выбраны и сведены в целостную систему выделения информативной части радужки на изображении. Основная идея построения системы методов состоит в том, что вначале определяются наиболее общие и приближенные характеристики объектов, которые затем последовательно дополняются более частными и уточняются. Каждый из этих шагов реализуется специальным методом, отличным от других, приспособленным для выполнения достаточно узко поставленной задачи данного шага. Система методов реализована программно и внедрена в устройствах биометрической идентификации и пупиллометрии.

4. Для изображений, получаемых современными системами распознавания по радужке, а также для на базах данных, используемых для стандартизации и проверки работоспособности методов, алгоритмов и систем обработки изображений радужки, доля изображений, на которых предложенная система не выделяет область радужки, не превышает 0.05%. Доля изображений, на которых радужка выделяется с ошибкой, неприемлемой для дальнейшего распознавания, не превышает 0.1%. По этим показателям предложенная система не уступает мировым аналогам, а по точности работы на низкокачественных изображениях — превосходит, что подтверждено международными тестами.

5. Разработана система методов анализа качества изображения и каче-

ства выделенной области радужки. Построено решающее правило, объединяющее различные методы с выдачей единого показателя качества. Решающее правило отвергает изображения с низким качеством, дающие основную долю ошибок распознавания. Исследованы возможности компромисса между ошибкой отказа в регистрации (отвержение качественного изображения) и ошибкой распознавания, построены параметрические кривые для индивидуальных методов и их совокупности.

6. Исследованы способы защиты системы распознавания от попыток фальсификации радужки. Созданы методы выявления изображений, полученный при регистрации поддельных радужек. Метод определения напечатанных рисунков радужки показывает полную делимость изображений реальных и напечатанных радужек.

7. Разработаны методы и алгоритмы для создания биометрических эталонов по изображениям радужки и их последующего сравнения. Разработан метод выбора наилучшего в смысле точности распознавания изображения из последовательности. Для сценария однократной верификации (один биометрический эталон сравнивается с одним эталоном базы данных) достигнута величина ошибок первого рода (доли ложных отказов при распознавании) равная 10^{-2} , а величина ошибки второго рода, то есть доля ложных допусков составляет 10^{-4} , что соответствует вводу четырёхзначного пин-кода и превосходит иные биометрические модальности.

8. Собрана и размечена база данных изображений радужки глаза, в которой представлены изображения и последовательности изображений, реализующие приведённые выше задачи. База данных включает в себя более миллиона изображений глаза, более 500000 качественных изображений радужки, зарегистрированной промышленными устройствами (Iritech, Panasonic, LG, OKI), а также лабораторными моделями, всего 10 типов устройств. Также в базу входят более 400000 малокачественных изображений, не пригодных для распознавания и более 100000 изображений поддельных радужек.

9. Созданы тестовые приложения и проведены вычислительные эксперименты по определению работоспособности перечисленных методов с опорой на собранную базу изображений.

Публикации:

1. Матвеев И.А., Мурынин А.Б. Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация алгоритмов восстановления поверхности // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. N.3. с.149-155.
2. Мурынин А.Б., Десятчиков А.А., Ковков Д.В., Лобанцов В.В., Маковкин К.А., Матвеев И.А., Чучупал В.Я. Комплекс алгоритмов для устойчивого распознавания человека // Известия РАН. Теория и системы управления. 2006. N.6 p.119-130.
3. Матвеев И.А. Поиск центра глаза на изображении методом Хафа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. N.2. с.36-40.
4. Матвеев И.А. Алгоритм поиска радужки глаза по взаимосвязанным максимумам проекций градиентов яркости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. N.5. с.62-68.
5. Matveev I.A. Detection of iris in images using brightness gradient projections // Pattern Recognition and Image Analysis. 2011. V.21. No.1. p.41-44.
6. Lobantsov V.V., Matveev I.A., Murynin A.B. Method of multimodal biometric data analysis for optimal efficiency evaluation of recognition algorithms and systems // Pattern Recognition and Image Analysis. 2011. V.21. N.2. P.494–497.
7. Матвеев И.А. Оптимизация кругового пути как метод выделения и уточнения границ радужки на изображении глаза // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. N.5. с.78-84.
8. Симоненко И.В., Матвеев И.А. Кластеризация эталонов радужки для оптимизации поиска в больших базах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. N.6(131), с.148-152.
9. Lobantsov V.V., Matveev I.A., Murynin A.B. A Biometrical Data Quality Analysis Method to Reliably Evaluate the Efficiency of Recognition Algorithms and Systems // Pattern Recognition and Image Analysis. 2012. V.22. No.4. P.595–600.
10. Матвеев И.А. Поиск центра радужки на изображении методом Хафа с двумерным пространством параметров // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. N.6. С.44-51.

11. Трёкин А.Н., Матвеев И.А. Метод проекций яркости при поиске зрачка на изображении // Вестник Тверского Государственного Университета. Серия: Прикладная математика. 2012. N.4. P.99-106.
12. К.А.Ганькин, А.Н.Гнеушев, И.А.Матвеев Сегментация изображения радужки глаза, основанная на приближенных методах с последующими уточнениями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. №2. С.78-92.
13. I.A.Matveev, I.V.Simonenko Detecting Precise Iris Boundaries by Circular Shortest Path Method // Pattern Recognition and Image Analysis. 2014. V.24. N.2. P.304-309.
14. О.А.Серебренников, А.Б.Мурьнин, И.А.Матвеев и др. Автоматическая система распознавания личности по характеристикам изображений и голоса // Сообщения по прикладной математике. Препринт ВЦ РАН, 1997. 45 стр.
15. Matveev I.A., Murynin A.B. 3-D Surface Reconstruction in Automatic Recognition System // 23rd Int. Congress on High-Speed Photography and Photonics. Moscow, 1998. Proc. SPIE V.3516. P.417-425.
16. Колмогоров В.Н., Матвеев И.А., Мурьнин А.Б. Восстановление поверхности движущегося объекта в системе компьютерного зрения // Сообщения по прикладной математике. Препринт ВЦ РАН. 1999. 25 стр.
17. Matveev I.A. 3D Surface Reconstruction in Automatic Recognition System // Proc. of 5th Int. Conf. on Pattern Recognition and Information Processing, Minsk, 1999, V.1, pp.279-283.
18. Matveev I.A., Gankin K.A., Demin E.Y. System for identification of person by face and iris images // 6th Open Russian-German Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding, 2003, August 25-30
19. Матвеев И.А., Ганькин К.А. Распознавание человека по радужной оболочке глаза и оценка его функционального состояния по зрачковым реакциям // Всероссийская конференция BIOMETRICS 2003 AIA, Москва
20. Матвеев И.А., Ганькин К.А. Распознавание человека по радужке // Системы безопасности. 2004. №5. С.72-76.
21. Матвеев И.А. Поиск центра глаза на изображении // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2006. N.10(2). с.206-211.

22. Смирнов Д.А., Матвеев И.А. Определение границ век на изображении глаза методом активных контуров // Труды ИСА РАН, Динамика неоднородных систем. 2006. N.25(2). с.200-207.
23. Мурынин А.Б., Десятчиков А.А., Ковков Д.В., Лобанцов В.В., Маковкин К.А., Матвеев И.А., Чучупал В.Я. Мультимодальная биометрия – перспективное решение // Системы безопасности, 2006. N.6. pp.156-160.
24. Матвеев И.А., Ганькин К.А. Исследование устойчивости алгоритмов распознавания радужки // Международная биометрическая конференция BIOMETRICS AIA 2006 TTS «Транспортные и пассажирские системы», Москва, 28-29 июня 2006.
25. Мурынин А.Б., Десятчиков А.А., Матвеев И.А. Биометрические технологии дистанционного распознавания человека и объединение решений // Международная биометрическая конференция BIOMETRICS AIA 2006 TTS «Транспортные и пассажирские системы», Москва, 28-29 июня 2006.
26. Матвеев И.А. Проблемы разработки алгоритмов распознавания радужки // 5я Международная биометрическая конференция BIOMETRICS AIA 2006 LEGS «Паспортные и правоохранительные системы», Москва, 18-19 октября 2006.
27. Матвеев И.А. Метод поиска окружности с известной внутренней точкой на изображении // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2007. N.31. Т.1. С.288-293.
28. Матвеев И.А. Система идентификации человека по радужке и лицу Iris642 // 7я Международная биометрическая конференция BIOMETRICS AIA 2007 TTS «Транспортные и пассажирские системы», Москва, 22 ноября 2007
29. Matveev I.A. Detection of iris in image by brightness gradient projections // Proceeding of 3rd International Workshop on Image Mining. Theory and Applications. IMTA-2010, May 20, 2010, Angers, France, p.45-50.
30. Matveev I.A. Detection of iris in image by corresponding maxima of gradient projections // Proceedings of Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2010, Freiburg, Germany, 27-29 July 2010, p.17-21.
31. Murynin A.B., Lobantsov V.V., Matveev I.A. Method of Multimode Biometric Data Analysis for Optimized Evaluation of Recognition Algorithms and Systems // 10th Int. Conf. Pattern Recognition and Image Analysis. St. Petersburg, 5-12 December 2010.
32. Матвеев И.А. Определение радужки глаза на изображении по согласованным максимумам проекций градиентов яркости // Международная конференция по прикладной математике и информатике, посвящённая 100-летию со дня рождения академика А.А.Дородницына, Москва, ВЦ РАН, 2010. с.239-241.

33. Matveev I.A. Detection of Iris in Image By Interrelated Maxima of Brightness Gradient Projections // Applied and Computational Mathematics. 2010. V.9. N.2. p.252-257.
34. Trekin A.N., Matveev I.A. Projection method for pupil detection // 11th Int. Conf. On Pattern Recognition and Information Processing, PRIP-2011, Minsk, 18-20 May, p.135-138.
35. Matveev I.A. Eye centre location with Hough transform // Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, CGVCIIP-2011, Rome, Italy, 24-26 July, p.313-318.
36. Матвеев И.А. Выделение радужки методом оптимизации кругового пути // Математические методы распознавания образов: 15-я Всероссийская конференция, г.Петрозаводск, 11-17 сентября 2011.: Сборник докладов - М.: МАКС Пресс, с.474-477.
37. Симоненко И.В., Матвеев И.А. Кластеризация эталонов радужки как метод оптимизации поиска в больших базах // Технические науки: теория и практика: материалы междунар. заоч. науч. конф. (г. Чита, апрель 2012 г.). – Чита: Издательство Молодой ученый, 2012. – vi, 142 с., P.20-23.
38. Трёкин А.Н., Матвеев И.А. Метод проекций яркости при поиске зрачка на изображении // Технические науки: теория и практика: материалы междунар. заоч. науч. конф. (г. Чита, апрель 2012 г.). – Чита: Издательство Молодой ученый, 2012. – vi, 142 с., P.24-28.
39. I.Matveev, I.Simonenko Detecting precise iris boundaries by circular shortest path method // Proc. 4th Int. Workshop on Image Mining. Theory and Applications. 21-24 February 2013, Barcelona, Spain, P.101-108.
40. I.Matveev, I.Simonenko Refining eye pupil border by circular shortest path method // Proc. Multi Conference on Computer Science and Information Systems, 22-26 July 2013, Prague, Czech Republic. P.11-18.
41. Чинаев Н.Н., Матвеев И.А. Определение точной границы зрачка // Journal of Machine Learning and Data Analysis. 2013. N.4.
42. Чинаев Н.Н., Матвеев И.А. Определение точной границы зрачка // Материалы конференции «Математические методы распознавания образов», ММРО-16, 6-12 октября 2013, Казань.
43. K.Gankin, I.Matveev System of methods for iris segmentation in image // Proc. SIAM Conf. Imaging Science. 12-14 May 2014, Hong Kong, China. P.60.