

# Выделение зрачка на изображении глаза преобразованием Хафа границ компонент связности

И. Матвеев<sup>1</sup>, Н. Чинаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия  
matveev@ccas.ru

## Аннотация

Предложен метод поиска зрачка на изображении глаза. Граница зрачка определяется как граница или часть границы одной из компонент связности, получаемых бинаризацией исходного изображения. Для выделения части границы, соответствующей зрачку, используется модификация преобразования Хафа для окружностей. Метод испытан на 70000 изображениях радужки из баз, находящихся в открытом доступе.

**Ключевые слова:** сегментация радужки, преобразование Хафа, компоненты связности.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Выделение области радужки на изображении глаза – интересная и актуальная задача в системах биометрической идентификации и медицинских приложениях. Важнейшей подзадачей является определение границы зрачка, по сути, поиск округлого тёмного объекта. Проблема поиска круга/окружности – одна из наиболее известных в обработке изображения. Для её решения создано большое количество различных методов, часть из которых применима в данном частном случае. Можно назвать морфологическое выделение круга [1], проекции яркости или её градиента [7], построение оптимального контура [10]. В морфологическом подходе и методах, основанных на проекциях яркости, применяется бинаризация изображения с некоторым порогом, после чего рассматривается наибольшее связное множество точек с яркостями ниже пороговой, исходя из предположения, что зрачок – наиболее тёмная область на изображении глаза. Преимуществом этих методов является скорость исполнения. Следует отметить, что границы, выделяемые при бинаризации, состоят из сравнительно небольшого количества точек. Однако при бинаризации часто выделяется несколько компонент связности, кроме того, на изображениях радужки ресницы и веки могут сливаться со зрачком, образуя одну компоненту неадекватной формы. Поэтому недостатком этого класса методов является значительное число ошибок, связанных с искажением формы объектов, удалением частей фигур. Большая группа методов [2, 5, 8] основана на идеологии преобразования Хафа. Преимуществом преобразования Хафа является устойчивость к удалению части фигуры, например, с его помощью можно найти окружность по одной или нескольким дугам. Недостаток – большая вычислительная сложность.

В работе сделана попытка совместить преимущества метода бинаризации, извлекающего малое количество представляющих интерес пикселей границ областей связности, и преобразования Хафа, которое выделяет форму заданного типа из сильно зашумлённых данных. На бинаризованном изображении выделяются компоненты связности, граница каждой из которых подвергается преобразованию Хафа с целью поиска

округлых контуров. Использование такого сочетания методов из литературы авторам неизвестно.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

На изображении глаза с прилегающими частями лица (брови, нос, часть щеки) необходимо найти окружность, являющуюся наилучшей аппроксимацией границы зрачок-радужка. Граница может быть частично закрыта веками, ресницами, бликами. Зрачок является тёмным, но не обязательно самым тёмным объектом на изображении, см. рис. 1 (а).

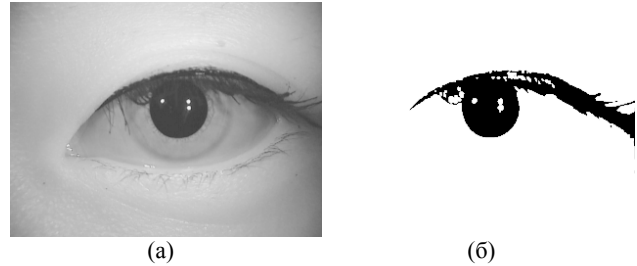


Рис. 1. Исходное изображение (а) и результат его бинаризации (б)

Обозначим исходное растровое изображение  $I(x, y) = I(\vec{p})$ . Необходимо найти координаты и радиус окружности, аппроксимирующей зрачок. На изображении методом бинаризации выделяются компоненты связности  $C$ , соответствующие тёмным областям. Для каждой компоненты определяется её граница  $L(C) = \{l_i\}$  – циклическая последовательность пикселей. Следует отметить, что количество пикселей в такой последовательности значительно меньше числа пикселей с высоким градиентом яркости, которые можно было бы считать граничными. Зрачок не всегда граничит только с более светлой радужкой, но часто бывает прикрыт веками и/или ресницами, что создаёт помехи двух видов: граница зрачка на изображении присутствует лишь частично; яркость век и ресниц может быть такой же или даже ниже яркости зрачка, и при выделении компоненты связности зрачок сливается с ними; см. рис. 1 (б). В этом случае лишь небольшая часть границы компоненты связности является границей зрачка, но метод должен определить ту часть границы, которая представлена на изображении. Проводится преобразование Хафа, состоящее в построении в аккумуляторном пространстве луча из каждого пикселя границы перпендикулярно её направлению. В результате, если граница содержала дуги окружности, в аккумуляторе возникают значимые локальные максимумы на месте центров гипотетических окружностей, содержащих эти дуги. Глобальный максимум аккумулятора соответствует наиболее правдоподобному положению окружности. Для определения её радиуса строится гистограмма расстояний от найденного положения

центра до граничных пикселей. Максимум гистограммы соответствует радиусу. Из нескольких гипотетических окружностей, построенных таким образом для разных компонент связности, выбирается наилучшая, согласно критериям качества. Блок-схема метода представлена на рис. 2.

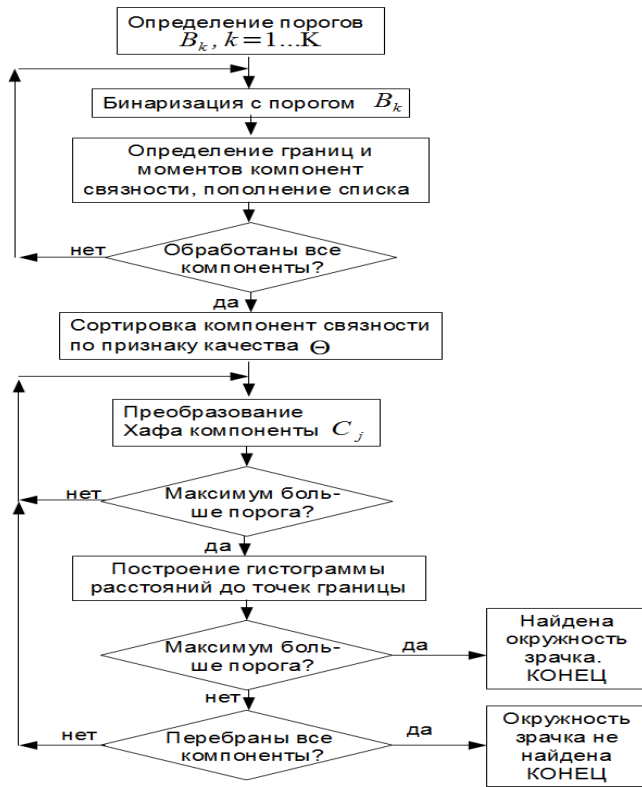


Рис. 2. Блок-схема работы метода

Более подробно рассмотрим его работу.

### 2.1. Определение порогов бинаризации.

Поскольку заранее неизвестны уровни яркости зрачка и радужки, а, следовательно, порог бинаризации, который разделит их, производится несколько проходов (обозначим их количество  $K$ ) алгоритма при разных порогах. Величины используемых порогов определяются так, чтобы количество пикселей с яркостью ниже порога составляло определённую долю их общего числа на изображении. Для этого используется гистограмма яркости:

$$H(b) = \left\{ \bar{p} : I(\bar{p}) \leq b \right\}. \quad (1)$$

Анализируется часть гистограммы, соответствующая малым яркостям. Доли точек  $\alpha_k$ , определяющих пороги бинаризации, задаются равномерно на участке от 0 до 1/4 общего числа точек:

$$\alpha_m = \frac{1}{4} \frac{k}{K}, \quad k = 1, \dots, K. \quad (2)$$

Пороги бинаризации  $B_k$  вычисляются, согласно (1) и (2):

$$B_k : H(B_k) = \alpha_k WH. \quad (3)$$

### 2.2. Бинаризация

Операция бинаризации проводится так, чтобы обнулить яркости, превышающие порог, и выделить пиксели с меньшими яркостями, с тем, чтобы далее рассматривать объекты, полученные из тёмных областей. Пример бинаризованного изображения приведён на рис. 1 (б).

### 2.3. Определение границ и моментов компонент связности

На бинаризованном изображении тёмные (с яркостью меньше порога) области формируют несколько компонент связности. Для каждой компоненты определяются упорядоченный список граничных точек и моменты нулевого, первого и второго порядка, которые используются далее для вычисления качества компоненты. Моменты определяются посредством перебора всех точек компоненты методом заливки. Каждая компонента, удовлетворяющая условиям (4), вносится в список, общий для всех порогов бинаризации.

### 2.4. Отбраковка и сортировка компонент

Выделенные на этапах бинаризации компоненты необходимо обработать преобразованием Хафа. Однако уже по статистическим признакам этих компонент до преобразования можно отбросить их часть, заведомо не содержащую зрачка, а оставшиеся отсортировать так, чтобы обрабатывать вначале компоненты, содержащие зрачок с наибольшей вероятностью. Для удаления заведомо не содержащих зрачок (или имеющих неадекватную форму) компонент связности используются параметры *эквивалентного эллипса*, имеющего те же моменты, что и компонента. Компонента связности, содержащая зрачок, должна иметь достаточно большую площадь, а отношение длины большой полуоси к малой не должно быть слишком большим. Кроме того, в случае, когда на изображении глаза ресницы/веки имеют яркость такую же или меньшую, чем зрачок, искажение формы компоненты связности, вносимое этим, вытягивает её по горизонтали, но не в вертикальном направлении. Соответственно, объекты с эквивалентным эллипсом, имеющим значительный эксцентриситет и большой осью, расположенной ближе к вертикали, должны быть отброшены. Эти условия записываются как:

$$\begin{aligned} ab &> \rho_{\min}^2, \\ \frac{a}{b} &< T_1, \\ \neg \left( \left( \frac{a}{b} > T_2 \right) \cap \left( \varphi \in \left[ \frac{\pi}{4}; \frac{3\pi}{4} \right] \right) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho_{\min}$  – минимальный возможный радиус зрачка в пикселях. Оптимальные значения порогов  $T_1 = 5$ ,  $T_2 = 2.5$  установлены экспериментально. Для сортировки оставшихся компонент вычисляется критерий качества:

$$\Theta(C) = \frac{M(C) - s(C)}{s^2(C)}, \quad (5)$$

где  $s(C) = |L(C)|$  – длина границы компоненты связности,  $M(C)$  – её масса. Данный признак увеличивается по мере приближения формы области к круговой, также он возрастает при увеличении размера области. Таким образом, при обработке компонент связности, отсортированных по убыванию

признака (5), предпочтение отдаётся округлым компонентам значительного размера.

## 2.5. Преобразование Хафа

Проводится процедура голосования: строятся внутренние нормали в каждом пикселе  $\vec{l}_i \in L$ , на луче нормали выбирается отрезок, ограниченный некоторыми значениями  $\rho_{\min}$  и  $\rho_{\max}$ , после чего значения элементов аккумуляторного пространства в точках отрезка увеличиваются на единицу:

$$A(\vec{p}) := A(\vec{p}) + u(\vec{p}, \vec{l}_i),$$

$$u(\vec{p}, \vec{l}_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } \vec{p} = r\vec{\eta} + \vec{l}_i, \quad r \in [\rho_{\min}; \rho_{\max}] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (6)$$

Вектора нормали  $\vec{\eta}$  строится следующим образом: выбираются ближайшие соседи пикселя  $\vec{l}_i$  в списке  $L$ , обозначим их  $\vec{l}_j$ , где отрицательный индекс соответствует перемещению вверх по циклическому списку, положительный – перемещению вниз. По координатам выбранных пикселей аппроксимируется касательное направление  $\vec{\tau}$ :

$$\tau = \sum_{j=-n}^{-1} \frac{\vec{l}_i - \vec{l}_j}{|\vec{l}_i - \vec{l}_j|} + \sum_{j=1}^n \frac{\vec{l}_j - \vec{l}_i}{|\vec{l}_j - \vec{l}_i|}, \quad (7)$$

где  $n$  – величина окрестности пикселя, выбирается равной  $\rho_{\min} / 2$ . Из двух возможных нормальных направлений выбирается внутренняя нормаль, к направлению обхода. Отрезок голосования строится в растре аккумулятора алгоритмом Брезенхема. По окончании процедуры голосования значения в аккумуляторном пространстве сглаживаются фильтром низкой частоты. Центр гипотетической окружности находится как глобальный максимум в сглаженном аккумуляторе.

На рис. 3 (а) представлен результат описанного преобразования Хафа для наибольшей из компонент связности изображения рис. 2 (б), которая содержит зрачок. Это единственная обработанная компонента, остальные были отбракованы на предыдущем шаге.

## 2.6. Построение гистограммы расстояний до пикселей границы

Строится гистограмма  $H(r)$  расстояний от найденного центра  $\vec{c}$  области до всех точек границы:

$$H(r) = \left| \left\{ \vec{l}_i : \vec{l}_i \in L, r - 0,5 \leq \|\vec{c} - \vec{l}_i\| < r + 0,5 \right\} \right|. \quad (8)$$

Гистограмма в случае принадлежности зрачка компоненте имеет специфический вид. Например, на рис. 3 (б), дана гистограмма для компоненты рис. 2 (б). Виден пик, соответствующий радиусу зрачка, присутствующего на изображении  $r_p = \arg \max H(r)$ . Окончательный вывод относительно того, содержится ли зрачок в компоненте, делается на основе анализа гистограммы. Вычисляется её масса в окне шириной

$W$  с центром в точке  $r_p$ , где наблюдается максимальное среди всех значение гистограммы. Полученное значение представляет собой оценку длины видимого контура зрачка и сравнивается с  $r_p$ . Считается, что зрачок найден, если

$$\sum_{r=r_p-W}^{r_p+W} H(r) > \pi r_p, \quad (9)$$

то есть достаточным условием для обнаружения зрачка является видимость половины его окружности.

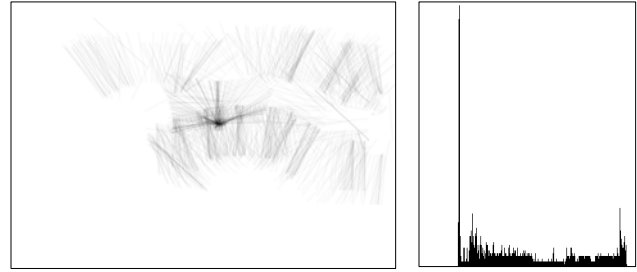


Рис. 3. Обработка компонент связности: (а) - результат голосования по компоненте изображения 1 (б) с наибольшим значением  $\Theta$  и удовлетворяющей условиям (4); (б) - гистограмма расстояний (8) от гипотетического центра окружности до пикселей границы

Таким образом, метод состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Построение гистограммы яркостей (1). Вычисление порогов бинаризации  $B_k$ , согласно (3).

Далее для каждого  $k$  выполняются шаги 2 - 3.

Шаг 2. Бинаризация с порогом  $B_k$ .

Шаг 3. Определение моментов и границ каждой из компонент связности, отбраковка несоответствующих критериям (4) и сохранение оставшихся в списке.

Шаг 4. Сортировка накопленных компонент связности согласно критерию качества (5).

Дальнейшие шаги 5 - 7 выполняются поочередно над элементами отсортированного списка, пока не будет встречен элемент, удовлетворяющий условиям (как правило, это первый элемент отсортированного списка) или не произойдёт исчерпание списка.

Шаг 5. Преобразование Хафа (6) над границами, находится максимум аккумулятора.

Шаг 6. Если максимум достаточно велик, строится гистограмма расстояний (8) от его положения до точек границ.

Шаг 7. Если на гистограмме существует пик, то это значит, что существует округлый участок границы с центром, близким к положению максимума и радиусом, равным координате пика на гистограмме расстояний.

## 2.7. Оценка алгоритмической сложности

Высота и ширина изображения – величины одного порядка, поэтому для простоты обозначим линейный размер изображения  $W$ , а число точек  $W^2$ . Вычисление порогов бинаризации состоит из построения гистограммы яркости и её обработки, сложность этого равна  $\max\{W^2, Z\}$ , где  $Z$  - число

градаций яркости изображения. Используются 8-битовые монохромные изображения, а значит,  $Z = 256 \ll W^2$ . Для одного шага бинаризации вычисление самой бинаризации и выделение компонент связности имеют сложность  $W^2$ . Число компонент связности можно оценить сверху как  $W^2 / \rho_{\min}^2$ , где  $\rho_{\min}$  - минимальный ожидаемый радиус зрачка. Длина границы компоненты связности оценивается как  $W$ . Сложность  $K$  проходов бинаризации составляет  $KW^2$ , в результате выделяется  $KW^2 / \rho_{\min}^2$  компонент связности. Голосование в процедуре Хафа для одной точки имеет сложность  $W$ , для всей границы одной компоненты  $W^2$ . Поиск максимума в аккумуляторе также имеет сложность  $W^2$ . Итак, с учётом числа компонент общая сложность работы всего метода составляет  $KW^4 / \rho_{\min}^2$ .

### 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для тестирования были использованы изображения открытых баз [3, 9]. Эти изображения были размечены экспертами: на каждом была построена окружность радиуса  $r_0$  с центром в точке  $(x_0, y_0)$ , приближающая границу зрачка. Найденные алгоритмом центр  $(x, y)$  и радиус  $r$  окружности зрачка на каждом изображении сравнивались с экспертными, и вычислялись отклонения положения центра  $|x - x_0| + |y - y_0|$  и величины радиуса  $|r - r_0|$ . В таблице приведено сравнение метода с некоторыми известными аналогами по средним отклонениям центра и радиуса.

Сравнение с некоторыми известными методами

База	Ошибка	Методы			
		Masek [4]	Ma et al. [3]	Daugman [10]	Данный
CASIA	центр	3,67	4,79	1,19	2,82
	радиус	5,15	5,39	3,02	1,26
NDARIS	центр	5,59	5,92	1,79	3,94
	радиус	7,23	7,39	3,11	1,89

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод выделения контура зрачка на изображении глаза. Контур строится из точек, лежащих на границе одной из компонент связности множества тёмных точек, полученных при бинаризации изображения. Для выбора правильной (наиболее близкой к окружности) компоненты (или её части) используется преобразование Хафа для граничных точек, приводящее к выделению центра её округлой части. Радиус окружности определяется как максимум гистограммы расстояний граничных точек до выделенного центра. Сами точки контура зрачка затем выбираются из всего множества точек границы как имеющие близкое к этому радиусу расстояние до центра. Проведена апробация работы алгоритма на наборе изображений из открытых баз данных.

Использование преобразования Хафа позволяет корректно выделять истинные центр, радиус и контур зрачка даже при наличии больших помех, при условии лишь частичной видимости контура зрачка на изображении. Недостатком метода является потенциально большое время работы, возникающее при переборе многих компонент связности и нескольких порогов бинаризации. Этот недостаток частично скомпенсирован введением признака качества компоненты связности.

### 5. AKNOLEDGMENTS

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №12-01-00893).

### 6. REFERENCES

- [1] Bakshi S., Mehrotra H., Majhi B. Real-time Iris Segmentation based on Image Morphology // Proc. Int. Conf. Communication, Computing and Security. Odisha, India, February 12-14, 2011.
- [2] Chen D., Bai J., and Qu Z. Research on pupil center location based on improved Hough transform and edge gradient algorithm. Proc. National Conf. Information Technology and Computer Science, 2012. – P. 47 – 51,
- [3] Chinese Academy of Sciences Institute of Automation. Iris image database, version 3, 2005.
- [4] J. Daugman. New methods in iris recognition. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 37:1167 – 1175, 2007.
- [5] Ma L., Wang Y. and Tan T. Iris recognition using circular symmetric filters. Proc. 16th Int. Conf. Pattern Recognition, 1(2):414 – 417, 2002.
- [6] L. Masek. Recognition of human iris patterns for biometric identification. <http://www.csse.uwa.edu.au/pk/studentprojects/libor>, 2003.
- [7] Mohammed G.J., Hong B.R. and Jarjes A.A. Accurate pupil features extraction based on new projection function. Computing and Informatics, 29:663 – 680, 2010.
- [8] L. Pan, W.S. Chu, J.M. Saragih, and F. de la Torre. Fast and robust circular object detection with probabilistic pairwise voting. Signal Processing Letters, 18(11):639–642, 2011.
- [9] Phillips P., Scruggs W. and O’Toole A. et al. Frvt 2006 and ice2006 large-scale experimental results. IEEE PAMI, 5(32):831–846, 2010.
- [10] Ritter N.J. and Cooper J.R. Locating the iris: A first step to registration and identification. Proc. 9th IASTED Int. Conf. Signal and Image Processing, 2003. – P. 507 – 512.

### Информация об авторах

Матвеев Иван – к.ф.-м.н., зав. сектором ВЦ РАН.

Чинаев Николай – студент МФТИ.