

УДК 004.93

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ГРАНИЦ ЗРАЧКА НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Лукошков И.А., Артемова А.А., Белов Ю.С.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, филиал, Калуга,
e-mail: lukoshkov.ivan@gmail.com, fn1-kf@mail.ru*

В настоящее время отслеживание взгляда имеет широкую область применений: от офтальмологии и вспомогательных технологий для лиц с ограниченными возможностями до приложений виртуальной реальности. Нахождение контура и центра зрачка – это самый первый шаг во многих из этих задач, поэтому его необходимо выполнять с высокой точностью. Несмотря на то что на сегодняшний день предложено множество методов для поиска границ зрачка, они имеют недостатки в точности, устойчивости к помехам или времени работы. В данной статье описывается алгоритм адаптивного и точного обнаружения границ зрачка, основанный на извлечении эллиптических дуг из краевых сегментов изображения глаза и их соединении для нахождения границы зрачка и вычисления положения его центра. Адаптивность метода заключается в вычислительно эффективном анализе формы обнаруженных краевых сегментов, поиске среди них почти круговых сегментов, потенциально являющихся границами зрачка, и исключении прочих сегментов из дальнейших проверок. Помимо точного определения границы и центра зрачка, алгоритм также может определить ситуацию отсутствия зрачка на изображении, т.е. в случае моргания, что может быть полезно при организации человеко-машинных интерфейсов взаимодействия.

Ключевые слова: нахождение зрачка, отслеживание взгляда, извлечение эллиптических дуг, подгонка эллипса, распознавание формы, компьютерное зрение

ADAPTIVE ALGORITHM FOR PUPIL BOUNDARY DETECTION ON THE IMAGE

Lukoshkov I.A., Artemova A.A., Belov Yu.S.

*Bauman Moscow State Technical University, branch, Kaluga,
e-mail: lukoshkov.ivan@gmail.com, fn1-kf@mail.ru*

Currently, eye tracking has a wide range of applications: from ophthalmology and assistive technologies for people with disabilities to virtual reality applications. Finding the contour and center of the pupil is the very first step in many of these tasks, so it must be performed with high accuracy. Despite the fact that to date, many methods for finding the boundaries of the pupil have been proposed, they have drawbacks in accuracy, resistance to interference, or operating time. This article describes an algorithm for adaptive and accurate detection of pupil boundaries, based on the extraction of elliptical arcs from the edge segments of the eye image and their connection to find the pupil border and calculate the position of its center. The adaptability of the method consists in a computationally effective analysis of the shape of the detected edge segments, the search for almost circular segments among them, which are potentially pupil boundaries, and the exclusion of other segments from further checks. In addition to accurately determining the border and the center of the pupil, the algorithm can also determine the situation of the absence of the pupil in the image, i.e. in case of blinking, which may be useful when organizing human-machine interaction interfaces.

Keywords: pupil detection, eye tracking, elliptical arc detection, ellipse fitting, shape recognition, computer vision

Отслеживание взгляда стало важной областью исследований с широким набором практических применений, включая взаимодействие человека с компьютером, медицинские исследования, вспомогательные системы для водителей и людей с ограниченными возможностями, маркетинговые исследования и биометрию [1]. Обнаружение границы и центра зрачка и вычисление положения его центра являются важными шагами во всех системах слежения за глазами и должны выполняться с высокой точностью.

Цель исследования: предложить эффективный и точный алгоритм поиска границ зрачка на изображении глаза, основанный на существующих методах компьютерного зрения.

Материалы и методы исследования

В большинстве исследований обнаружение зрачка осуществляется с помощью про-

стых методов, которые недостаточно точны и дают сбой в случаях наличия искажений и помех на изображении. В этом исследовании мы сосредоточились на разработке эффективного алгоритма на основе признаков для обнаружения границ зрачка с использованием энтропии краевых сегментов.

Алгоритм представляет собой простой рабочий процесс и состоит из этапов, показанных на рис. 1. Обработка начинается с обнаружения области интереса (ROI) путем свертывания изображения глаза с помощью функции Хаара. Затем извлекаются краевые сегменты, каждый из которых представляет собой непрерывный массив пикселей. Следующим шагом является определение того, имеется ли почти круговой сегмент, который охватывает всю границу зрачка. Такой краевой сегмент будет существовать, только если зрачок хорошо виден без окклюзии или очень мал. Что-

бы определить, имеет ли краевой сегмент круговую геометрию, используется быстрый эвристический метод, основанный на градиентном распределении краевого сегмента. При условии обнаружения почти круглого сегмента мы извлекаем эллиптические дуги только из этого сегмента. Если почти круговой сегмент не найден, что было бы в случае, если зрачок сильно закрыт веками или ресницами, то извлекаются дуги из всех краевых сегментов в области интереса.

После извлечения эллиптических дуг мы объединяем их в каждой возможной комбинации, чтобы сгенерировать набор кандидатов на эллипс, по крайней мере один из которых аппроксимирует границу зрачка. Наконец, кандидаты оцениваются на предмет их соответствия фактическому контуру зрачка, и наилучший, если он существует, выбирается среди эллипсов-кандидатов.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе алгоритма приблизительно оценивается площадь зрачка на всем изображении глаза. Зрачок можно описать как темный и компактный шарик, поскольку он состоит из более темных уровней интенсивности, чем окружающая его радужная оболочка, и обычно имеет эллиптическую форму с низким эксцентриситетом. Чтобы определить местонахождение обла-

сти зрачка, используется квадратный Хаг-подобный признак [2, 3], имеющий соотношение 3/5 между внутренней и внешней областями (рис. 2).

У человеческого глаза есть несколько физиологических свойств, которые различаются у индивидов: радиус глазного яблока, кривизна роговицы, расстояние между центром зрачка и центром роговицы и т.д. [4]. Размер зрачка также непостоянен как из-за физиологических различий между людьми, так и из-за расширения зрачка, которое происходит при изменениях освещенности. Поэтому применяется ядро Хаг-подобного признака в нескольких масштабах и выбирается область, где дается максимальный отклик на единицу.

Для обнаружения всех краевых сегментов в области интереса используется детектор краевых сегментов Edge Drawing (ED) [5, 6]. Алгоритм ED работает, сначала идентифицируя набор точек на изображении, называемых якорями, а затем соединяя эти якоря таким образом, чтобы максимизировать градиентный отклик контуров пути, следовательно, обеспечивает хорошую локализацию края. ED выводит не только двоичную карту краев, аналогичную тем, которые выводятся обычными детекторами краев, но также показывает результат в виде набора краевых сегментов, каждый из которых представляет собой непрерывную и соединенную цепочку пикселей [7].

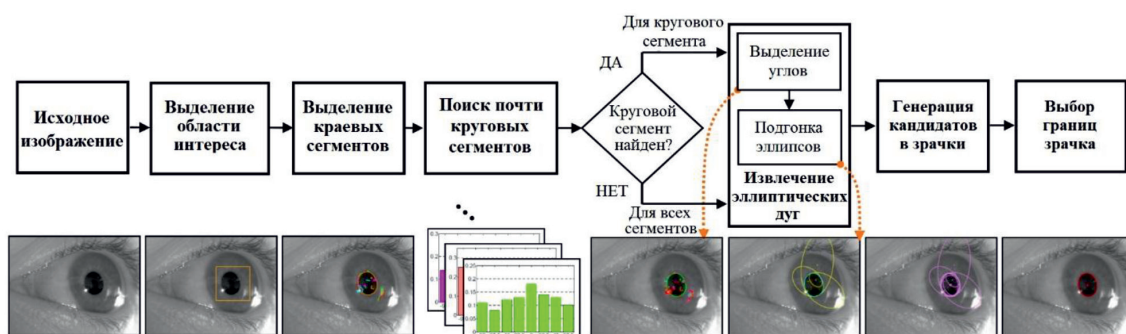


Рис. 1. Конвейер обработки предлагаемого алгоритма

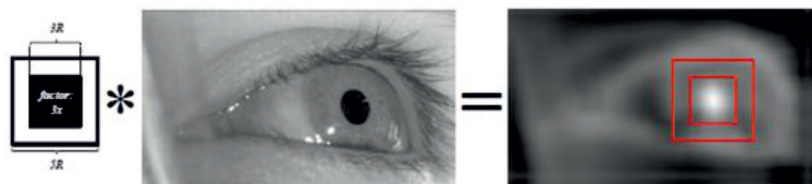


Рис. 2. Обнаружение области интереса с помощью операции свертки с квадратной функцией Хаара (слева) и результатом свертки (справа)

Как только краевые сегменты обнаружены, нужно найти тот, который представляет границу зрачка. Наиболее интуитивное решение состоит в том, чтобы подогнуть эллипс к каждому краевому сегменту, вычислить ошибку подгонки и выбрать сегмент, имеющий наименьшую ошибку подгонки. Однако для подбора эллипса и вычисления ошибки подгонки для каждого сегмента требуется слишком много вычислений.

Чтобы уменьшить эту вычислительную нагрузку, используется более быстрый метод, основанный на анализе направлений градиента. Градиенты сегментов содержат существенную информацию о геометрической структуре и используются в задачах сопоставления, поиска и распознавания формы [8, 9]. Поскольку вертикальные и горизонтальные производные изображения глаза уже вычислены на этапе обнаружения краев, можно найти направления градиента с помощью значительно меньшего количества вычислений:

$$\infty = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right).$$

Функция $\arctan$ приводит значения углов в интервале $[-90^\circ, 90^\circ]$, но, прежде чем исследовать распределение градиентов, следует произвести квантование углов с шагом $22,5^\circ$, чтобы получить дискретные значения в восьми разных направлениях.

Получив квантованные направления градиента для всех пикселей в сегменте, можно определить характеристики формы этого сегмента. Нетрудно заметить, что круглые краевые сегменты будут иметь относительно равномерное распределение градиента, тогда как прямые сегменты имеют несбалансированное распределение, в котором доминируют несколько значений. Таким образом, можно выделить круглые краевые сегменты, используя функцию энтропии на квантованных градиентных распределениях сегментов:

$$E = -\sum_i^n p_i \cdot \log(p_i).$$

Поскольку функция энтропии максимизируется для плоских распределений, где частота каждого символа равна, энтропия распределения градиента для каждого отдельного краевого сегмента вычисляется следующим образом:

$$\arg \max \left| \sum_i^8 f_{G_i} \cdot \log(f_{G_i}) \right|,$$

где f_{G_i} — частота i -го направления градиента. Значения энтропии градиентов краевых

сегментов максимизируются для идеального круга и принимают нулевое значение для прямых линий, поскольку направление градиента вдоль прямой не меняется. Поскольку единичный круг квантуется в восьми направлениях, количество различных символов равно восьми, а максимальное значение энтропии равно $\log_2 8 = 3$. С помощью этой эвристики можно отказаться от порогового значения.

После вычисления градиентной энтропии краевых сегментов один сегмент выбирается в качестве сегмента, близкого к кругу, и из него извлекаются эллиптические дуги, если удовлетворяются следующие три критерия:

1) сегмент должен иметь высокую градиентную энтропию. Теоретическая верхняя граница энтропии для восьми различных направлений градиента равна $\log_2 8 = 3$. Соответственно, выбираются сегменты, которые имеют 2,8 или более градиентной энтропии;

2) сегмент должен иметь небольшую ошибку подгонки эллипса к образующим его пикселям, например 2 пикселя;

3) сегмент должен быть замкнутым. Чтобы избежать проблем из-за небольших окклюзий, таких как блики, используется порог в 15 пикселей для расстояния между начальной и конечной точками сегмента.

В случае если более одного краевого сегмента удовлетворяет всем трем условиям, указанным выше, в качестве почти круглого сегмента выбирается тот, который имеет минимальную ошибку подгонки эллипса. Хотя наличие почти круглого сегмента ускоряет вычисление, оно не является обязательным для обнаружения зрачка.

Следующим этапом алгоритма является извлечение эллиптических дуг из краевых сегментов, полученных на предыдущем этапе. Если на предыдущем этапе можно найти почти круговой сегмент, дуги извлекаются только из этого сегмента. Если почти круглого сегмента не обнаружено, то все сегменты, которые имеют высокую градиентную энтропию (то есть >2), подвергаются процессу извлечения дуги. Таким образом, алгоритм адаптируется и требует меньше вычислений, когда контур зрачка полностью виден. Ввиду того что прямая геометрия редко содержит эллиптические дуги, опускаются сегменты, имеющие низкую градиентную энтропию, а также короткие сегменты, чтобы сэкономить время вычислений.

Далее происходит обнаружение углов на сегментах с помощью метода быстрого масштабирования кривизны (CSS), который использует информацию о градиенте изо-

бражения для вычисления кривизны угла поворота [10]. Кривизна – это функция, которая указывает величину отклонения геометрической сущности (в данном случае контура ребра) от плоской. Вдоль контура края функция кривизны дает более высокие отклики при резких изменениях траектории. После этого к точкам, лежащим между двумя последовательными углами вдоль каждого сегмента, подгоняется эллипс, и получаются эллиптические дуги.

На рис. 3, Б–Г представлены результаты процесса извлечения дуги для нескольких тестовых изображений, которые показаны на рис. 3, А с извлеченным ROI. В первых двух рядах зрачков полностью виден; значит, обнаружен почти круговой сегмент (обозначен красным). Следовательно, извлечение дуги применяется только к этому сегменту. Когда из-за окклюзии не удается обнаружить почти круглый сегмент, дуги выделяются из всех сегментов, имеющих высокую градиентную энтропию, чтобы избежать пропуска какой-либо важной информации (рис. 3 – 3-й, 4-й и 5-й ряды).

На следующем этапе генерируются эллипсы-кандидаты путем группировки извлеченных дуг. Чтобы сформировать кандидатов в зрачки, мы пытаемся подогнать эллипс к каждому подмножеству всех извлеченных дуг. За исключением пустого множества, для n дуг имеется $2^n - 1$ различных комбинаций дуг. На рис. 3, Д показаны все сгенерированные из извлеченных дуг кандидаты в зрачки.

Поскольку процесс генерации кандидатов в зрачки учитывает все подмножества выбранных дуг, группы несвязанных дуг, которые не образуют действительную эллиптическую структуру, также должны быть исключены после подбора эллипса.

Чтобы принять решение о выборе одного из кандидатов в качестве контура зрачка, используется функция стоимости J_c , которая учитывает следующие свойства эллипса-кандидата:

- 1) ошибка подгонки эллипса (ε);
- 2) эксцентриситет (e);
- 3) отношение пикселей дуги к периметру результирующего эллипса (ϕ).

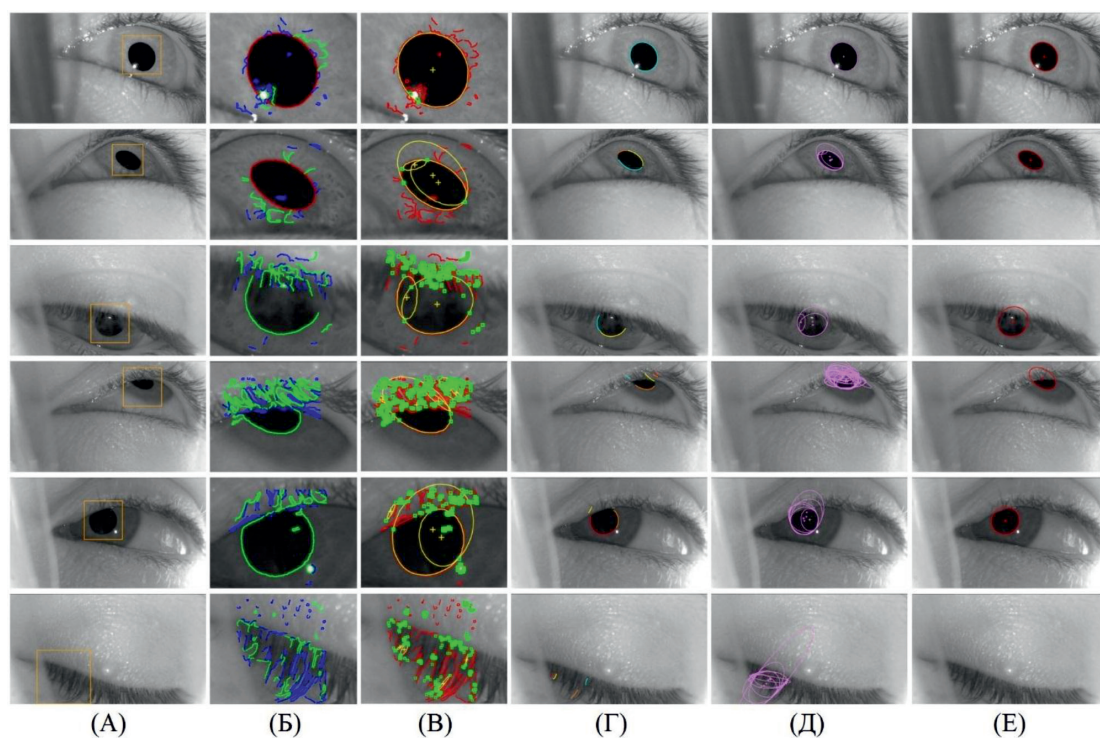


Рис. 3. Этапы обнаружения зрачка: (А) входное изображение с обнаруженной областью интереса; (Б) обнаруженные краевые сегменты в области интереса. Приблизительно круговой сегмент обозначается красным, если существует. Сегменты с высокой энтропией, которые подвергаются извлечению дуги, обозначены зеленым цветом. Короткие и имеющие низкую энтропию сегменты обозначены синим цветом; (В) обнаруженные углы (зеленые прямоугольники) и эллипсы, которые соответствуют пикселям, расположенным между двумя последовательными углами; (Г) извлеченные эллиптические дуги; (Д) множество кандидатов в границы зрачка; (Е) выбранный эллипс, представляющий контур зрачка

Каждый из зрачков-кандидатов образован одной или несколькими дугами. Если граница зрачка обнаруживается по нескольким дугам, ошибка подгонки должна быть разумной, потому что мы ожидаем, что дуги будут частями одного и того же эллиптического контура. Таким образом, нам нужно минимизировать ошибку подгонки ε .

Эксцентриситет (e) указывает на компактность эллипса или, другими словами, удаленность эллипса от круга, и вычисляется как

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, 0 < e < 1,$$

где a и b – большая и малая полуоси соответственно. Эксцентриситет равен 0 для круга и 1 для параболы. Среди кандидатов в зрачки, каждый из которых является подмножеством эллиптических дуг, существуют также разнообразные эллипсы, эксцентриситеты которых могут приближаться к 1. Однако проекция зрачка на плоскость изображения обычно ближе к кругу, чем к наклонному эллипсу.

Параметр ϕ представляет собой отношение числа пикселей, участвующих в подгонке эллипса, к периметру результирующего эллипса. В некоторых случаях одна короткая дуга может породить большой эллипс, что приводит к несогласованности. Поэтому выбираются кандидаты в зрачки, которые имеют большее значение ϕ .

Следует отметить, что влияние эксцентриситета (e) меньше, чем влияние ε и ϕ , поскольку существует возможность того, что истинный зрачок не будет самым компактным эллипсом среди кандидатов. Таким образом, среди кандидатов следует выбрать тот, который минимизирует следующую стоимостную функцию:

$$J_c(p_i) = \arg \min_{(\varepsilon, e, \phi)} \left| \frac{\varepsilon_i^2 \cdot \pi_i^e}{\phi_i^2} \right|,$$

где p_i – i -й кандидат, а π – постоянная.

Рис. 3, Е показывает результаты обнаружения зрачка для образцов изображений. Среди зрачков-кандидатов, показанных на рис. 3, Д, в качестве истинного зрачка выбран тот, который минимизирует J_c .

Заключение

Отслеживание глаз – это тема исследования, охватывающая широкий спектр вопросов, включая психологию, взаимодействие человека с компьютером, маркетинг, удобство использования и вспомогательные системы. Обнаружение зрачка является обязательным шагом во многих из этих приложений отслеживания глаз и должно быть выполнено быстро и точно. Точность алгоритма становится более очевидной в приложениях, таких как VR, AR, где пользователь контролирует или взаимодействует с другими объектами и интерфейсами.

Поскольку используемый метод обнаружения краевых сегментов обеспечивает оптимальную локализацию, извлекаемые эллиптические дуги точно окружают границу зрачка и аппроксимируют его центр. Кроме того, с помощью анализа распределения градиента повышается эффективность алгоритма за счет адаптивности и создается возможность для приложений реального времени, работающих с изображениями высокого разрешения.

Список литературы

1. Федоров А.А. Применение айтрекинга при адаптации и реабилитации людей с ограниченными возможностями // Инновационная наука. 2019. № 4. С. 82–85.
2. Шоберг А.Г. Схема кратномасштабного анализа одномерного сигнала на базисе Хаара, инвариантная к направлению выполнения преобразования // Информатика и системы управления. 2013. № 2. С. 146–152.
3. Шоберг А.Г. Модифицированное дискретное Вейвлет-преобразование двумерного сигнала на основе базиса Хаара // Информатика и системы управления. 2014. № 1. С. 107–114.
4. Hansen D.W., Ji Q. In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI). 2010. V. 32. no. 3. P. 478–500.
5. Akinlar C., Topal C., Circles E.D. A real-time circle detector with a false detection control. Pattern Recognition. 2013. V. 46. no. 3. P. 725–740.
6. Topal C., Akinlar C. Edge Drawing: A combined real-time edge and segment detector. Journal of Visual Communication and Image Representation. 2012. V. 23. no. 6. P. 86–872.
7. Topal C., Ozsen O., Akinlar C. Real-time edge segment detection with edge drawing algorithm, in: Int'l Symp. Image and Signal Processing and Analysis (ISPA). 2011. P. 313–318.
8. Jia L., Kitchen L. Object-based image similarity computation using inductive learning of contour-segment relations. IEEE Transactions on Image Processing. 2000. V. 9. no. 1. P. 80–87.
9. Martinez-Ortiz C., Zuni'c J. Curvature weighted gradient based shape orientation. Pattern Recognition. 2010. V. 43. no. 9. P. 3035–3041.
10. Topal C., Ozkan K., Benligiray B., Akinlar C. A robust CSS corner detector based on the turning angle curvature of image gradients. ICASSP. 2013. P. 1444–1448.