

# Исследование движения структуры радужной оболочки глаза методом оптического потока\*

*В. В. Чигринский<sup>1</sup>, И. А. Матвеев<sup>1,2</sup>*

chigrinskiy.viktor@phystech.edu; matveev@ccas.ru

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Россия, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

<sup>2</sup>ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44/2

Исследуется нелинейное движение элементов радужной оболочки глаза при изменении размеров зрачка. Для слежения за перемещением элементов радужки используются методы оптического потока. Цель работы — оценка вида радиально-симметричной функции, описывающей положение элементов радужной оболочки в зависимости от радиуса зрачка. Для оценки применимости метода оптического потока предлагается генерация синтетических данных в соответствии с заранее выбранной моделью деформации радужки, реализация метода на построенных данных и сравнение полученных результатов с ожидаемыми. Для тестирования алгоритма используется видео реакции человеческого глаза на вспышку света, полученное с помощью специального прибора.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение; обработка изображений; биометрия; радужная оболочка глаза; оптический поток

DOI: 10.21469/22233792.3.4.04

## 1 Введение

Распознавание по радужке — один из основных современных методов автоматической биометрической аутентификации. На изображении глаза или последовательности таких изображений (видео) выделяется область радужки, обладающая уникальным устойчивым рисунком. Перед работой алгоритмов сравнения происходит нормировка этой области — приведение ее к стандартным размерам, что делается линейным относительно ее радиуса преобразованием. Здесь возникает проблема, состоящая в том, что деформация ткани радужки не является линейной [1]. Это значит, что при различных собственных размерах зрачка (что может быть вызвано, например, разным освещением) для одного глаза получаются разные нормированные изображения структуры радужки.

Вопрос об изменениях изображения радужки, вызванных, в частности, собственным движением зрачка, и о необходимости учета этих явлений при распознавании был сформулирован уже в самых первых исследованиях [2, 3]. В большинстве систем распознавания по радужной оболочке предполагается, что при уменьшении или увеличении зрачка растяжение структуры радужки линейно [4, 5]. Для описания нелинейности растяжения структуры радужки ранее предлагались различные подходы. Например, в работах [6–9] построены теоретические модели деформации, основанные на физиологии глаза, а в работе [10] предполагается, что эта деформация — линейная с нелинейной добавкой в форме гауссиана. Математическая модель деформации в [11] строится путем совмещения изображений одного и того же глаза с разным размером зрачка и минимизацией их различия.

В настоящей работе предлагается применить метод оптических потоков для слежения за движением элементов рисунка радужной оболочки при изменении размеров зрачка.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-07-01171.

Материалом для исследования служат видеопоследовательности изображений глаза, на которых зарегистрирована его реакция на вспышку света. Для верификации предлагаемого подхода проведены тесты на искусственно сгенерированных данных. На таких данных моделируется ошибка метода путем сравнения полученных результатов с моделью используемой деформации.

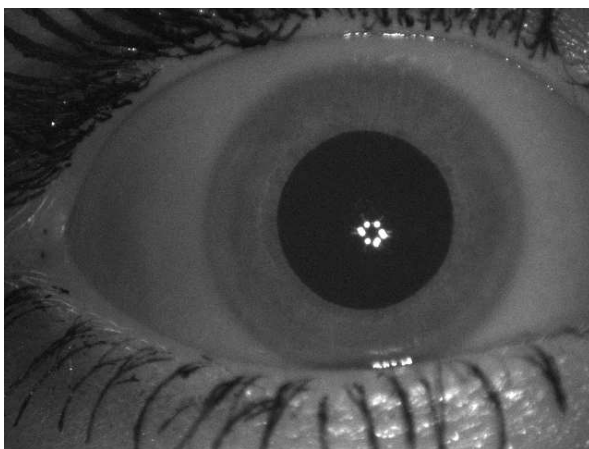
## 2 Постановка задачи

Входные данные задачи — видеопоследовательность  $V = \{I_k\}_{k=1}^n$  изображений глаза, каждое размером  $W \times H$ , полученная с помощью специального прибора, *пупиллометра*. Пупиллометр предназначен для регистрации реакции зрачка на вспышку света. Изображения глаз записываются с частотой 60 кадров в секунду в течение нескольких секунд после вспышки. Примеры кадров из такого видео приведены на рис. 1.

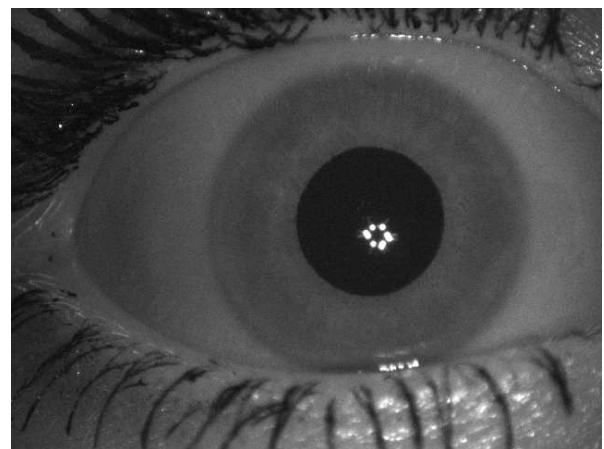
В предположении радиальной симметрии деформации радужки требуется построить отображение  $f : (\rho_p, \rho) \rightarrow (\rho_p^* = 1/2, \rho^*)$ , которое кольцевую область радужки, параметризованную с помощью  $\rho$ , при отношении радиуса зрачка к радиусу радужки  $\rho_p$  отображает в соответствующую ей область при отношении радиуса зрачка к радиусу радужки  $1/2$ . Здесь  $\rho_p \in (0, 1)$  — отношение радиуса зрачка к радиусу радужной оболочки на рассматриваемом изображении глаза;  $\rho \in (0, 1)$  — параметризация положения кольцевой области радужки на исходном изображении, при этом  $\rho \rightarrow 0$  соответствует приближению к границе зрачка,  $\rho \rightarrow 1$  — к границе радужки;  $\rho^* \in (0, 1)$  — параметризация положения кольцевой области радужки на изображении того же глаза при  $\rho_p^* = 1/2$ .

Для оценки качества используемого метода предлагается сгенерировать искусственные данные с заранее выбранной функцией  $f_{et}$ , получить на этих данных отображение  $f$  и смоделировать ошибку метода как среднюю по всем  $\rho_p$   $L_2$ -норму между полученным результатом и ожидаемым:

$$e = \int_0^1 \left( \int_0^1 (f(\rho_p, \rho) - f_{et}(\rho_p, \rho))^2 d\rho \right)^{1/2} d\rho_p. \quad (1)$$



$r_P = 0,54 r_I$



$r_P = 0,46 r_I$

**Рис. 1** Пример кадров из входной видеопоследовательности

### 3 Метод решения

Решение поставленной задачи предлагается осуществить в несколько шагов.

На первом шаге выделяется область интереса, т. е. находятся внешняя и внутренняя границы радужки на фотографии глаза. Различные способы реализации этого шага описаны, например, в [12–14].

На втором шаге осуществляется нормализация, т. е. отображение области интереса в прямоугольник фиксированного размера для упрощения последующих вычислений.

На третьем шаге изображение подвергается процедуре эквализации гистограммы [15] для повышения его контрастности. Этот шаг необходим, поскольку полученные изображения имеют достаточно узкий диапазон значений яркостей, на вид они кажутся практически монотонно-серыми. Из-за этого при поиске оптического потока алгоритму тяжело будет отслеживать движения элементов структуры радужки из-за их сильной схожести друг с другом.

Исходные изображения сильно зашумлены, операция по повышению контрастности усугубляет это. При поиске оптического потока алгоритм может локально давать неверные результаты из-за высокого шума. Чтобы его уменьшить, на четвертом шаге усредняются группы по 10 кадров. Такой выбор обоснован тем, что видео имеет высокую частоту кадров и при подобной операции потеря информации оправдана повышением качества. Таким образом, 250-кадровое видео преобразуется в 25-кадровую последовательность усредненных изображений.



**Рис. 2** Общая блок-схема алгоритма

После всей проделанной предобработки предлагается осуществлять поиск деформаций методом оптического потока. В работе используется модифицированный дополнительным регуляризатором метод Хорна–Шунка.

Наконец, после вычисления потока, по траекториям элементов структуры радужки восстанавливаются функции, описывающие положение этих структурных элементов в зависимости от диаметра зрачка.

Общая схема метода представлена на рис. 2.

Опишем теперь более подробно некоторые шаги, требующие внимания.

### 3.1 Нормализация и предобработка

В исследованиях [2, 3] была предложена *нормализация*, заключающаяся в переходе к полярным координатам:

$$\left. \begin{aligned} \rho(x, y) &= \frac{\sqrt{(x - x_P)^2 + (y - y_P)^2}}{r_I - r_P} & \rho \in [0; 1]; \\ \theta(x, y) &= \arctan \frac{y - y_P}{x - x_P}, & \theta \in [0; 2\pi), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $x_P$ ,  $y_P$ ,  $r_P$  и  $r_I$  — координаты центра зрачка, радиус зрачка и радиус радужки соответственно. Полярное представление является растром, яркость в каждой точке  $(\rho, \varphi)$  которого вычисляется по яркости прообраза на изображении, поэтому фактически используется обратное к (2) преобразование, более простое:

$$\left. \begin{aligned} x(\rho, \theta) &= x_P + (r_P + \rho(r_I - r_P)) \cos \theta; \\ y(\rho, \theta) &= y_P + (r_P + \rho(r_I - r_P)) \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Достаточно быстро выяснился недостаток этой модели, поскольку в ней предполагается, что контуры зрачка и радужки концентричны, в то время как расстояние между их центрами может составлять до 10% размеров радужки [1]. Модель (3) была уточнена и сейчас повсеместно принята так называемая *rubber-sheet model* [3], обратное преобразование которой записывается как

$$\left. \begin{aligned} x(\rho, \theta) &= (1 - \rho)x_1(\theta) + \rho x_2(\theta), & x_1(\theta) &= x_P + r_P \cos \theta & x_2(\theta) &= x_I + r_I \cos \theta; \\ y(\rho, \theta) &= (1 - \rho)y_1(\theta) + \rho y_2(\theta), & y_1(\theta) &= y_P + r_P \sin \theta & y_2(\theta) &= y_I + r_I \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Модель (4) является основной используемой в настоящее время в системах распознавания радужки [5]. Графически она изображена на рис. 3

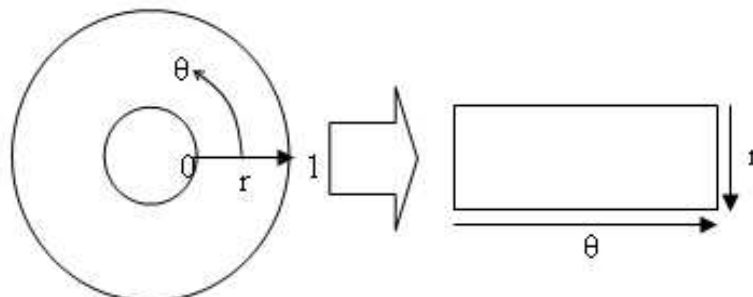
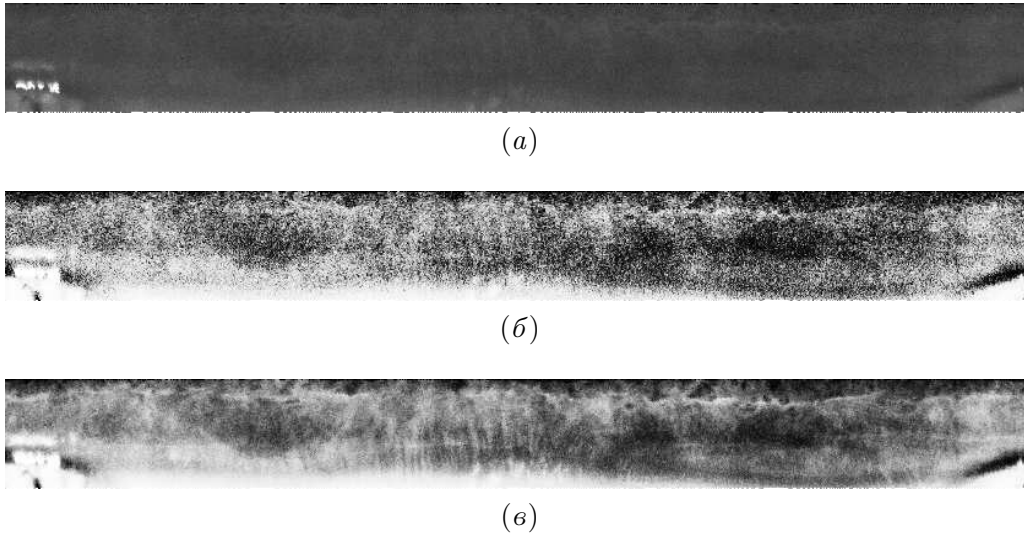


Рис. 3 Rubber-sheet model



**Рис. 4** Эквиализация гистограммы и усреднение

Нетрудно видеть, что преобразование (4) линейно относительно  $\rho$ , в то время как деформации радужки нелинейны. Таким образом, при разных исходных собственных радиусах зрачка (в терминах модели — разных отношениях  $r_P/r_I$ ) будут получены различные нормированные изображения. Их отличия будут заключаться в смещении текстурных элементов по координате  $\rho$  в центральной части, т. е. при  $\rho \approx 0,5$ . В предположении о радиальной симметрии деформации смещение всех элементов нормированных изображений одинаково для всех углов  $\varphi$ , т. е. смещение зависит только от  $\rho$ , а по  $\varphi$  можно произвести усреднение.

После эквиализации гистограммы и усреднения получается контрастное незашумленное нормированное изображение структуры радужки. Пример приведен на рис. 4. На рис. 4, *a* показана исходная нормированная радужка, на рис. 4, *б* — эквиализованная, а на рис. 4, *в* — результат усреднения.

### 3.2 Вычисление оптических потоков

Центральная идея подхода к решению поставленной задачи — вычисление оптических потоков, т. е. векторных полей скоростей элементов изображения, на кадрах видеопоследовательности.

В качестве базового метода рассматривается метод Хорна–Шунка [16]. Целесообразность такого выбора оправдана тем, что его основным предположением является гладкость потока вдоль всего изображения. Однако классический метод Хорна–Шунка использует предположение лишь о гладкости, хотя специфика задачи может заключать в себе и другие естественные ограничения на искомый поток. Например, в рассматриваемой задаче естественно полагать, что деформация структуры радужки радиальна, т. е. тангенциальная компонента потока должна быть равна нулю. Тогда, если  $I$  — это изображение глаза в полярных координатах, к подынтегральному выражению минимизируемого функционала в классической постановке задачи добавляется еще один регуляризатор, соответствующий малости тангенциальной компоненты потока. В итоге, функционал энергии принимает следующий вид:

$$E = \iint ((I_x u + I_y v + I_t)^2 + \alpha^2 (\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2) + \beta^2 \|v\|^2) dx dy,$$

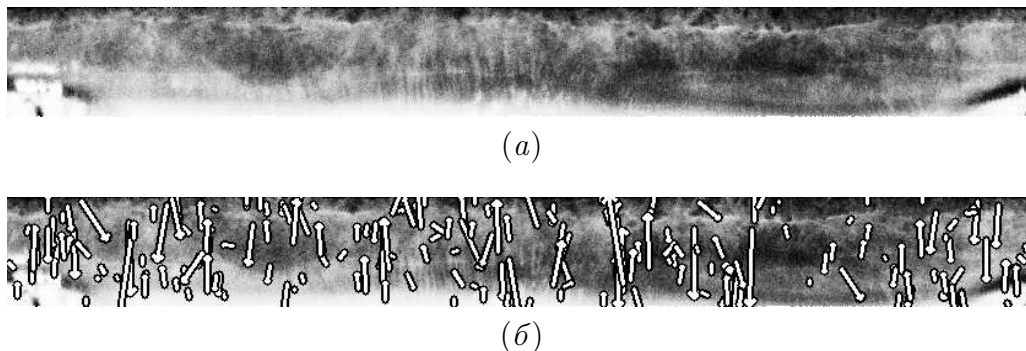


Рис. 5 Оптический поток

где  $I_x$  — градиент изображения вдоль оси  $x$ ;  $I_y$  — градиент вдоль оси  $y$ ;  $I_t$  — градиент вдоль дискретной оси времени, т. е.  $I(x, y, t + 1) - I(x, y, t)$ ;  $u$  и  $v$  — компоненты вектора скорости вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Минимизация такого функционала с помощью системы уравнений Эйлера–Лагранжа сводится к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} (I_x^2 + \alpha^2) u + I_x I_y v &= \alpha^2 \bar{u} - I_x I_t; \\ I_x I_y u + (I_y^2 + \alpha^2 + \beta^2) v &= \alpha^2 \bar{v} - I_y I_t, \end{aligned}$$

где  $\bar{u}(x, y) = \Delta u(x, y) + u(x, y)$  и численно может быть оценено взвешенным средним значением  $u$  в окрестности точки  $(x, y)$  с весами  $\begin{pmatrix} 1/8 & 1/8 & 1/8 \\ 1/8 & 0 & 1/8 \\ 1/8 & 1/8 & 1/8 \end{pmatrix}$ ;  $\bar{v}(x, y)$  определяется аналогично.

Численное решение построенной системы уравнений дается алгоритмом Якоби.

На рис. 5 показан пример вычисления оптического потока на нормализованном (рис. 5, а) и предобработанном (рис. 5, б) изображениях структуры радужки. Стрелки на рис. 5, б показывают текущую скорость каждого элемента. Для наглядности на рисунке они масштабированы, хотя по факту смещения между соседними кадрами составляют не более одного пикселя. Может показаться, что алгоритм отработал неверно в силу хаотичности направления скоростей, но на самом деле это не так. Скорости всех элементов действительно носят случайный характер с небольшой дисперсией, но их средние вдоль тангенциального направления образуют гладкую функцию от радиальной компоненты, адекватно описывающую деформацию структуры (рис. 6).

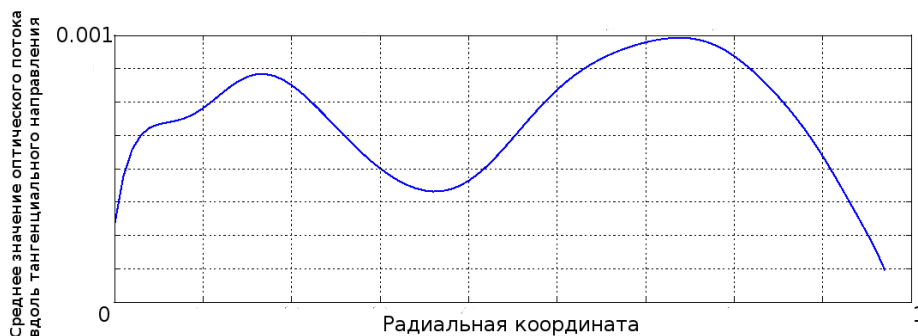


Рис. 6 Среднее значение оптического потока вдоль тангенциального направления в зависимости от радиальной координаты

## 4 Вычислительный эксперимент

### 4.1 Генерация искусственных данных

Для проверки точности работы алгоритма на основе первого кадра и выбранной модели деформации создается искусственное видео. Все описанные шаги выполняются на нем, в результате чего получается функция, описывающая реализованную деформацию. Точность оценивается  $L_2$ -отклонением полученной функции от ожидаемой, в соответствии с формулой (1). Модель выбираем из четырех типов: сжатие к границе радужки, сжатие к границе зрачка, сжатие к обеим границам, сжатие к центру.

### 4.2 Оценка точности работы алгоритма

Для тестирования метода, в соответствии с результатами, полученными на реальных данных, была выбрана четвертая из рассматриваемых моделей — сжатие к центру при расширении зрачка. На рис. 7 приведены графики полученной и ожидаемой модели деформации.

Считая ошибку в соответствии с формулой (1), получаем  $e \approx 0,16$ .

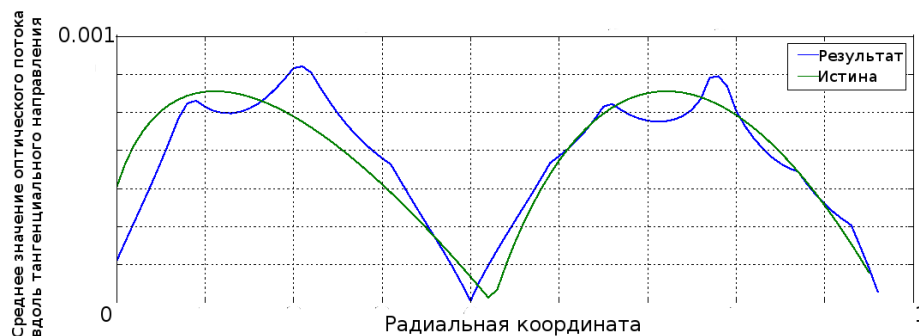


Рис. 7 Полученная и ожидаемая модели деформации искусственно созданных данных

## 5 Заключение

В работе решалась задача исследования возможности применения оптических потоков для определения нелинейного поведения радужной оболочки при ее деформациях. Разработана схема эксперимента, позволяющего установить зависимость смещения ткани радужки от расстояния до центра зрачка и его размеров. В соответствии со спецификой задачи приняты во внимание гладкость и радиальная симметричность деформации. За основу метода был взят алгоритм вычисления оптического потока Хорна–Шунка. Дополнительно разработана модификация этого алгоритма путем введения регуляризационного члена.

Для верификации (оценки применимости) метода сгенерированы синтетические данные в соответствии с заранее выбранной моделью деформации радужки. Метод испытан на построенных данных. Полученные результаты близки к модели, использованной для генерации. Результат работы может быть применен для дальнейших исследований и уточнения модели деформации радужки, что позволит улучшить совмещение при сравнении и увеличить точность распознавания.

## Литература

- [1] *Шахнович А. Р., Шахнович В. Р.* Пупиллография. — М.: Медицина, 1964. 250 с.
- [2] *Wildes R. P.* Iris recognition: An emerging biometric technology // Proc. IEEE, 1997. Vol. 85. No. 9. P. 1348–1363. doi: 10.1109/5.628669.
- [3] *Daugman J.* How iris recognition works // Conference (International) on Image Processing Proceedings. — Rochester, NY, USA, 2002. Vol. 1. P. I-33–I-36. <http://www.cl.cam.ac.uk/~jgd1000/irisrecog.pdf>.
- [4] *Bowyer K. W., Hollingsworth K., Flynn P. J.* Image understanding for iris biometrics: A survey // Comput. Vis. Image Und., 2008. Vol. 110. No. 2. P. 281–307. doi: 10.1016/j.cviu.2007.08.005.
- [5] *Bowyer K. W., Hollingsworth K. P., Flynn P. J.* A survey of iris biometrics research: 2008–2010 // Handbook of iris recognition / Eds. M. J. Burge, K. W. Bowyer. — London: Springer, 2013. P. 15–54.
- [6] *Wyatt H. J.* A ‘minimum-wear-and-tear’ meshwork for the iris // Vision Res., 2000. Vol. 40. No. 16. P. 2167–2176. doi: 10.1016/S0042-6989(00)00068-7. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698900000687>.
- [7] *Clark A. D., Kulp S. A., Herron I. H., Ross A. A.* Exploring the nonlinear dynamics of iris deformation // Biometric Consortium Conference Proceedings, 2011. 21 p.
- [8] *Thainimit S., Alexandre L. A., de Almeida V. M. N.* Iris surface deformation and normalization // 13th Symposium (International) on Communications and Information Technologies Proceedings, 2013. P. 501–506. <http://www.di.ubi.pt/~lfbaa/pubs/iscit2013.pdf>.
- [9] *Матвеев И. А.* Методы и алгоритмы автоматической обработки изображений радужной оболочки глаза: Дис. ... д-ра техн. наук. — М.: ВЦ РАН, 2014.
- [10] *Wei Z., Tan T., Sun Z.* Nonlinear iris deformation correction based on Gaussian model // Advances in biometrics / Eds. S.-W. Lee, S. Z. Li. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin–Heidelberg: Springer, 2007. Vol. 4642. P. 780–789.
- [11] *Thornton J., Savvides M., Kumar B. V. K. V.* A bayesian approach to deformed pattern matching of iris images // IEEE T. Pattern Anal., 2007. Vol. 29. No.4. P. 596–606. doi: 10.1109/TPAMI.2007.1006.
- [12] *Ганькин К. А., Гнеушев А. Н., Матвеев И. А.* Сегментация изображения радужки глаза, основанная на приближенных методах с последующими уточнениями // Изв. РАН ТИСУ, 2014. № 2. С. 80–94.
- [13] *Ефимов Ю. С., Матвеев И. А.* Поиск внешней и внутренней границ радужной оболочки на изображении глаза методом парных градиентов // Машинное обучение и анализ данных, 2015. Т. 1. № 14. С. 1991–2002.
- [14] *Чигринский В. В., Ефимов Ю. С., Матвеев И. А.* Быстрый алгоритм поиска границ зрачка и радужной оболочки глаза // Машинное обучение и анализ данных, 2016. Т. 2. № 2. С. 159–172.
- [15] *Shapiro L. G., Stockman G. C.* Computer vision. — Prentice Hall, 2001. 608 p.
- [16] *Horn B.K.P., Schunck B.G.* Determining optical flow // Artif. Intell., 1981. Vol. 17. P. 185–203.

Поступила в редакцию 20.09.2017



# Iris structure motion analysis via optical flow method\*

V. V. Chigrinskiy<sup>1</sup> and I. A. Matveev<sup>1,2</sup>

chigrinskiy.viktor@phystech.edu; matveev@ccas.ru

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center “Computer Science and Control” of RAS, 44/2 Vavilova Str., Moscow, Russia

Nonlinear movements of elements of human iris during pupil size variations is studied. Tracking of iris elements is done with the help of optical flow methods. The aim is to estimate a radially symmetric function which describes positions of iris structural elements with respect to pupil size. The quality of the method is assessed by applying it to the synthetic data, which is built from preselected deformation model and after that, obtained function is matched against the model. To test the algorithm on real data, video of human’s eye reaction on flashlight is used, which was recorded by a special device.

**Keywords:** *computer vision; image processing; biometrics; iris; optical flow*

**DOI:** 10.21469/22233792.3.4.04

## References

- [1] Shahnovich, A. R., and V. R. Shahnovich. 1964. *Pupillografiya* [Pupillography]. Moscow: Medicine. 250 p.
- [2] Wildes, R. 1997. Iris recognition: An emerging biometric technology. *Proc. IEEE* 85(9):1348–1363. doi: 10.1109/5.628669. Available at: [http://eturksoft.com/Download/bestitdocuments/IRIS\\_Recognition.pdf](http://eturksoft.com/Download/bestitdocuments/IRIS_Recognition.pdf) (accessed December 29, 2017).
- [3] Daugman, J. 2002. How iris recognition works. *Conference (International) on Image Processing Proceedings*. Rochester, NY. 1:I-33-I-36. Available at: <http://www.cl.cam.ac.uk/~jgd1000/irisrecog.pdf> (accessed December 29, 2017).
- [4] Bowyer, K. W., K. Hollingsworth, and P. J. Flynn. 2008. Image understanding for iris biometrics: A survey. *Comput. Vis. Image Und.* 110(2):281–307. doi: 10.1016/j.cviu.2007.08.005.
- [5] Bowyer, K. W., K. P. Hollingsworth, and P. J. Flynn. 2013. A survey of iris biometrics research: 2008–2010. *Handbook of iris recognition*. Eds. M. J. Burge, and K. W. Bowyer. London: Springer. 15–54.
- [6] Wyatt, H. J. 2000. A ‘minimum-wear-and-tear’ meshwork for the iris. *Vision Res.* 40(16):2167–2176. doi: 10.1016/S0042-6989(00)00068-7. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698900000687> (accessed December 29, 2017).
- [7] Clark, A. D., S. A. Kulp, I. H. Herron, and A. A. Ross. 2011. Exploring the nonlinear dynamics of iris deformation. *Biometric Consortium Conference Proceedings*. 21 p.
- [8] Thainimit, S., L. Alexandre, and V. de Almeida. 2013. Iris surface deformation and normalization. *13th Symposium (International) on Communications and Information Technologies Proceedings*. 501-506. Available at: <http://www.di.ubi.pt/~lfbaa/pubs/iscit2013.pdf> (accessed December 29, 2017).
- [9] Matveev, I. A. 2014. *Metody i algoritmy avtomaticheskoy obrabotki izobrazheniy raduzhnoy obolochki glaza* [Methods and algorithms for automatic image processing of the iris]. Moscow: FRC CSC RAS. D.Sc. Diss.

---

\*The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 16-07-01171).

- [10] Wei, Z., T. Tan, and Z. Sun. 2007. Nonlinear iris deformation correction based on Gaussian model. *Advances in biometrics*. Eds. S.-W. Lee and S.Z. Li. Lecture notes in computer science ser. Berlin–Heidelberg: Springer. 4642:780–789.
- [11] Thornton, J., M. Savvides, and B. Kumar. 2007. A bayesian approach to deformed pattern matching of iris images. *IEEE T. Pattern Anal.* 29(4):596–606. doi: 10.1109/TPAMI.2007.1006.
- [12] Gankin, K. A., A. N. Gneushev, and I. A. Matveev. 2014. Iris image segmentation based on approximate methods with subsequent refinements. *J. Comput. Sys. Sci. Int.* 53(2):224–238.
- [13] Efimov, Y. S., and I. A. Matveev. 2015. Poisk vneshney i vnutrenney granits raduzhnoy obolochki na izobrazhenii glaza metodom parnykh gradientov [Iris border detection using a method of paired gradients]. *J. Machine Learning Data Anal.* 1(14):1991–2002.
- [14] Chigrinskiy, V. V., Y. S. Efimov, and I. A. Matveev. 2016. Bystryy algoritm poiska granits zrachka i raduzhnoy obolochki glaza [Fast algorithm for determining pupil and iris boundaries]. *J. Machine Learning Data Anal.* 2(2):159–172.
- [15] Shapiro, L. G., and G. . Stockman. 2001. *Computer vision*. Prentice Hall. 608 p.
- [16] Horn, B., and B. Schunck. 1981. Determining optical flow. *Artif. Intell.* 17:185–203.

*Received September 20, 2017*