

УДК 57.087.1

**Разработка алгоритма определения положения центра зрачка для
бесконтактной системы взаимодействия человека с компьютером**

**Automatic detection of the pupil's center for adaptation system using
natural user interface for people with disabilities**

Пилипенко М.Н., Латышева Е.Ю., Спиридонов И.Н.

Pilipenko M.N., Latysheva E.Yu., Spiridonov I.N.

Аннотация

В статье описан алгоритм автоматического определения центра зрачка на видеоизображении с использованием текстурных признаков области глаз. Проведено сравнение разработанного алгоритма с традиционными алгоритмами определения центра зрачка на видеоизображении. Тестирование алгоритмов проводилось на базе видеоизображений, собранных в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В статье приведены результаты тестирования сравниваемых алгоритмов. Разработанный алгоритм показал лучший результат.

In this paper we propose an efficient algorithm for automatic detection of the pupil's center in the video using textural features of eye's area. Our algorithm is compared with different traditional algorithms. For testing we use facial database assembled in the BMSTU. The results of testing show high accuracy in detecting center of pupil using proposed algorithm.

Ключевые слова: определение центра зрачков, определение направления взгляда, естественный интерфейс человек-компьютер.

Keywords: pupil detection, gaze detection, natural user interface.

Введение

Реабилитация людей с ограниченными физическими возможностями является одним из приоритетных направлений медицины в настоящее время, как в нашей стране, так и за рубежом. Для расширения функциональных возможностей человека разрабатываются специальные технические средства для ухода, ориентирования, обучения, протезные изделия, тренажерное и спортивное оборудование [1]. При нарушениях двигательной иннервации конечностей и шеи одним из способов управления остаются движения глаз и мимика лица [2, 3]. С появлением технологии распознавания элементов двигательной активности человека, в частности жестов, мимики [4, 5], движения зрачков, стала возможна разработка альтернативных способов взаимодействия человека с компьютером. Для этих целей используются различные технические средства и программные продукты: трекары глаз, программное обеспечение (ПО), осуществляющее движение курсора по движению головы. Трекары глаз требуют дорогостоящего оборудования или крепления на специальных очках [6, 7]. Существующее ПО, использующее изображение с видеорегистратора, отражает только движения головы и имеет низкую точность позиционирования курсора [8, 9, 10].

Одним из направлений автоматизации управления функциями человека является создание биотехнической системы (БТС), обеспечивающей возможность бесконтактного управления курсором по направлению взгляда. Использование вебкамеры в качестве видеорегистратора позволяет сделать систему менее дорогостоящей. Поэтому целью данной работы является разработка алгоритма автоматического определения положения центра зрачка для осуществления автоматического позиционирования курсора на экране монитора.

Существуют различные подходы к определению центра зрачка на видеоизображении [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Однако они имеют ряд недостатков, связанных с использованием дорогостоящего оборудования, контактностью

технических средств, большими временными затратами на вычисление признаков и обучение алгоритмов.

Алгоритмы определения центра зрачка

Алгоритмы определения центра зрачка можно условно разделить на несколько типов:

- с использованием ИК-подсветки;
- традиционные алгоритмы определения центра зрачка.

К традиционным алгоритмам определения центра зрачка на видеоизображении можно отнести:

- алгоритмы, основанные на сравнении с заданным шаблоном глаз (зрачка);
- алгоритмы, основанные на геометрических характеристиках лица;
- алгоритмы, основанные на текстурных признаках.

Использование ИК-подсветки [19] обеспечивает высокий контраст зрачка и радужки: радужка вследствие отражения ИК-лучей представляется серым образованием, на фоне радужки выделяется черный зрачок, четко определяются его форма, размеры. Но такие системы являются либо контактными (специальная подсветка закрепляется на очках), либо требуют дорогостоящего оборудования.

Алгоритмы, использующие шаблоны зрачка, требуют длительных вычислений, высокого контраста изображения. Для создания шаблона, например, используют преобразования Хафа для окружностей [16].

Алгоритмы, основанные на геометрических характеристиках лица, обеспечивают выделение ключевых точек (или областей) лица для последующего экспериментального определения набора признаков [4, 5]. Затем производят обучение и классификацию признаков с использованием опорных векторов, метода главных компонент, линейного дискриминантного анализа, на основе

векторов создается нейронная сеть [12]. Недостатком данных алгоритмов является необходимость длительного сбора данных для обучения.

Алгоритмы, основанные на выявлении текстурных признаков, используют значения интенсивностей точек на изображении, краев областей [13, 14, 15]. Например, обеспечивают нахождение области зрачка как наиболее темной области, имеющей округлую форму, производят оценку интенсивностей пикселей изображения с помощью гистограммы распределения и ее модификации, анализ вертикальной и горизонтальной проекций. Для использования данных алгоритмов необходим высокий контраст изображения, но не требуется обучение и длительные вычисления.

Алгоритм определения центров зрачков

Для определения центра зрачка используется полутоновое изображение, содержащее область лица (правый и левый глаз) (Рис. 1).



Рисунок 1 – Исходное изображение

Разрабатываемый алгоритм определения координат центров зрачков основан на определении текстурных признаков. Алгоритм включает в себя предварительную обработку изображения для улучшения контраста исходного изображения. Предварительная обработка изображения состоит из преобразования цветного изображения в полутоновое, эквализации изображения, применении рангового фильтра и фильтра Винера [20]. При эквализации происходит изменение формы гистограммы на заданную форму. В качестве заданной формы гистограммы выбрана экспоненциальная зависимость, максимум которой приходится на самые темные участки. При ранговой фильтрации используется окно размером 5×5 и минимальный ранг фильтра, равный 1 [21]. Фильтр Винера

применяется для сглаживания изображения, в качестве критерия оптимальности для оценки фильтрации выбирается критерий минимума дисперсии [20]. Для всех положений скользящего окна с центральным пикселем и координатами (x, y) вычисляются среднее значение яркости μ и дисперсия σ^2 :

$$\mu = \frac{1}{mn} \sum_x \sum_y I_s(x, y) \quad 1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{mn} \sum_x \sum_y (I_s^2(x, y) - \mu^2) \quad 2)$$

Размер окна фильтрации 5×5 .

Далее производится операция адаптивной бинаризации, критериями остановки увеличения порога бинаризации t является сумма пикселей со значением 0, равная числу пикселей, приходящихся на область зрачка, а также разброс пикселей со значением 0 по координатам x, y , равный диаметру зрачка. Порог бинаризации $t \in [0, 1]$.

$$B(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } I(x, y) \leq t * 255 \\ 1, & \text{если } I(x, y) > t * 255 \end{cases} \quad 3)$$

где $I(x, y)$ - интенсивности исходного изображения, $B(x, y)$ - бинаризованное изображение, 255 – число градаций полутонового изображения. За центр зрачка принимается точка, соответствующая центру масс бинаризованного изображения.

Для определения частоты правильного определения центра зрачка разработанного алгоритма проведено тестирование, включающее сравнение точности работы разработанного алгоритма с точностью работы алгоритмов, части кодов которых доступны в пакете Image Processing Toolbox среды Matlab. Используются следующие алгоритмы:

1. К полутоновому изображению, прошедшему предварительную обработку, применяется вертикальный фильтр Собеля для выделения границ [21]. Фильтр Собеля для выделения вертикальных границ представляет собой матричную маску следующего вида:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Затем используется преобразование Хафа [16] для поиска окружности с максимальным количеством попадающих на нее пикселей границы. Уравнение окружности задается в виде:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2, \quad (5)$$

где (x, y) – координаты любой точки окружности, (x_0, y_0) – координаты центра окружности, R – радиус окружности. Далее производится поиск максимума аккумуляторной функции $A(x, y)$ в пространстве параметров (x, y) . Центр окружности принимается за центр зрачка. При поиске задавались возможные размеры зрачка от 6 до 14 пикселей.

2. Предварительно проводится операция бинаризации изображения с заданным порогом, равным отношению:

$$\frac{I_{min} + 10}{255}, \quad (6)$$

где I_{min} – минимальная интенсивность пикселей полутонового изображения, 255 – число градаций полутонового изображения. Затем используется маска в виде круга с диаметром, равным диаметру зрачка, и рассчитывается коэффициент корреляции для каждой области изображения. За центр зрачка принимается точка, в которой коэффициент корреляции максимален. Радиус окружности равен предполагаемому радиусу зрачка.

3. К изображению применяется фильтр Кэнни для нахождения границ, включающий сглаживание с маской:

$$G = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

и вычисление градиента по четырем направлениям для обнаружения горизонтальных, вертикальных и диагональных ребер в размытом изображении.

Далее используются преобразования Хафа для поиска окружности с максимальным количеством попадающих на нее пикселей границы. При поиске задавались возможные размеры зрачка от 8 до 12 пикселей.

Тестирование алгоритма определения центров зрачков

Для фиксированных значений размеров зрачков 10 ± 2 пикселей собраны 187 тестовых изображений лица с различными направлениями взгляда (табл. 1). Базы изображений собраны в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для проведения сравнения алгоритмов выполнена расстановка точек вручную в графическом редакторе Paint.

Таблица 1 – Выборка для тестирования алгоритма

№	Количество изображений	Количество респондентов	Цвет глаз	Пол	Возраст
1	30	3	карий	мужской, женский	18-25 лет
2	157	15	карий, голубой	мужской, женский	18-25 лет

Для каждого алгоритма определения центра зрачка рассчитывалось Евклидово расстояние по формуле [22]:

$$r = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (8)$$

где (x_a, y_a) – координаты центра зрачка, определенные вручную и принимаемые за координаты истинного положения центра зрачка,

(x_b, y_b) – координаты центра зрачка, определенные расчетным путем по соответствующему алгоритму.

Результаты тестирования алгоритмов определения центра зрачка с точностью 5 пикселей представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования алгоритмов определения центра зрачка

Алгоритм	Частота правильного определения центра зрачка, %							
	Бинаризация, нахождение центра масс		Фильтр Собеля, алгоритм Хафа		Бинаризация, корреляция с кругом приблизительного радиуса зрачка		Фильтр Кэнни, алгоритм Хафа	
Номер выборки	Правый глаз	Левый глаз	Правый глаз	Левый глаз	Правый глаз	Левый глаз	Правый глаз	Левый глаз
1	99,0	90,0	46,7	60,0	3,3	53,3	60,0	30,0
2	96,8	98,7	65,0	68,2	12,7	42,7	63,7	50,3

Заключение

Разработан алгоритм определения положения центра зрачка с использованием адаптивной бинаризации изображения с последующим определением центра масс области, соответствующей положению зрачка. Среднее значение частоты правильного определения центра зрачка разработанного алгоритма составляет 96,1%. Согласно таблице 2 разработанный алгоритм является оптимальным по критерию максимального среднего значения частоты правильного определения положения центра зрачка с точностью 5 пикселей.

Список литературы

1 Распоряжение Правительства РФ от 30 декабря 2005 г. № 2347-р (ред. от 12.11.2010) «О федеральном перечне реабилитационных мероприятий, технических средств реабилитации и услуг, предоставляемых инвалиду»

2 Kenneth Holmqvist, Marcus Nyström, Richard Andersson, Richard Dewhurst and al. A comprehensive guide to methods and measures, Oxford University Press, 2011, с. 560.

3 Glenstrup et. al., Eye Controlled Media: Present and Future State, University of Copenhagen DIKU (Institute of Computer Science) Universitetsparken 1 DK-2100 Denmark, 1995.

4 Применение локальных бинарных шаблонов к решению задачи распознавания лиц / Петрук В. И., Самородов А. В., Спиридонов И. Н. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. - 2011. - Спец.вып. Биометрические технологии. - С. 58-63.

5 Алгоритм распознавания эмоционального состояния по изображениям лица с использованием дискриминантного анализа и фильтров Габора / Кашапова Л. Х., Латышева Е. Ю., Спиридонов И. Н. // Медицинская техника. - 2012. - № 3. - С. 1-4.

6 Heiko Drewes: Eye gaze tracking for human computer interaction. Ludwig Maximilians University Munich 2010, pp. 1-164.

7 Product Description, Tobii 50 Series. Copyright © Tobii Technology AB, 2004

8 Margrit Betke, James Gips, Peter Fleming. The camera mouse: Visual tracking of body features to provide computer access for people with severe disabilities. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng., 10(1):1–10, 2002.

9 S.L. Kalman, T. Keller-Markus, A. Lorincz, and the NIP Group. Use of Headmouse for Persons with Special Communication Needs: Preliminary Results. Alternative and Augmented Communication, Conference, Zolyom, Sk, 2003.

10 Enable Viacam, <http://eviacam.sourceforge.net/>

11 L. Zhang Estimation of eye and mouth corner point position in a knowledge-based coding system Digital Compression Technologies and Systems for Video Communications, Berlin, Germany, October 1996, SPIE Vol. 2952, pp. 21-28, 1996

12 J. Huang and H. Wechsler, “Eye Detection Using Optimal Wavelet Packets and Radial Basis Functions (RBFs)”, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol 13 No 7, 1999

13 M. Asadifard and J. Shanbezadeh, "Automatic Adaptive Center of Pupil Detection Using Face Detection and CDF Analysis," Proc. Int'l MultiConf. of Engineers and Computer Scientists, 2010.

14 Somaya Adwan, Arof H. Modified Integral Projection Method for Eye Detection using Dynamic Time Warping. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 8(1), 2012.

15 Z.Zhou and X.Geng, Projection functions for eye detection, Journal of Pattern Recognition, vol. 37, no.5, pp.1049-1056, 2004.

16 Takegami. T, Gotoh. T, Kagei. S, Minamikawa-Tachino. R:"A Hough Based Eye Direction Detection Algorithm without On-site Calibration", Proceedings of the 7th Digital Image Computing: Techniques and Applications, 459-468, 2003.

17 Scott, D. & Findlay, J. M. (before 1993). Visual search, eye movements and display units, Human factors report, University of Durham, South Road, Durham DH1 3LE, UK.

18 Hallett, P. E. (1986). Eye movements, in K. Boff, L. Kaufman & J. Thomas, eds, `Handbook of Perception and Human Performance I', pp. 10.25-10.28.

19 Z. Zhu and Q. Ji, "Robust Real-Time Eye Detection and Tracking under Variable Lighting Conditions and Various Face Orientations," Computer Vision and Image Understanding, vol. 98, no. 1, special issue on eye detection and tracking, pp. 124-154, 2005.

20 Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. – 480 с., ил.

21 Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. - 1072 с

22 StatSoft, Inc. (2012). Электронный учебник по статистике. Москва, StatSoft. WEB: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.

Реферат

Реабилитация людей с ограниченными физическими возможностями является одним из приоритетных направлений медицины в настоящее время, как в нашей стране, так и за рубежом. Для расширения функциональных возможностей человека разрабатываются специальные технические средства для ухода, ориентирования, обучения, протезные изделия, тренажерное и спортивное оборудование. При нарушениях двигательной иннервации конечностей и шеи одним из способов управления остаются движения глаз и мимика лица. С появлением технологии распознавания элементов двигательной активности человека, в частности жестов, мимики, движения зрачков, стала возможна разработка альтернативных способов взаимодействия человека с компьютером. Для этих целей используются различные технические средства и программные продукты: трекеры глаз, программное обеспечение (ПО), осуществляющее движение курсора по движению головы. Трекеры глаз требуют дорогостоящего оборудования или крепления на специальных очках. Существующее ПО, использующее изображение с видеорегистратора, отражает только движения головы и имеет низкую точность позиционирования курсора.

Одним из направлений автоматизации управления функциями человека является создание биотехнической системы (БТС), обеспечивающей возможность бесконтактного управления курсором по направлению взгляда. Использование вебкамеры в качестве видеорегистратора позволяет сделать систему менее дорогостоящей. Поэтому целью данной работы является разработка алгоритма автоматического определения положения центра зрачка для осуществления автоматического позиционирования курсора на экране монитора.

Существуют различные подходы к определению центра зрачка на видеоизображении. Однако они имеют ряд недостатков, связанных с использованием дорогостоящего оборудования, контактностью технических

средств, большими временными затратами на вычисление признаков и обучение алгоритмов.

В рамках данной работы разработан алгоритм автоматического определения положения центра зрачка с использованием адаптивной бинаризации изображения с последующим определением центра масс области, соответствующей положению зрачка. Среднее значение частоты правильного определения центра зрачка разработанного алгоритма составляет 96,1 %. Разработанный алгоритм является оптимальным по критерию максимального среднего значения частоты правильного определения положения центра зрачка с точностью 5 пикселей.

Abstract

Rehabilitation of people with disabilities is one of the trend of medicine at the moment. Special equipment for the care, orientation, training, orthopedic products, training and sports equipment develops to extend the functionality of the human possibilities. Pupil movement and facial expression can be used for screen point acquisition. With the advent of technology feature recognition of human motor activity, such as gestures, facial expressions, the movement of the pupils, the development of alternative methods of human-computer interaction became possible. For these purposes, there are a variety of hardware and software products: eye trackers, software (SW) for moving the cursor by the head. Eye trackers require expensive equipment or put on special glasses. Existing software, using an image from the DVR, reflects only the movement of the head and has a low accuracy of positioning the cursor.

Proposed solution of automation of management human's functions is to create a biotechnical system, which provides non-contact control the cursor by the direction of gaze. Webcam as a DVR permits to make the system less expensive. The aim of this work is to develop an algorithm for automatic pupil detection for automatic cursor targeting on the screen.

There are various approaches for pupil detection in the video image. However, they have disadvantages like expensive equipments, contact technical means, time consuming to compute features and learning algorithms.

In this work, the algorithm automatically determine the position of the pupil center using an adaptive binarization image with subsequent determination of the center of mass of the area corresponding to the position of the pupil. Average frequency of correct determination of the pupil center is 96.1%. The developed algorithm is optimal by the criterion of correct determination of the pupil center position with an accuracy of 5 pixels.

Авторы

Спирidonov Игорь Николаевич, Spiridonov Igor Nikolaevic, д. т. н., Dr.Sci.Tech., профессор, professor, Заведующий кафедрой "Биомедицинские технические системы" МГТУ им. Н.Э. Баумана, head of Biomedical Engineering department, руководитель Научно-исследовательский и испытательный центр биометрической техники (НИИЦ БТ МГТУ им. Н.Э. Баумана), head of Bauman Biometric Centre (НИС БТ), (499) 263-6791, 105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/2. (Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5/2).

Латышева Екатерина Юрьевна, Latysheva Ekaterina Yurievna, аспирант кафедры "Биомедицинские технические системы" МГТУ им. Н.Э.Баумана, post-graduate of Biomedical Engineering Bauman Moscow State Technical University, инженер НИИЦ БТ, engineer in НИС БТ, (499) 263-6876, 105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/2, (Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5/2), kat9.lt@gmail.com.

Пилипенко Мария Николаевна, Pilipenko Maria Nikolaevna, инженер НИИЦ БТ, engineer in НИС БТ, (499) 263-6876, 105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/2, (Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5/2), mash_id@hotmail.com.

