

ОБЗОР МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА ПО РАДУЖНОЙ ОБОЛОЧКЕ ГЛАЗА

Н.П. Гришенкова¹, инженер-программист, e-mail: natalia.grishenkova@gmail.com
Д.Н. Лавров², доцент, к.т.н., e-mail: Dmitry.Lavrov72@gmail.com

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

²Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. В статье представлен обзор современных методов идентификации и верификации человека по радужной оболочке глаза. Вначале излагаются хорошо известные факты о строении глаза и его радужной оболочки. Далее описываются основные принципы работы биометрических систем и показатели качества их работы. Следующий раздел описывает известные методы: выделения зрачка, выделения радужной оболочки, преобразования к эталону, определения границ радужки. Затем описываются алгоритмы определения ключевых точек на основе вейвлет-преобразований. В частности, описывается применение фильтра Габора. Описаны методы сравнения с эталоном на основе расстояния Хэмминга и метода проекционной фазовой корреляции. Обсуждаются достоинства и недостатки описанных подходов.

Ключевые слова: радужка, преобразование Габора, выделение границ, верификация, идентификация, распознавание.

Введение

В современном мире чрезвычайно остро стоит проблема защиты информации. На сегодняшний день использование парольной системы идентификации уже не удовлетворяет требованиям безопасности. Чтобы обеспечить достаточный уровень безопасности, пароль должен быть сложным. Сложность пароля обеспечивается совместным использованием букв (как строчных, так и прописных), цифр и знаков и его длиной. Причём для каждого информационного ресурса рекомендуется создавать свой пароль. Очень часто это приводит к тому, что пользователь попросту забывает такой пароль, и для его восстановления необходимо идентифицировать человека, обратившегося в службу поддержки. Также парольные системы идентификации никак не защищены от использования паролей третьими лицами для несанкционированного доступа. Чтобы удовлетворить все растущие потребности в повышении уровня безопасности информации, все чаще для идентификации личности используются методы биометрии. При биометрической аутентификации используются уникальные характеристики отдельно взятого человека. Это могут быть как врождённые

признаки (отпечатки пальцев, радужная оболочка глаза), так и приобретённые характеристики (почерк, голос или походка).

В данной работе рассматриваются методы идентификации человека по радужной оболочке глаза. Такой выбор не случаен. Идентификация по радужной оболочке глаза является одним из наиболее точных и надёжных способов биометрической идентификации. Это связано с тем, что радужная оболочка глаза имеет особую структуру, которая уникальна для каждого человека. При этом методы идентификации по радужной оболочке глаза являются бесконтактными.

Ещё одним достоинством подобных методов является то, что ношение контактных линз, даже цветных, не является проблемой. В процессе идентификации никак не учитывается информация о цвете глаз. Это делает применение подобных систем идентификации и верификации ещё более привлекательным.

Цель: изучить методы идентификации и верификации человека по радужной оболочке глаза.

Задачи:

1. Изучить характеристики биометрических систем;
2. Изучить методы определения границ зрачка и радужной оболочки глаза;
3. Изучить методы извлечения индивидуальной информации из изображения для идентификации и верификации человека;
4. Изучить способы принятия решения в процессе идентификации;
5. Изучить достоинства и недостатки систем идентификации и верификации человека по радужной оболочке глаза.

1. Физиология

1.1. Строение глаза

Глазное яблоко имеет форму, близкую к шаровидной. В нем различают передний и задний полюсы; прямая линия, соединяющая их, называется осью глазного яблока. Глазное яблоко состоит из капсулы, которая окружает его снаружи, и ядра. Капсула построена из трёх оболочек: наружной (фиброзной), средней (сосудистой) и внутренней (сетчатки). В состав ядра входят проводящие и преломляющие свет среды: водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело (рисунки 1 и 2¹) [3].

В наружной, или фиброзной, оболочке глазного яблока различают два отдела: роговицу и склеру.

Средняя, или сосудистая, оболочка глазного яблока содержит большое количество сосудов и пигмент. В ней принято различать три части: собственно сосудистую оболочку, ресничное тело и радужку.

¹<http://www.sportmedicine.ru/eye.php>

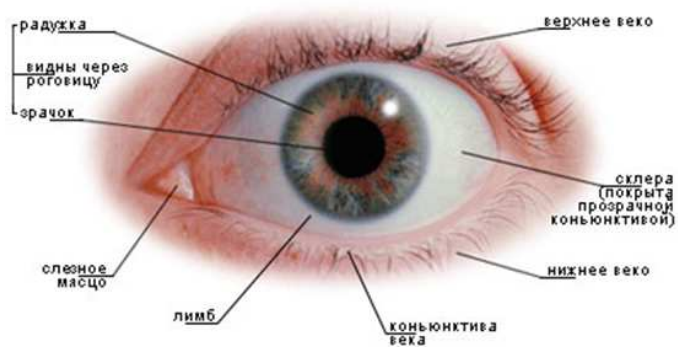


Рис. 1. Веки и глазная щель

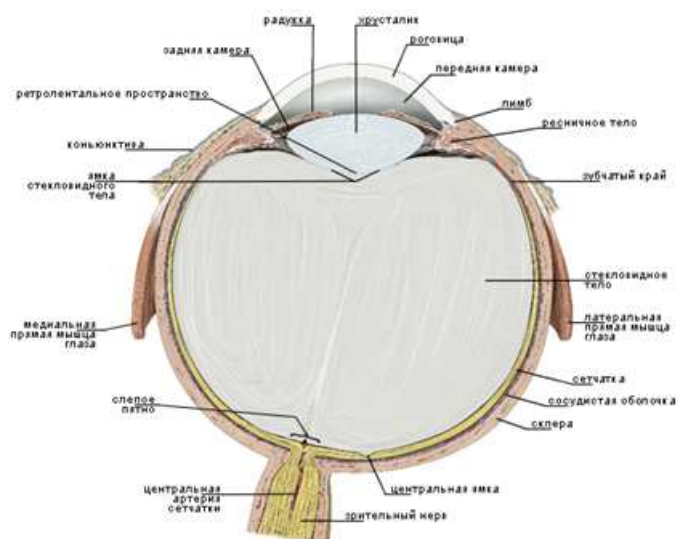


Рис. 2. Глазное яблоко, правое. Горизонтальный срез

Внутренняя оболочка глазного яблока, или сетчатка, является наиболее важной из оболочек глаза, так как в ней происходит восприятие зрительных раздражений. Она непосредственно связана со зрительным нервом.

Задняя часть сетчатки имеет сложное строение. Именно здесь расположены периферические отделы зрительного анализатора: свето- и цветоочувствительные элементы (фоторецепторные клетки) — палочки и колбочки. Поэтому задний отдел сетчатки называют её зрительной частью. Местом наибольшей чувствительности сетчатки является её центральная ямка, в области которой сконцентрирована большая часть фоторецепторных клеток.

Все образования, составляющие ядро глазного яблока (хрусталик, водянистая влага, которая заполняет переднюю и заднюю камеры глазного яблока, и стекловидное тело), в норме совершенно прозрачны и обладают способностью преломлять свет. Поэтому их, как и роговицу, относят к преломляющим средам глаза. Благодаря преломлению лучи света фокусируются в наиболее чувствительной зоне сетчатки — в центральной ямке.

Хрусталик имеет вид двояковыпуклого тела. Своей передней поверхностью он прилежит к радужке, а позади него находится стекловидное тело. Посредством тонких прочных нитей хрусталик связан с ресничной мышцей, расположенной циркулярно в цилиарном теле. Благодаря сокращению или расслаблению ресничной мышцы хрусталик изменяет свою кривизну. Это приспособление глаза к наилучшему видению на близком и далёком расстояниях носит название аккомодации [22].

1.2. Строение радужной оболочки глаза

Радужка составляет переднюю часть сосудистой оболочки. При осмотре передней поверхности радужной оболочки она выглядит тонкой почти округлой пластинкой, лишь слегка эллиптической формы. У края зрачка на всем его протяжении отмечается чёрная зубчатая оторочка, окаймляющая его на всем протяжении и представляющая выворот заднего пигментного листка радужной оболочки.

Радужная оболочка своей зрачковой зоной прилежит к хрусталику, опирается на него и свободно скользит по его поверхности при движениях зрачка. Зрачковая зона радужной оболочки оттесняется несколько кпереди прилежащей к ней сзади выпуклой передней поверхностью хрусталика вследствие чего, радужная оболочка в целом имеет форму усечённого конуса.

Основными свойствами радужной оболочки, обусловленными анатомическими особенностями её строения, являются рисунок, рельеф, цвет, расположение относительно соседних структур глаза и состояние зрачкового отверстия.

Параллельно зрачковому краю, концентрически к нему расположен невысокий зубчатый валик — круг Краузе или брыжжи, где радужная оболочка имеет наибольшую толщину. По направлению к зрачку радужная оболочка становится тоньше, но наиболее тонкий её участок соответствует корню радужной оболочки.

Соответственно кругу Краузе в строении радужной оболочки, также концен-

трически к зрачку, располагается сплетение сосудов — малый круг кровообращения радужной оболочки. Кругом Краузе пользуются для выделения двух топографических зон этой оболочки: внутренней, более узкой, зрачковой и наружной, более широкой, цилиарной. На передней поверхности радужной оболочки отмечается радиарная исчерченность, хорошо выраженная в её цилиарной зоне. Она обусловлена радиальным расположением сосудов, вдоль которых ориентирована и строма радужной оболочки. По обе стороны круга Краузе на поверхности радужной оболочки видны щелевидные углубления, глубоко проникающие в неё — крипты или лакуны. Такие же крипты, но меньшего размера, располагаются и вдоль корня радужной оболочки.

В наружном отделе цилиарной зоны заметны складки радужной оболочки, идущие концентрически к её корню, — контракционные бороздки, или бороздки сокращения. Они представляют обычно лишь отрезок дуги, но не захватывают всей окружности радужной оболочки. При сокращении зрачка они сглаживаются, при расширении — наиболее выражены.

Все перечисленные образования на поверхности радужной оболочки и обуславливают как её рисунок, так и рельеф.

В радужной оболочке различают два листка:

- 1) передний, мезодермальный, увеальный, составляющий продолжение сосудистого тракта;
- 2) задний, эктодермальный, ретинальный, составляющий продолжение эмбриональной сетчатки, в стадии вторичного глазного пузыря, или глазного бокала.

Передний мезодермальный листок состоит из переднего пограничного слоя и сосудистого слоя радужной оболочки. Задний эктодермальный листок представлен дилатором с его задней пограничной пластинкой и пигментированным эпителием. К нему же принадлежит и сфинктер, сместившийся в строму радужки по ходу её эмбрионального развития. Передний пограничный слой мезодермального листка состоит из густого скопления клеток, расположенных тесно друг к другу, параллельно поверхности радужной оболочки. Передний пограничный слой у края крипт прерывается (рисунок 3²).

Из наружного слоя заднего пигментного листка в период эмбрионального развития формируются две мышцы радужной оболочки: сфинктер, сужающий зрачок, и дилатор, обуславливающий его расширение. В процессе развития сфинктер перемещается из толщи заднего пигментного листка в строму радужной оболочки, в её глубокие слои, и располагается у зрачкового края, окружая зрачок в виде кольца. Волокна его проходят параллельно зрачковому краю, примыкая непосредственно к его пигментной кайме. Цилиарный край мышцы несколько смыт, от него кзади в косом направлении отходят мышечные волокна к дилатору. По соседству со сфинктером, в строме радужной оболочки

²<http://zrenue.com/anatomija-glaza/40-raduzhka/345-raduzhnaja-obolochka-glaza-raduzhka-stroenie.html>

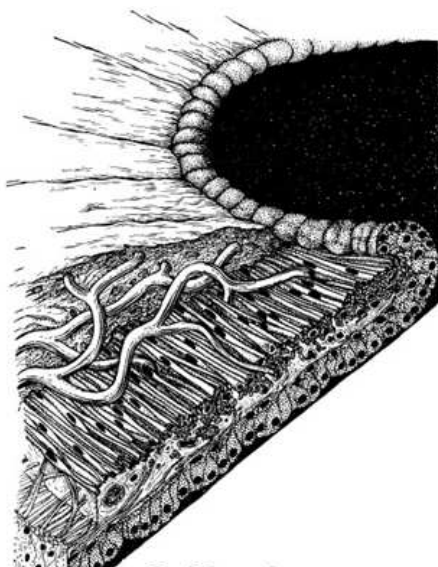


Рис. 3. Строение радужки

в большом количестве разбросаны крупные, округлые, густо пигментированные клетки, лишенные отростков, — «глыбистые клетки», возникшие также в результате смещения в строму пигментированных клеток из наружного пигментного листка.

За счёт наружного слоя заднего пигментного листка развивается дилататор — мышца, расширяющая зрачок. В отличие от сфинктера, сместившегося в строму радужной оболочки, дилататор остаётся на месте своего образования, в составе заднего пигментного листка, в его наружном слое.

Дилататор имеет вид тонкой пластинки, расположенной между цилиарной частью сфинктера и корнем радужной оболочки. Клетки дилататора располагаются в один слой, радиально по отношению к зрачку. Основания клеток дилататора, содержащие миофибриллы, обращены к строме радужной оболочки, лишены пигмента и в совокупности составляют заднюю пограничную пластинку. Сокращение дилататора осуществляется за счёт миофибрилл, причём изменяется как величина, так и форма его клеток.

В результате взаимодействия двух антагонистов — сфинктера и дилататора — радужная оболочка получает возможность путём рефлекторного сужения и расширения зрачка регулировать поток проникающих внутрь глаза световых лучей, причём диаметр зрачка может изменяться от 2 до 8 мм [21].

2. Биометрия

2.1. Основные понятия

Биометрия — это наука, представляющая совокупность математических методов, применяемых в биологии и заимствованных главным образом из области математической статистики и теории вероятностей, но имеющая свою



Рис. 4. Структура радужной оболочки [10]

специфику [13].

Биометрические технологии основаны на биометрии, измерении уникальных характеристик отдельно взятого человека. Это могут быть как уникальные признаки, полученные им с рождения, например: отпечатки пальцев, радужная оболочка глаза; так и характеристики, приобретённые со временем или же способные меняться с возрастом или под внешним воздействием. Например: почерк, голос или походка.

Основные определения, используемые в сфере биометрических приборов [37]:

Универсальность — каждый человек должен обладать измеряемой характеристикой.

Уникальность — это насколько хорошо человек отделяется от другого с биометрической точки зрения.

Постоянство — мера того, в какой степени выбранные биометрические черты остаются неизменными во времени, например в процессе старения.

Взыскания — простота осуществления измерения.

Производительность — точность, скорость и надёжность используемых технологий.

Приемлемость — степень достоверности технологии.

Устранение — простота использования замены.

В последнее время термин «Биометрия» претерпевает изменения и уточняется. Так в монографии [6] приведено следующее определение.

Биометрия — это наука об идентификации или верификации личности по физиологическим или поведенческим отличительным характеристикам [6].

Итак, биометрическая система может работать в двух режимах:

- *верификация* — сравнение один к одному с биометрическим шаблоном. Проверяет, что человек тот, за кого он себя выдаёт. Верификация может быть осуществлена по смарт-карте, имени пользователя или идентификационному номеру;
- *идентификация* — сравнение один ко многим: после «захвата» биометрических данных идёт соединение с биометрической базой данных для определения личности. Идентификация личности проходит успешно, если биометрический образец уже есть в базе данных.

2.2. Статические и динамические методы

Обычно при классификации биометрических технологий выделяют две группы систем по типу используемых биометрических параметров.

Первая группа систем использует статические биометрические параметры: отпечатки пальцев, геометрия руки, сетчатка глаза и т. п.

Вторая группа систем использует для идентификации динамические параметры: динамика воспроизведения подписи или рукописного ключевого слова, голос и т. п. [13]

2.3. Характеристики биометрических систем

Описанные ниже параметры используются как показатели эффективности биометрических систем [37].

Коэффициент ложного приёма (FAR) и коэффициент ложного совпадения (FMR).

FAR (False Acceptance Rate, коэффициент ложного пропуска, вероятность ложной идентификации) — вероятность того, что система биоидентификации по ошибке признает подлинность пользователя, не зарегистрированного в системе.

FMR (коэффициент ложного совпадения) — вероятность, что система неверно сравнивает входной образец с несоответствующим шаблоном в базе данных.

Коэффициент ложного отклонения (FRR) и коэффициент ложного несовпадения (FNMR).

FRR (False Rejection Rate, коэффициент ложного отказа доступа) — вероятность того, что система биоидентификации не признает подлинность шаблона зарегистрированного в ней пользователя.

FNMR (коэффициент ложного несовпадения) — вероятность того, что система ошибётся в определении совпадений между входным образцом и соответствующим шаблоном из базы данных. Система измеряет процент верных входных данных, которые были приняты неправильно.

Рабочая характеристика системы или относительная рабочая характеристика (ROC).

График ROC — это визуализация компромисса между характеристиками FAR и FRR. В общем случае сравнивающий алгоритм принимает решение на основании порога, который определяет, насколько близко должен быть входной

образец к шаблону, чтобы считать это совпадением. Если порог был уменьшен, то будет меньше ложных несовпадений, но больше ложных приёмов. Соответственно, высокий порог уменьшит FAR, но увеличит FRR. Линейный график свидетельствует о различиях для высокой производительности (меньше ошибок — реже возникают ошибки). Равный уровень ошибок (коэффициент EER) или коэффициент переходных ошибок (CER) — это коэффициенты, при которых обе ошибки (ошибка приёма и ошибка отклонения) эквивалентны. Значение EER может быть с лёгкостью получено из кривой ROC. EER — это быстрый способ сравнить точность приборов с различными кривыми ROC. В основном, устройства с низким EER наиболее точны. Чем меньше EER, тем более точной будет система.

Коэффициент отказа в регистрации (FTE или FER) и коэффициент ошибочного удержания (FTC).

Коэффициент отказа в регистрации (FTE или FER) — коэффициент, при котором попытки создать шаблон из входных данных безуспешны. Чаще всего это вызвано низким качеством входных данных.

Коэффициент ошибочного удержания (FTC) — в автоматизированных системах это вероятность того, что система не способна определить биометрические входные данные, когда они представлены корректно.

Ёмкость шаблона — максимальное количество наборов данных, которые могут храниться в системе [37].

2.4. Схема работы

Все биометрические системы работают практически по одинаковой схеме. Сначала система запоминает образец биометрической характеристики (это и называется процессом записи или регистрацией). Во время записи некоторые биометрические системы могут попросить сделать несколько образцов для того, чтобы составить наиболее точное изображение биометрической характеристики. Затем полученная информация обрабатывается и преобразовывается в математический код. Кроме того, система может попросить произвести ещё некоторые действия для того, чтобы связать биометрический образец с определённым человеком. Например, ввести персональный идентификационный номер (PIN), либо вставить в считывающее устройство смарт-карту, содержащую образец.

Идентификация по любой биометрической системе проходит четыре стадии [4]:

запись — физический или поведенческий образец запоминается системой;

выделение — уникальная информация выносится из образца и составляется биометрический образец;

сравнение — сохранённый образец сравнивается с представленным;

совпадение/несовпадение — система решает, совпадают ли биометрические образцы, и выносит решение.

Большинство современных систем хранят в специальной базе данных цифровой код, который связывается с конкретным человеком, имеющим право доступа. Сканер или любое другое устройство, используемое в системе, считыва-

ет определённый биологический параметр человека. Далее полученные данные обрабатываются путём преобразования их в цифровой код. Именно этот ключ и сравнивается с содержимым специальной базы данных для идентификации личности [5].

Для получения ключа из записанного биологического параметра часто используются шаблоны. Элементы биометрического измерения, которые не используются в сравнительном алгоритме, не сохраняются в шаблоне, чтобы уменьшить размер файла и защитить личность регистрируемого, сделав невозможным воссоздание исходных данных по информации из образца.

3. Процесс идентификации

3.1. Получение изображения

Практически все исследования ведутся на основе изображений, взятых из баз CASIA (Chinese Academy of Sciences Institute of Automation).

Институтом проделана огромная работа по сбору обширных баз данных.

Базы CASIA содержат несколько разделов.

Самой часто используемой базой является CASIA-Iris-Interval. Изображения из этой базы получены в ближнем инфракрасном диапазоне с разрешением 320x280 пикселей. Спектр ближнего инфракрасного излучения выделяет особенности структуры радужки, облегчая последующие измерения в процессе идентификации.

Для изучения изменения структуры радужной оболочки при изменении размеров зрачка используется база CASIA-Iris-Lamp. Изображения из этой базы содержат снимки с включённой и выключенной лампой с разрешением 640x480 пикселей.

Для исследований индивидуальных особенностей строения радужки часто используется база CASIA-Iris-Twins. Она содержит изображения радужных оболочек более 100 пар однояйцовых близнецов различного пола и возраста.

База CASIA-Iris-Distance используется для разработки методов идентификации, работающих на значительных расстояниях, и для разработки многопараметрических методов биоидентификации. Изображения в этой базе получены с помощью камеры высокого разрешения с расстояния 3 м. Разрешение изображений 2352*1728.

База CASIA-Iris-Thousand содержит изображения радужных оболочек более 1000 человек. Эта база используется для изучения уникальных особенностей структуры радужки, проверки методов определения радужной оболочки и идентификации, а также для усовершенствования этих методов при условии наличия бликов, ношения очков и контактных линз.

База CASIA-Iris-Syn содержит синтезированные изображения радужной оболочки [40].

3.2. Выделение зрачка

3.2.1. Определение границ

На изображении глаза зрачок представляет собой очень отчётливый чёрный круг. Это позволяет легко найти его внешнюю границу. Кроме того, уровень границы может быть установлен очень высоким для того, чтобы опустить мелкие неконтрастные области границы, пока не будет занят весь периметр зрачка. Лучший алгоритм для определения границы зрачка — это алгоритм Канни. Этот алгоритм использует горизонтальные и вертикальные градиенты, чтобы определить границы на изображении. После обработки изображения с помощью алгоритма Канни, будет найдена окружность, точно определяющая границу зрачка [35].

3.2.2. Алгоритм Канни

Нахождение контуров сводится к обнаружению разрывов интенсивности при переходе от одной области изображения к другой. Большинство алгоритмов анализа изображения рассматривают ее просто как некоторую скалярную функцию от пространственных переменных, абстрагируясь от физического смысла. Т.е. под интенсивностью пикселя может подразумеваться, например, уровень красного, светлота, насыщенность, яркость и т.д.

Для обнаружения перепадов яркости будем применять дискретные аналоги первых производных.

Приближённые значения первых частных производных $G_x(i, j)$ и $G_y(i, j)$ в каждой точке (i, j) изображения f обычно определяются как свёртки 3×3 -окрестности с матрицами дискретных дифференциальных операторов. Будем использовать дискретные дифференциальные операторы Собеля (Sobel), определяемые матрицами:

$$D_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad D_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Применение операторов к изображению определяется через оператор свёртки:

$$G_x = D_x * f,$$

$$G_y = D_y * f.$$

Поточечные формулы свёртки дают оценку по направлению x

$$\begin{aligned} G_x(i, j) &= (-1) \cdot f(i-1, j-1) + (-2) \cdot f(i-1, j) + (-1) \cdot f(i-1, j+1) + \\ &+ (0) \cdot f(i, j-1) + (0) \cdot f(i, j) + (0) \cdot f(i, j+1) + \\ &+ (1) \cdot f(i+1, j-1) + (2) \cdot f(i+1, j) + (1) \cdot f(i+1, j+1) = \\ &= -f(i-1, j-1) - 2 \cdot f(i-1, j) - f(i-1, j+1) + \\ &+ f(i+1, j-1) + 2 \cdot f(i+1, j) + f(i+1, j+1) \end{aligned}$$

и, аналогично, по направлению y

$$\begin{aligned} G_y(i, j) &= (-1) \cdot f(i-1, j-1) + (0) \cdot f(i-1, j) + (1) \cdot f(i-1, j+1) + \\ &+ (-2) \cdot f(i, j-1) + (0) \cdot f(i, j) + (2) \cdot f(i, j+1) + \\ &+ (-1) \cdot f(i+1, j-1) + (0) \cdot f(i+1, j) + (1) \cdot f(i+1, j+1) = \\ &= -f(i-1, j-1) - 2 \cdot f(i, j-1) - f(i+1, j-1) + \\ &+ f(i-1, j+1) + 2 \cdot f(i, j+1) + f(i+1, j+1). \end{aligned}$$

Направление градиента $\nabla f = G = (G_x, G_y)^T$ определяется углом между его направлением и осью абсцисс

$$\vartheta = \operatorname{arctg} \left(\frac{G_y}{G_x} \right).$$

Величина градиента определяется, как правило, любой Гёльдеровой нормой

$$\|x\|_p = \sqrt[p]{\sum_i x_i^p}$$

или предельной нормой ($p \rightarrow \infty$)

$$\|x\|_\infty = \max_i |x_i|.$$

Чаще всего используют нормы при $p = 1$, $p = 1$ и $p = \infty$.

В нашем случае $\|G\|_1 = |G_x| + |G_y|$, $\|G\|_2 = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$ и $\|G\|_\infty = \max_i |G_x|, |G_y|$.

Длина вектора градиента в точке будет влиять на то, войдёт ли пиксель в состав границы. Угол используют для определения направления контура в точке. Этот угол используется для процедуры утончения границы — светлые пиксели результирующего изображения, которые не лежат в направлении пути по границе, подавляются.

Последний шаг алгоритма — двухпороговое отсечение с гистерезисом. Если выбрать слишком высокий порог, то возможны ошибки первого рода — потеря точек, которые лежат на границе. Если выбрать слишком низкий порог, то участятся ошибки второго рода — лишние точки принимаются за фрагменты границы. Поэтому используют два порога. Сначала применяют высокий порог, который выделяет пиксели, достоверно принадлежащие границе. Затем обходят границу и, используя информацию о направлениях, достраивают её, применяя низкий порог. Такой алгоритм отдаёт предпочтение непрерывным кривым в качестве контуров и игнорирует мелкие изменения интенсивности. Вся эта последовательность шагов называется алгоритмом Канни [28]. В результате из чёрно-белого изображения мы получаем бинарное изображение контуров (см. рис. 5).

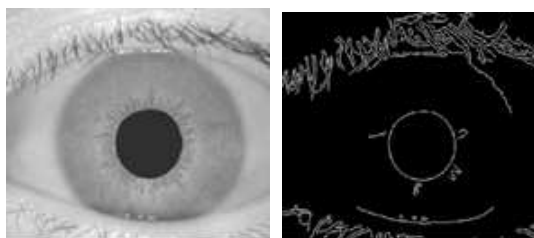


Рис. 5. Слева исходное изображение, справа — изображение контуров [35]

3.3. Очистка изображения

Для получения информации в месте границы возможно использование фильтров. Первый шаг очистки изображения — это расширение всех найденных границ. Увеличением размера линий вокруг найденных компонентов мы добиваемся объединения их в большие линейные сегменты. В конце концов, линии, не полностью определённые во время детектирования границ, приобретают форму. Это даёт большую вероятность, что периметр зрачка примет форму замкнутой окружности.

Зная о том, что зрачок хорошо определён, можно использовать больше фильтров без боязни потери этой важной информации. Допуская, что изображение центрировано, фильтр может быть использован для заливки круга, внутри границ зрачка. Таким образом, мы точно определяем внутреннюю область зрачка. После этого фильтр, который просто отделяет область соединённых пикселей, может быть использован для маленьких несвязанных частей изображения, которые были найдены при определении границ. Наконец, какие-либо блики на зрачке, вызванные отражением или другими причинами, могут быть заполнены путём сравнения областей светлых пикселей с областью ниже порога. После этого процесса мы сохраняем изображение, на котором ярко выделена область зрачка, до тех пор, пока не очистим его от посторонних данных.

3.4. Определение параметров зрачка

На спектре изображения виден большой круг, площадь которого задаётся совокупностью пикселей. Поскольку зрачок — самый большой и яркий круг на всем изображении, то интенсивность спектра в области зрачка будет достигать пика. В области зрачка строго в центре значение интенсивности будет максимально. Это происходит потому, что центр — точка внутри круга, наиболее удалённая от всех его границ. Поэтому максимальное значение должно соответствовать центру зрачка, и, кроме того, расстояние от центра зрачка до границы должно быть равно радиусу зрачка [35].

4. Выделение радужки

4.1. Нахождение радужной оболочки глаза

Когда определена информация о зрачке, можно приступить к определению параметров радужки. Важно помнить, что зрачок и радужка являются практически концентрическими окружностями. Следовательно, зная центр и радиус зрачка, мы не можем определить из них эти же параметры для радужки. Однако информация о зрачке даёт хорошую отправную точку в виде центра зрачка.

Самые современные алгоритмы определения радужки используют произвольные окружности для определения параметров радужки. Начиная от зрачка, эти алгоритмы перебирают потенциальные значения центра и радиуса радужки.

Первым шагом в поиске реального радиуса радужки является нахождение приблизительного радиуса радужки. Это приближение может потом помочь найти реальные параметры. Для того чтобы найти это приближение, необходимо найти хотя бы одну точку границы радужки. Зная, что верхняя и нижняя части глаза часто могут быть закрыты веками и ресницами, лучшим вариантом является поиск незакрытой границы вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр зрачка.

Предварительно следует использовать специальный сглаживающий фильтр, такой как медианный фильтр, к исходному изображению. Этот фильтр устраняет мелкие шумы, сохраняя контуры изображения. После использования медианного фильтра может потребоваться увеличение контрастности изображения.

Теперь, когда изображение подготовлено, можно приступить к определению границ. Интересующая нас область не является просто горизонтальной линией, проходящей через радужку, нас интересует часть этой линии правее зрачка. Увеличение яркости при переходе от радужки к склере является единственным крупным шагом.

Радужка должна представлять собой пошаговое изменение яркости в интересующей нас области. Следовательно, эта область изображения должна соответствовать компоненту с наивысшим значением на выходе из фильтра. Находя максимальное значение справа от зрачка, мы найдём границу радужки. Следует заметить, что т.к. радужка и зрачок могут не быть концентрическими окружностями, то расстояние от центра зрачка до этой границы может не соответствовать радиусу радужки.

4.2. Настройка контраста

Отметим, что второе и третье изображения рисунка 6 являются более контрастными, чем изображение 1. Контрастность этих рисунков была подстроена таким образом, чтобы увеличить разницу в яркости значений изображения радужки. Это численно упрощает анализ данных радужной оболочки. Подстройка выполняется при помощи построения гистограммы яркости изображения и растягиванием верхних и нижних границ гистограммы к делению всего разбиения по значениям яркости в диапазоне от 0 до 255. Рисунок 7 демонстрирует этот процесс [35].



Рис. 6. Изображения радужной оболочки глаза при разной контрастности [35]

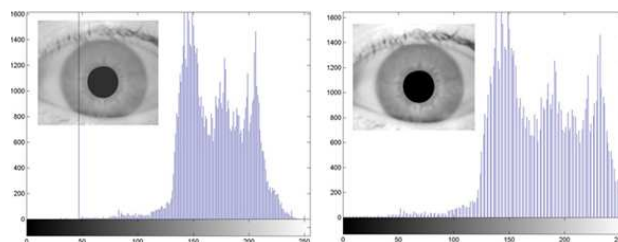


Рис. 7. Изменение контрастности изображения [35]

5. Определение границ радужки

5.1. Определение параметров радужки

Радужка должна представлять собой пошаговое изменение яркости в интересующей области. Следовательно, эта область изображения должна соответствовать компоненту с наивысшим значением на выходе фильтра выделения границ. Поиском максимального значения справа от зрачка находится граница радужки. Так как радужка и зрачок могут не быть концентрическими окружностями, то расстояние от центра зрачка до этой границы может не соответствовать радиусу радужки [26].

Для определения края (границы) радужки можно использовать несколько подходов. Опишем один из них, следуя [26]. Алгоритм выглядит следующим образом:

1. Ранее описанным алгоритмом находим центр зрачка и его радиус.
2. Определяем грубую оценку радиуса радужки. Вначале применяем медианный фильтр. Вычитанием из исходного изображения отфильтрованного изображения получаем грубую оценку границы. Это позволяет определить интересующую нас область вдоль горизонтальной линии, проведённой к границе от центра зрачка.
3. Затем анализируем детали дискретного вэйвлет-преобразования вдоль этой линии. Максимум в деталях ближе к грубой оценке уточняет радиус радужки. Так как радиус радужки, как правило, не совпадает с радиусом зрачка, то необходимо дополнительное уточнение.
4. Определение центра радужки основано на построении двух хорд, проходящих через центр зрачка (желательно под углом 90°). Центр определяется

пресечением перпендикуляров, проведённых через середины хорд. В качестве новой оценки радиуса берётся среднее значение длин хорд. Это не точная оценка, но вполне приемлемая для работы алгоритма [26].

Остаётся открытым вопрос выбора хорд с концами, лежащими на границе радужки, максимально перпендикулярными и максимально приближенными к векам. В работе [26] этот алгоритм чётко не прописан.

Далее, имея оценки радиуса и центра радужки, производится развёртка изображения: переход от полярных координат в декартовы с нормировкой по радиусу для компенсации линейного сжатия и растяжения радужки в следствие изменений размеров зрачка.

6. Нахождение ключевых точек

6.1. Композиция фильтров Гаусса и оператора Лапласа

Отличительные пространственные характеристики радужки человека проявляются различно в различных масштабах. Например, отличительный диапазон структур из общей формы радужной оболочки к распределению мелких крипт и детали текстуры. Для захвата этого диапазона пространственных деталей предпочтительно использовать разложение представления на несколько масштабов.

Система делает изотропное полосовое разложение, полученное от применения оператора Лапласа гауссовых фильтров [33, 36] к данным изображения. Эти фильтры могут быть определены как

$$-\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(\frac{\rho^2}{2\sigma^2} e^{-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}} \right),$$

где σ — среднеквадратичное отклонение, ρ — расстояние от центра фильтра до точки. На практике фильтрованное изображение реализуется в виде пирамиды Лапласа [31, 36]. Это представление описывается процедурно в терминах каскада малых фильтров Гаусса. Так если $w = (1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1)^T/16$ является одномерной маской, то $W = ww^T$ является двумерной маской, которая получается как результат внешнего произведения. Для заданной интересующей нас области I построение пирамиды Лапласа начинается со свертки I с W , для того чтобы получить набор изображений g_k , полученных низкочастотной фильтрацией из g_{k-1} по формуле

$$g_k = (W * g_{k-1})_{\downarrow 2},$$

где $g_0 = I$ и $(\downarrow 2)$ обозначает уменьшение два раза изображения в каждом направлении. Очередной k -ый уровень пирамиды Лапласа l_k формируется как разница между g_k и g_{k+1} , расширенным перед вычитанием, таким образом, что он соответствует частоте дискретизации g_k . Расширение достигается путём увеличения частоты дискретизации и интерполяции

$$l_k = g_k - 4W * (g_{k+1})_{\uparrow 2},$$

где ($\uparrow 2$) означает увеличение изображения в 2 раза путём добавления нулевых строк и столбцов между строками и столбцами исходного изображения. Генерируемое ядро W используется в качестве фильтра интерполяции, а деление на 4 необходимо потому, что $3/4$ значений в изображении — это только что вставленные нули. Полученная пирамида Лапласа, состоящая из четырёх уровней, служит основой для последующей обработки. При построении пирамиды Лапласа следует напрямую создавать её согласно определённой процедуре.

Представление выводится непосредственно из фильтрованного изображения с размером порядка количества байт в области радужки первоначально полученного изображения. Система сохраняет больше имеющейся информации о радужке и могла бы быть способна сделать более тонкие различия между различными радужками [43].

6.2. Фильтр Габора

Фильтры, основанные на вейвлетах Габора, очень хороши для выделения шаблонов на изображении. Рассмотрим одномерный фильтр Габора с фиксированной частотой (fixed frequency 1D Gabor filter) для поиска шаблонов в развёрнутом изображении. Вейвлеты Габора состоят из двух компонент, комплексной синусоидальной несущей и гауссовой огибающей:

$$g(x, y) = s(x, y) * w_r(x, y).$$

Комплексная несущая имеет форму:

$$s(x, y) = e^{j*(2*\pi*(u_0*x+v_0*y)+P)}.$$

Параметры u_0 и v_0 представляют собой частоты горизонтальной и вертикальной синусоид соответственно. P — произвольный сдвиг фазы. Вторым компонент преобразования Габора представляет произвольный фазовый сдвиг. Итоговый вейвлет формируется из синусоидальной несущей и этой огибающей. Огибающая имеет гауссовский профиль и описывается следующим выражением:

$$w_r(x, y) = K * e^{-\pi*((a^2)*(x-x_0)_r^2+(b^2)*(y-y_0)_r^2)},$$

где:

$$\begin{aligned} (x - x_0)_r &= (x - x_0) * \cos \theta + (y - y_0) * \sin \theta, \\ (y - y_0)_r &= -(x - x_0) * \sin \theta + (y - y_0) * \cos \theta, \end{aligned}$$

K — постоянная масштабирования, (a, b) — постоянные масштабирования осей, θ — постоянная поворота, (x_0, y_0) пик огибающей. Чтобы получить вейвлет Габора, мы перемножаем $s(x, y)$ и $w_r(x, y)$. Полученный вейвлет изображён на рисунке 8.

Рассмотрим процесс выделения индивидуальных особенностей с помощью фильтра Габора. Сначала мы возьмём колонку шириной в 1 пиксель и выполним свёртку его с одномерным вейвлетом Габора. Т.к. фильтр Габора комплексный,

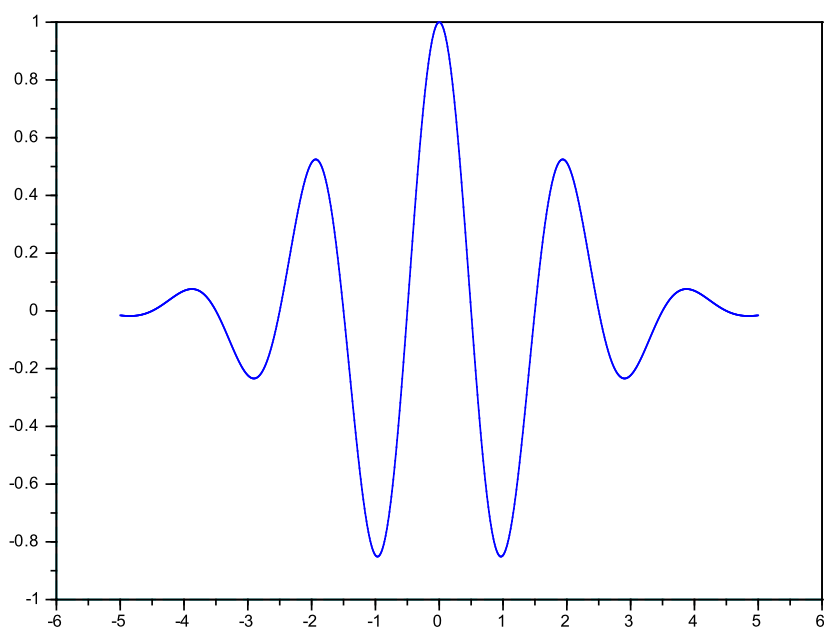


Рис. 8. Одномерный вейвлет Габора $G(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \cos(2\pi\vartheta x)$ при $\sigma = 3$ и $\vartheta = 0.5$

в результате мы получим отдельно действительную и мнимую части. Если полученное значение больше нуля, сохраняем 1, иначе — сохраняем 0. Когда все столбцы изображения обработаны, мы можем сформировать черно-белое изображение, составляя колонки друг к другу. Действительная и мнимая части изображения показаны на рисунке 9 [35].

Для формирования кода радужки необходимо сравнить значения мнимой и действительной части в каждой точке. Если хотя бы 1 из этих значений больше нуля, сохраняем 1, иначе — сохраняем 0.



Рис. 9. (a) — действительная часть кода радужки; (b) — мнимая часть кода радужки [35]

Заключение

В работе был произведён обзор методов, применяемых при идентификации человека по радужной оболочке глаза.

При определении границ зрачка наиболее часто используется алгоритм Канны или метод Даугмана.

При определении границ радужной оболочки наиболее часто используемыми методами являются метод Даугмана, метод Хоу и метод Хаара. Интегро-дифференциальный метод Даугмана является каноническим в данной области. Но при наличии бликов метод Даугмана даёт неудовлетворительные результаты. Поэтому он часто используется совместно с методом Хоу.

Приведён также метод нахождения параметров радужки с помощью двух хорд. Этот метод, хотя и является приблизительным, даёт достаточно точную оценку и не требует больших вычислительных мощностей.

Для нахождения ключевых точек чаще всего используется фильтр Габора. Он сочетает в себе простоту реализации и точность, столь необходимые в данной области. Однако также может быть использована композиция фильтров Гаусса и оператора Лапласа.

Несмотря на некоторые недостатки, технология идентификации и верификации человека по радужной оболочке глаза является весьма перспективной. Особенно хороша она благодаря своей надёжности и хорошему соотношению ошибок первого и второго рода для систем доступа к различным объектам. Это подтверждается растущим с каждым годом интересом к этой области, а также увеличением доли рынка метода идентификации по радужке среди других биометрических технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абраменко Е.А., Минакова Н.Н., Третьяков И.Н., Петров И.В. Применение спектров текстурной картины для изучения и классификации неоднородных структур // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 1–2. С. 147–149.
2. Алгулиев Р.М.О., Имамвердиев Я.Н.О., Мусаев В.Я.О. Методы обнаружения живучести в биометрических системах // Вопросы защиты информации. 2009. Вып. 3. С. 16–21.
3. Биологический энциклопедический словарь / Гл. ред. М.С. Гиляров. М. : Советская энциклопедия, 1989. 864 с.
4. Биометрия. URL: <http://www.fond-ai.ru/art1/art228.html> (дата обращения: 10.02.2014).
5. Биометрия – Энциклопедия безопасности URL: <http://www.secuteck.ru/wiki/index.php?title=%D0%91%D0%B8%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%8F> (дата обращения: 10.02.2014).
6. Болл Р., Коннел Д., Панканти Ш., Ратха Н., Сеньор Э. Руководство по биометрии. М. : Техносфера, 2007. 368 с.
7. Буй Т.Ч., Спицын В.Г. Разложение изображений с помощью двумерного дискретного вейвлет-преобразования и быстрого преобразования Хаара // Проблемы информатики. 2011. № 2. С. 11–15.

8. Давлетханов М. Идентификация по радужке глаза. Часть 1. <http://www.bre.ru/security/24514.html> (дата обращения: 10.02.2014).
9. Давлетханов М. Идентификация по радужке глаза. Часть 2. <http://www.bre.ru/security/24531.html> (дата обращения: 10.02.2014).
10. Ковалевский Е.И. Офтальмология. Учебник. М.: Медицина, 1995. 480 с.
11. Корепанов А.О. Обнаружение границ радужной оболочки с использованием преобразования Хоу // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королёва (Национального исследовательского университета). 2008. № 2. С. 235–239.
12. Кухарев Г.А. Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. СПб. : Политехника, 2001. 240 с.
13. Лакин Г.Ф. Биометрия. 4-ое изд. М. : Высшая школа, 1990. 392 с.
14. Минакова Н.Н., Петров И.В. Информационная система анализа структуры радужной оболочки глаза // Ползуновский вестник. Барнаул, 2012. № 3/2.
15. Павельева Е.А. Метод Проекционной Фазовой Корреляции в Ключевых Точках Радужной Оболочки Глаза // The 22nd International Conference on Computer Graphics and Vision. 2012. С. 128–132.
16. Павельева Е.А., Крылов А.С. Поиск и анализ ключевых точек радужной оболочки глаза методом преобразования Эрмита // Информатика и её применения. 2010. № 1. С. 79–82.
17. Павельева Е.А., Крылов А.С. Алгоритм сравнения изображений радужной оболочки глаза на основе ключевых точек // Информатика и её применения. 2011. Т. 5, Вып. 1. С. 68–72.
18. Павельева Е.А., Крылов А.С. Алгоритм сравнения изображений радужной оболочки глаза на основе ключевых точек // Информатика и её применения. 2011. № 1. С. 68–72.
19. Павельева Е.А., Крылов А.С. Определение локальных сдвигов изображений радужных оболочек глаз методом проекционной фазовой корреляции // Труды конференции GraphCon'2011. Москва, 2011. С. 188–191.
20. Пустынский И.Н., Дементьев А.Н., Мищенко Н.И., Зайцева Е.В. Методы и средства формирования и обработки изображения переднего отдела глаза // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012, 2-1. С. 121–128.
21. Радужная оболочка глаза (радужка), строение // Современная офтальмология. URL: <http://zrenue.com/anatomija-glaza/40-raduzhka/345-raduzhnaja-obolochka-glaza-raduzhka-stroenie.html> (дата обращения: 10.02.2014).
22. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека: в 3-х томах. 3-е изд. М. : «Медицина», 1967.
23. Третьяков И.Н., Минакова Н.Н. Параметризация структуры радужной оболочки глаза с использованием вейвлет-преобразования // Известия Алтайского государственного университета. 2009. № 1. С. 129–130.
24. Третьяков И.Н., Минакова Н.Н. Алгоритм разграничения доступа по радужной оболочке глаза для решения задач контроля доступа к информационным ресурсам // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010, 1-1. С. 100–102.

25. Федотов Н.Г. Методы стохастической геометрии в распознавании образов. М. : Радио и связь, 1990. 144 с.
26. Шокуров А.В., Михалев А.В. Оптимальное использование вейвлет-компонент // Успехи мат. наук. 2007. Т. 62, № 4. С. 171–172.
27. Юрьева Т.Н. Современные представления о структурно-функциональной организации иридоцилиарной системы // Медицинская визуализация. 2011. Вып. 2. С 46–50.
28. All things considered... – Горизонт завален! <http://bik-top.livejournal.com/37060.html?thread=197828> (дата обращения: 10.02.2014).
29. Anuj B., Rashid A. Image compression using modified fast Haar wavelet transform // World Appl. Sci. J. 2009. V. 7, N. 5. P. 647–653.
30. Arvacheh Ehsan M. A Study of Segmentation and Normalization for Iris Recognition Systems // A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science In Systems Design Engineering.
31. Burt P.J. and Adelson E. The Laplacian pyramid as a compact image code // IEEE Trans. Comput. 1983. V. 31, N. 4. P. 532–540.
32. Daugman J. How Iris Recognition Works <http://www.cl.cam.ac.uk/~jgd1000/irisrecog.pdf> (дата обращения: 10.02.2014).
33. Horn B.K.P. Robot Vision. Cambridge, MA : MIT Press, 1986.
34. Huang J. Iris Model Based on Local Orientation Description // The First International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2002. P. 450–454.
35. Iris Recognition. <http://cnx.org/content/col110256/1.1/> (дата обращения: 10.02.2014).
36. Jahne B. Digital Image Processing. 2nd ed. Berlin : Springer-Verlag, 1993.
37. Jain A.K., Ross A., Prabhakar S. An introduction to biometric recognition // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. January 2004. T. 14 (1). P. 4–20.
38. Krylov A., Korchagin D. Fast Hermite Projection Method // LNCS. 2006. V. 4141, P. 329–338.
39. Miyazawa K., Ito K., Aoki T., Kobayashi K., Nakajima H. A phase-based iris recognition algorithm // Proceedings of the International Conference on Advances on Biometrics (ICB '06). V. 3832 of Lecture Notes in Computer Science. P. 356–365. Springer, Hong Kong, January 2006.
40. Note on CASIA-IrisV4. <http://www.idealtest.org/dbDetailForUser.do?id=4> (дата обращения: 10.02.2014).
41. Tisse C. Person Identification Technique using Human Iris Recognition // Proc. of Vision Interface. 2002. P. 294–299.
42. Tisse C., Martin L., Torres L., Robert M. Person identification technique using human iris recognition / Acoustics, Speech, and Signal Processing // Proceedings ICASSP '05. 2005. V. 2. P. 949–952.
43. Wildes R.P. Iris Recognition: An Emerging Biometric Technology // Proceedings of the IEEE. 1997. V. 85, N. 9.

A REVIEW OF PERSON IDENTIFICATION METHODS USING IRIS RECOGNITION

N.P. Grishenkova¹, Software engineer / Software developer,
e-mail: natalia.grishenkova@gmail.com

D.N. Lavrov², Ph.D. (Eng.), Associate Professor, e-mail: Dmitry.Lavrov72@gmail.com

¹Omskiy Nauchno Issledovatel'skiy Institut Priborostroeniya

²Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. The article presents an overview of current methods of person identification and verification using human iris. At first we state some well-known facts about the structure of the eye and its iris. Then the basic principles and quality metrics of biometric systems are described. The next chapter describes the known methods: eye and iris localization, histogram normalization and iris boundaries determination. After that we consider keypoint detection algorithms based on wavelet transforms including those using Gabor filters. Methods of pattern matching based on the Hamming distance and projective phase correlation are described. Finally, we discuss the advantages and disadvantages of the considered approaches.

Keywords: iris, Gabor transform, edge detection, verification, identification, recognition.