

Сравнительный анализ методов некооперативного распознавания радужной оболочки глаза

И.В. Петров, Н.Н. Минакова

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

A Comparative Analysis of Non-cooperative Iris Recognition Techniques

I.V. Petrov, N.N. Minakova

Altai State University (Barnaul, Russia)

Анализируются существующие методы локализации в контексте некооперативного распознавания. К достоинствам таких систем можно отнести удобство использования, увеличение пропускной способности, возможность скрытой работы в интересах безопасности и борьбы с терроризмом и т. д. Основной проблемой является плохое качество биометрических данных и необходимость их быстрой обработки, что требует создания особых алгоритмов обработки биометрических данных.

Радужная оболочка глаза (РОГ) на данный момент является перспективной для использования в некооперативных системах. Это связано с возможностью сканирования на удаленном расстоянии, высокой информационной емкостью РОГ и т. д. К наиболее трудоемкому этапу распознавания РОГ при отсутствии взаимодействия можно отнести локализацию. Обозначены основные проблемы, возникающие при некооперативном распознавании. Выделены и проанализированы существующие методы локализации РОГ: интегро-дифференциальный оператор, преобразования Хафа, метод активного контура. Проведены численные эксперименты, позволяющие выявить достоинства и недостатки методов. Предложены параметры, позволяющие оценить их перспективность. Показано, что в некооперативных системах перспективен метод локализации, основанный на активном контуре.

Ключевые слова: некооперативное распознавание, радужная оболочка глаза, биометрия, идентификация личности, информационная система.

DOI 10.14258/izvasu(2016)1-29

Введение. Защита информации требует решения вопросов идентификации и аутентификации личности [1]. В настоящее время активно разрабатываются алгоритмы для идентификации личности по биометрическим признакам [2, 3]. Удобный и надежный биометрический признак в системах идентифика-

The paper analyzes the existing localization methods in the context of non-cooperative identification. There are many advantages of such systems like usability, capacity increase, possibility of being hidden and undetected for security reasons, etc. The main problem is the poor quality of biometric data and the need for their rapid processing that requires special algorithms for processing of biometric data.

The iris of an eye (iris) is currently the most promising data source for the non-cooperative systems. The iris can be scanned over a distance, has high information capacity, and remains unchanged with time. The most time-consuming step besides the iris recognition is a localization process. The existing techniques of iris localization are selected and analyzed. Advantages and disadvantages of each technique are considered.

It is shown that promising localization technique for non-cooperative systems is based on the active circuit technique. Despite its high computational complexity, the method allows to take into account a large number of factors related to the non-cooperative recognition. It is found that the success of the technique is determined by preliminary stages, for example, the correct specification of initial parameters.

Key words: non-cooperative recognition, iris biometrics, personal identification, information system.

ции личности — радужная оболочка глаза (РОГ), так как она обладает большой информационной емкостью, уникальна для каждого индивида.

Большинство существующих систем идентификации по РОГ работают в том случае, если субъекты принимают активное участие в процессе. Эти дей-

ствия могут включать позиционирование глаза относительно сенсора, удаление линз, снятие очков и других предметов, закрывающих область РОГ. Их отсутствие накладывает существенные ограничения на использование таких систем в нестандартных задачах, например, если требуется высокая пропускная способность (в аэропортах, вокзалах и т. д.).

Основные проблемы. В настоящее время активно развивается новое направление в биометрии — некооперативная биометрическая система, работающая при отсутствии взаимодействия со стороны субъекта. При сканировании РОГ в таких условиях появляются проблемы, связанные с целым спектром факторов: отражения на поверхности роговицы; частично или полностью закрытый глаз; поворот относительно оптической оси; слабоконтрастные границы РОГ и т. д. Перечисленные проблемы во многом связаны с локализацией РОГ. Поэтому проанализированы применяемые в информационных системах методы локализации. Для последующего рассмотрения выделены: метод локализации, основанный на интегро-дифференциальном операторе Даугмана; преобразование Хафа; метод активных контуров; итеративный метод локализации РОГ, основанный на механической модели упругих тел.

В данной работе анализируются методы локализации в контексте некооперативного распознавания на основе численных оценок точности работы биометрических систем.

Метод локализации, основанный на интегро-дифференциальном операторе Даугмана [4]. Рассчитываются параметры окружностей, аппроксимирующих внутреннюю и внешнюю границу. Для этого определяется максимум производной сглаженной средней интенсивности по круговому контуру:

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| G_\sigma(r) \cdot \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{I(x, y)}{2\pi r} ds \right|, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ — функция интенсивности изображения, $G_\sigma(r)$ — сглаживающая функция Гаусса, s — контур окружности с координатами (x_0, y_0) и радиусом r .

При локализации РОГ оператор используется последовательно для определения внутренней и внешней границы. Для нахождения границ на изображении с максимальным значением оператора применяются методы оптимизации, например, метод градиентного спуска [4]. Предварительно находится приближительный центр зрачка, что позволяет улучшить эффективность локализации. В [5] предлагается использовать специальный метод оптимизации, основанный на нахождении максимума при отклонении координат поиска по раскручивающейся спирали. По утверждениям авторов метода такой подход позволяет снизить вероятность попадания в локальный максимум.

Преобразование Хафа. Преобразование Хафа является одним из наиболее известных методов, используемых в анализе изображения [6]. В его основе лежат следующие представления. На изображении имеется набор точек, представляющих искомую линию. Необходимо найти параметры прямой, аппроксимирующей данный набор точек. Главная идея преобразования Хафа заключается в том, чтобы отобразить каждую точку на исходном изображении в пространстве параметров (в котором параметры искомой линии являются координатами) как прямую, у которой угловой коэффициент и ордината точки пересечения прямой с осью ординат задаются координатами данной точки. Координаты точки пересечения всех линий в пространстве параметров и будут параметрами искомой прямой.

Из-за дискретности машинного представления и входных данных непрерывное пространство параметров представляется как массив. Каждая ячейка данного массива соответствует набору кривых с близкими значениями параметров.

При локализации РОГ внутренняя и внешняя границы рассматриваются как окружности, которые можно задать уравнением:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2, \quad (2)$$

где (a, b) — координаты центра окружности, R — ее радиус.

Для поиска окружности задается 3-мерный массив, каждое измерение которого соответствует определенному параметру окружности. На изображении РОГ выделяются контуры. Каждая точка контура переводится в пространство параметров, происходит заполнение ячеек массива. Ищется ячейка с наибольшим значением, координаты которой рассматриваются как параметры искомой окружности.

Метод активных контуров. Метод относится к вариационным методам поиска замкнутых границ [7, 8]. В процессе работы контур меняется от начально заданной формы к искомой. Работа метода завершается, когда достигается минимум функционала E , который задается соотношением [7]:

$$E_{snake}^* = \int_0^1 E_{snake}(v(s)) ds = \int_0^1 E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)) + E_{con}(v(s)) ds, \quad (3)$$

где E_{int} — внутренняя энергия сплайна, связанная со сгибанием, E_{image} — энергия растягивания, E_{con} — энергия ограничивающих сил, $v(s) = v(x(s), y(s))$ — точки контура.

В работе [7] описано использование метода активных контуров для поиска внутренней и внешней границы РОГ. Для представления контуров предлагается использовать Фурье-дескрипторы, что позво-

ляет достигать инвариантности и контролировать степень сложности формы. Использование компонентов Фурье, частоты которых кратны $1/(2\pi)$, позволяет обеспечить наилучшую точность. Выбор количества частотных составляющих дает возможность контролировать степень гладкости.

Процедура локализации РОГ с использованием данного метода заключается в разложении в ряд Фурье N точек контура, которые описываются как последовательность $\{r_\theta\}$, где r_θ — расстояния от центра для θ от 0 до $N-1$. Набор из M дискретных Фурье коэффициентов $\{C_k\}$, для k от 0 до $M-1$ вычисляется с помощью формулы

$$C_k = \sum_{\theta=0}^{N-1} r_\theta e^{-2\pi jk\theta/N}. \quad (4)$$

Коэффициент нулевого порядка извлекает информацию об усредненной кривизне внутренней или внешней границы РОГ (о радиусе), когда форма контура приближена к простой окружности. Из этих M коэффициентов дискретного преобразования Фурье приближение к соответствующей границе позволяет получить новую последовательность $\{R_\theta\}$ для $\theta = 0$ до $\theta = N-1$:

$$R_\theta = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} C_k e^{j2\pi k\theta/N}. \quad (5)$$

Итеративный метод локализации РОГ, основанный на механической модели упругих тел [9]. В основу метода положена модель, основанная на абстрактных механических объектах — безмассовых «пружинах», подчиняющихся закону Гука.

На рисунке (а, б) обозначены N идентичных объектов с коэффициентом упругости k , соединяющих точки, лежащие на окружности с радиусом R , центр окружности — (точка O). В исходном состоянии O — точка равновесия. Воздействие внешней силы на точку O заставляет ее перемещаться к точке O' . В результате создается восстанавливающая сила \vec{f}_i , которая сопротивляется возникшей деформации. Сила \vec{f}_i определяется формулой (6).

$$\vec{f}_i = -k \cdot \vec{x}_i = -k(R - r_i)\vec{e}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где r_i — текущая длина S_i , а \vec{e}_i — направление i -й «пружины». Сумма этих сил $F_c = \sum_{i=1}^N \vec{f}_i$ действует та-

ким образом, что система стремится вернуться в состояние равновесия (рис. (б)).

Радужная оболочка представляется как две неконцентричные окружности [9], которые можно выразить следующими независимыми параметрами: $O_p(x_p, y_p)$ — координаты центра зрачка, R_p — радиус зрачка, $O_i(x_i, y_i)$ — координаты центра РОГ, R_i — радиус РОГ. На первом этапе определяется приближенный центр зрачка $O'(x_p, y_p)$ и набор точек

на внутренней границе ($P_i, i = 1, 2, \dots, N$) с использованием метода классификации с AdaBoost [9]. Каждая точка P_i соединена с центром O' , как показано на рисунке (в). Итог — набор соединяющих круглую границу и приближительный центр «пружин» как абстрактных механических объектов (рис. (г)). Длина \bar{R} до центра равновесия определяется

$$\text{как } \bar{R} = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N O'P_i, \text{ коэффициент упругости зада-$$

ется как $k = 1/N$ (рис (б)). В ответ на деформацию создается восстанавливающая сила, перемещающая текущий центр O' со смещением \vec{d}_i вдоль радиального направления (7):

$$\vec{d}_i = \vec{f}_i = -k(R - r_i)\vec{e}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

Результирующее смещение принимает значение

$$\vec{D} = \sum_{i=1}^N \vec{d}_i. \text{ Центр перемещается к точке } O(x_p, y_p).$$

При корректном подборе коэффициента упругости, если точки границы и абстрактных «пружин» определены правильно, то $O_p = O$ и $R_p = \bar{R}$. В противном случае вторая итерация выполняется с новым центром $O(x_p, y_p)$, обеспечивающим набор из пересозданных точек границы. Этот процесс повторяется до тех пор, пока O_p и R_p не сведутся к искомой границе.

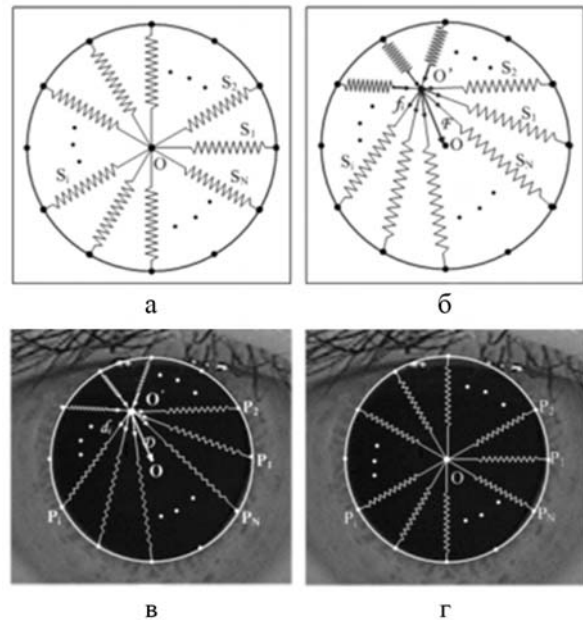


Иллюстрация к методу локализации РОГ
Z. He, T. Tan, Z. Sun [9]

Результаты. Каждый из рассмотренных выше методов локализации был реализован в составе компьютерной системы анализа РОГ, описанной в работе [10]. Разработаны подключаемые модули, которые

дополнены в качестве модуля локализации в специально созданной расширяемой системе. Модули разработаны на языке C++ с использованием библиотек QT и OpenCV.

По результатам анализа известных способов оценки точности биометрических систем выбраны два принципиально отличающихся подхода:

1. На основе экспертной (визуальной) разметки.
2. На основе ошибок биометрической идентификации.

При реализации первого подхода для всех изображений из тестовой базы данных на основе визуальной оценки были предварительно найдены и размечены границы РОГ. Далее рассчитывался процент изображений, в которых параметры границ РОГ, найденных автоматически, совпали с параметрами, рассчитанными с помощью визуальной оценки (в пределах допустимого отклонения).

Традиционно применяемые в биометрических системах ошибки 1 и 2 рода заменены коэффициентом равного уровня ошибок EER. Это позволяет учесть взаимовлияние ошибок и охарактеризовать точность биометрической системы одним числом [11].

В качестве тестовых образцов использовались снимки из публично доступной базы данных UBIRIS, полученные некооперативным путем (слабоконтрастные, расфокусированные, смазанные и др.) [12]. Тестовые выборки включали 300 снимков. Результаты испытаний представлены в таблице.

Результаты оценки эффективности методов локализации

Метод	Точность локализации, %	Коэффициент EER
Метод [4]	90,0	0.082
Метод [6]	87,3	0.095
Метод [7]	98,0	0.073
Метод [9]	91,0	0.088

Анализ результатов численных экспериментов выполнялся по каждому из рассматриваемых выше методов.

Метод локализации, основанный на интегро-дифференциальном операторе Даугмана [4]. Установлено, что использование данного подхода в изображениях, полученных некооперативным путем, приводит к погрешностям, которые можно связать со следующими причинами:

1. РОГ на таких изображениях, как правило, закрыта веками сверху и снизу, поэтому при поиске внешних границ учитывается только часть кругового контура.

2. Блики и отражения, имеющие сильный контрастный переход на границе, могут восприниматься как контур (в реальности ложный, включающий границу блика).

3. Форма границ РОГ в некоторых случаях может существенно отличаться от идеальной окружности.

4. Имеют место искажения формы РОГ, вносимые поворотом и наклоном головы относительно оптической оси при сканировании.

Преобразование Хафа. Апробация подхода показала, в этом случае корректно определяются границы, имеющие формы идеальной окружности, что крайне редко в системах некооперативного распознавания. Серьезное отклонение от заданной формы вызывает сбой в работе. При существенном повороте глаза подход также практически не работает. Скорость работы снижает высокая алгоритмическая сложность. Метод работает не с самим изображением, а с его контуром. Контуров выделяют, например: обработкой изображения высокочастотными фильтрами (в качестве ядра фильтра выступает оператор Собеля) с последующей бинаризацией; детектором границ Кэнни.

Данные, представленные в таблице, показывают, что методы, основанные на интегро-дифференциальном операторе Даугмана и преобразовании Хафа, хорошо работают в идеальных условиях, когда РОГ на изображениях имеют правильную форму и ракурс.

Метод активных контуров. Выполненные численные эксперименты показали, что достоинством метода является возможность сегментации объектов произвольной формы. Можно учесть, например, поворот глаза и наличие век, так как не требуется круглая форма объекта. Правильный выбор параметров данного метода дает возможность использовать его в изображениях, имеющих слабоконтрастные границы. Однако метод имеет высокую алгоритмическую сложность. Предварительное выделение контуров РОГ относится к нетривиальным задачам. Было установлено, что успешность локализации определяющим образом зависит от правильности выбора начальных условий.

Итеративный метод локализации РОГ, основанный на механической модели упругих тел [9], показывает высокую скорость работы. Влияние бликов на точность определения границ несущественно. Однако метод не учитывает отклонение формы РОГ от идеальной окружности. При существенном повороте глаза относительно оптической оси, характерном для некооперативного распознавания, метод перестает корректно работать.

Заключение. В работе представлены основные проблемы, возникающие при распознавании снимков РОГ, полученных некооперативным путем. Выбраны и проанализированы методы локализации РОГ, способные по предварительным оценкам работать в си-

стемах некооперативного распознавания. С помощью численных экспериментов установлено, что наиболее перспективным для использования в информационных системах идентификации личности оказался

подход к локализации РОГ, основанный на активных контурах. Его использование позволяет учитывать и решать проблемы, возникающие при некооперативном распознавании.

Библиографический список

1. Поляков В.В., Трушин В.А., Рева И.А. и др. Региональные аспекты технической и правовой защиты информации: монография. — Барнаул, 2013.
2. Вязьмина А.Н., Жилин С.И. Алгоритмы распознавания лиц, устойчивые к вариациям освещения и геометрических характеристик // Труды молодых ученых Алтайского гос. ун-та. — 2013. — № 10.
3. Третьяков И.Н., Минакова Н.Н. Алгоритм разграничения доступа по радужной оболочке глаза для решения задач контроля доступа к информационным ресурсам // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. — 2010. — № 1–1.
4. Daugman J. How Iris Recognition Works // Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. — 2004. — № 1 (14).
5. Tan T., He Z., Sun Z. Efficient and Robust Segmentation of Noisy Iris Images for Non-cooperative Iris Recognition // Image and Vision Computing. — 2010. — № 2 (28).
6. Illingworth J., Kittler J. A Survey of the Hough Transform // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. — 1988. — № 1 (44).
7. Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active Contour Models // International Journal of Computer Vision. — 1988. — № 4 (1).
8. Daugman J. New Methods in Iris Recognition // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics. — 2007. — № 5 (37).
9. He Z., Tan T., Sun Z. Iris Localization via Pulling and Pushing // 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). — 2006. — № 1.
10. Минакова Н.Н., Петров И.В. Информационная система анализа структуры радужной оболочки глаза // Ползуновский вестник. — 2012. — № 3/2.
11. Hannani A.El., Petrovska-Delacrétaz D., Fauve B., Mayoue A., Mason Guide J. To Biometric Reference Systems and Performance Evaluation // Springer Science & Business Media. — 2009.
12. Proenc H., Alexandre L.A. UBIRIS: A Noisy Iris Image Database // Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures. — 2005. — № 1.