

УДК 004.932.2

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРА РОГОВИЦЫ ГЛАЗА В СИСТЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЗГЛЯДА

© Г. И. Громилин, В. П. Косых, Н. С. Яковенко

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: gromilin@iae.nsk.su*

В ряде систем бесконтактного слежения за направлением взгляда по видеоданным, формируемым видеокамерой, которая не привязана механически к голове клиента, взаимное положение камеры и глаз клиента определяется по бликам, которые создаются на роговице глаз точечными источниками ИК-излучения, жёстко связанными с камерой. В работе рассматривается новый алгоритм оценивания трёхмерных координат центра роговицы по изображениям бликов от пары точечных источников излучения. Показано, что при расстоянии между глазом и камерой, значительно превышающем радиус роговицы, задача сводится к решению одного нелинейного уравнения, что значительно сокращает вычислительные затраты. Приводятся результаты численного эксперимента, подтверждающего сохранение точности оценок.

Ключевые слова: определение направления взгляда, блики, координаты центра роговицы, трёхмерная модель глаза.

DOI: 10.15372/AUT20220412

Введение. Системы бесконтактного айтрекинга находят разнообразное применение в различных областях нашей деятельности. Назначение этих систем заключается в слежении за направлением взгляда клиента. Широкое распространение получила, например, линейка устройств Tobii Eye Tracker, выпускаемая шведской фирмой Tobii [1] и применяемая как в компьютерных играх, так и в качестве средства управления компьютером пользователями с ограниченными возможностями. Известны работы по привлечению систем бесконтактного айтрекинга к управлению различными подвижными механизмами [2] или, например, к мониторингу внимания водителя автомобиля [3, 4]. В маркетинге с их помощью при разработке эффективных методов продвижения товаров [5] исследуется порядок осмотра витрин покупателем. В психологии изменение характера движения глаз изучается как результат влияния на поведение человека различных стрессовых ситуаций [6].

Основными элементами системы бесконтактного айтрекинга являются видеокамера, формирующая последовательность изображений лица клиента, и программно-алгоритмическое обеспечение, назначение которого заключается в выделении в изображении зрачков и по тем или иным признакам в определении направления взгляда. Направление взгляда оценивается по положению центра зрачка относительно некоторых реперных меток, привязанных к системе координат камеры. Реперные метки в большинстве систем создаются искусственно точечными источниками инфракрасного (ИК) излучения, жёстко связанными с видеокамерой и создающими блики на поверхности роговицы глаза. Смещение положения центра зрачка относительно этих бликов несёт информацию об изменении направления взгляда. Наиболее распространённые методы определения направления взгляда по положению центра зрачка относительно бликов условно можно разделить на два класса. К первому из них относятся регрессионные методы, использующие эмпирически устанавливаемую в процессе калибровки зависимость между смещением зрачка относительно бликов и известным направлением взгляда [7]. Ко второму — методы, опирающиеся на трёхмерную модель глаза. В методах, основанных на трёхмерной модели

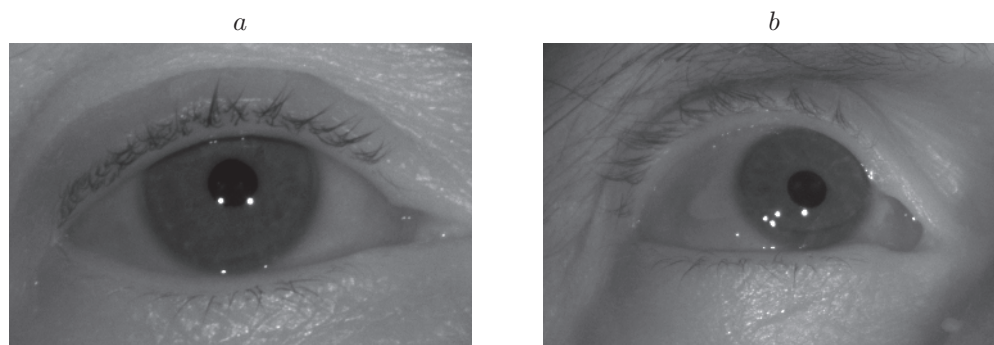


Рис. 1. Изображения бликов от двух источников при различных положениях глаза: *a* — два блика от двух источников ИК, *b* — паразитные блики

глаза [8], направление фиксации взгляда вычисляется по трёхмерным координатам центра роговицы глаза и центра зрачка, связанных соотношениями между ними, которые экспериментально установлены в модели глаза Гульстранда [9].

Данная работа посвящена алгоритму определения трёхмерных координат роговицы глаза по координатам изображений бликов, полученных при условии, что расстояние от видеокамеры значительно превышает радиус роговицы.

Алгоритм определения 3D-координат центра роговицы глаза. Как отмечается во многих публикациях [7, 8, 10–12], посвящённых бесконтактным системам определения направления взгляда, регрессионные методы, использующие только двумерную информацию о взаимном положении изображений центра зрачка и опорного блика, чрезвычайно чувствительны к изменению положения головы оператора по отношению к положению в момент калибровки. Более сложные в реализации методы второго класса для оценивания трёхмерных координат центра роговицы требуют применения как минимум двух пространственно разнесённых источников реперных бликов, но обеспечивают более стабильную оценку направления взгляда при перемещении головы в пределах нескольких сантиметров как по дальности, так и в плоскости, ортогональной оптической оси камеры [10–12].

Первым этапом реализации этих методов является вычисление 3D-координат центра роговицы по координатам изображений бликов от реперных источников излучения. Задача решается в предположении, что поверхность роговицы достаточно хорошо аппроксимируется сферой [9, 10]. На рис. 1, *a* представлено изображение глаза с двумя бликами от разнесённых ИК-источников. При неблагоприятном положении глаз возникают паразитные блики (рис. 1, *b*), а при большом количестве источников поиск «правильных» бликов усложняется, поэтому выбирается конфигурация с двумя источниками.

Оригинальный алгоритм вычисления координат центра роговицы по изображениям двух бликов, основанный на решении системы трансцендентных уравнений, был предложен в [10]. В представленной работе предлагается новый алгоритм решения этой задачи.

На рис. 2 приведена схема формирования в плоскости сенсора камеры изображений бликов от двух разнесённых источников, отражённых сферической поверхностью роговицы глаза. Здесь $OXYZ$ — система координат камеры, а P — плоскость её сенсора.

Начало системы координат камеры совмещено с оптическим центром объектива, а ось OZ — с его оптической осью. Точечные источники ИК-излучения, создающие опорные блики, находятся в точках S_1 и S_2 , центр сферы радиуса r , аппроксимирующей поверхность роговицы, — в точке C . Излучение от источников создаёт блики на роговице в точках B_1 и B_2 и формирует их изображения u_1 и u_2 в плоскости P . Единичные векторы

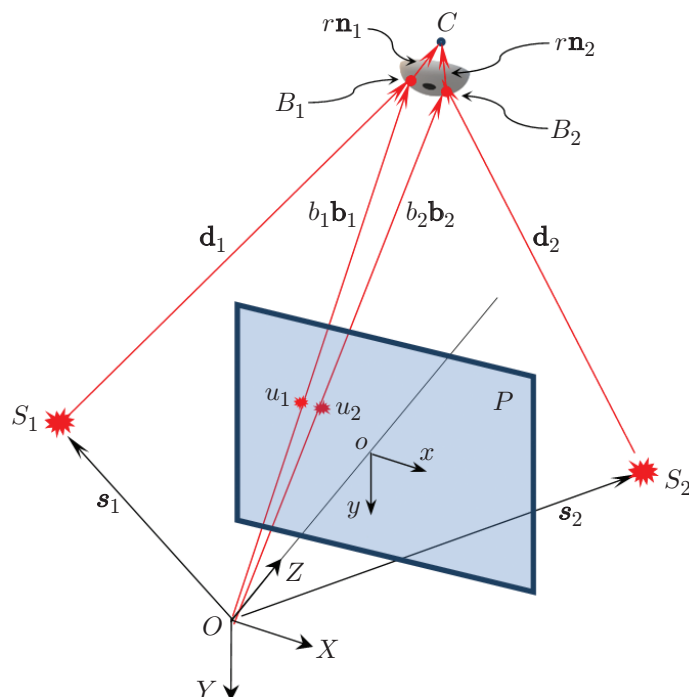


Рис. 2. Схема формирования изображений бликов от реперных источников излучения

нормалей к сферической поверхности роговицы в точках бликов обозначены \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 . В системе координат камеры положение источников задано конструкцией системы айтрекинга и определяется векторами \mathbf{s}_1 и \mathbf{s}_2 , а направление на блики задаётся единичными векторами \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 , которые определяются двумерными координатами изображений бликов u_1 и u_2 .

Как показано на рисунке, векторы \mathbf{s}_i , определяющие положение формирующего блик источника, направления лучей, падающих на роговицу \mathbf{d}_i и отражённых в объектив камеры \mathbf{b}_i , связаны соотношением

$$\mathbf{d}_i = b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где b_i — расстояние от оптического центра объектива камеры (точка O) до i -го блика на роговице. Из условия, что нормаль \mathbf{n}_i к отражающей поверхности в точке отражения луча B_i должна лежать в той же плоскости, что и векторы падения \mathbf{d}_i и отражения \mathbf{b}_i , следует соотношение между векторами \mathbf{n}_i , \mathbf{b}_i и \mathbf{s}_i :

$$\mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{b}_i + \mathbf{d}_i / |\mathbf{d}_i|}{|\mathbf{b}_i + \mathbf{d}_i / |\mathbf{d}_i||} = \frac{|\mathbf{d}_i| \mathbf{b}_i + \mathbf{d}_i}{\| |\mathbf{d}_i| \mathbf{b}_i + \mathbf{d}_i \|} = \frac{|b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i| \mathbf{b}_i + b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i}{\| |b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i| \mathbf{b}_i + b_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i \|}. \quad (2)$$

С другой стороны, нормаль к сферической поверхности роговицы направлена в центр сферы, поэтому трёхмерные координаты точки C можно выразить через параметры как первого, так и второго бликов:

$$\mathbf{c} = b_1 \mathbf{b}_1 + r \mathbf{n}_1 = b_2 \mathbf{b}_2 + r \mathbf{n}_2, \quad (3)$$

где r — радиус роговицы.

Из соотношения (3) вытекает однородное векторное уравнение

$$b_1 \mathbf{b}_1 - b_2 \mathbf{b}_2 + r(\mathbf{n}_1(b_1) - \mathbf{n}_2(b_2)) = 0, \quad (4)$$

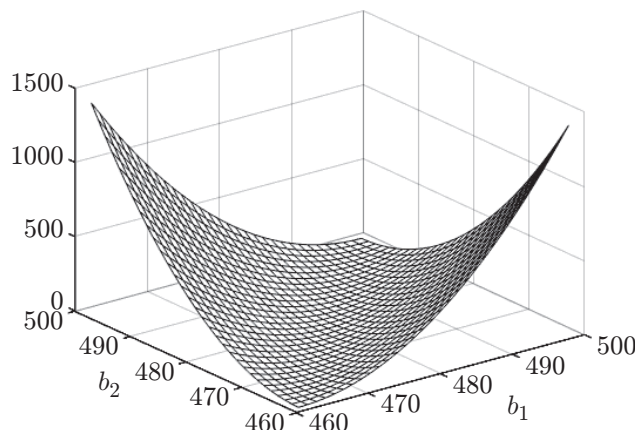


Рис. 3. Целевая функция при больших расстояниях до глаза

нелинейное относительно двух неизвестных b_1 и b_2 , поскольку, как следует из (2), нормали \mathbf{n}_i зависят от b_i . Векторы \mathbf{b}_i содержат ошибки измерений, из-за чего векторное равенство (4) выполняется неточно, поэтому для оценивания b_1 и b_2 применяется метод наименьших квадратов, оценки \tilde{b}_1 и \tilde{b}_2 находятся минимизацией целевой функции

$$J(b_1, b_2) = [b_1 \mathbf{b}_1 - b_2 \mathbf{b}_2 + r(\mathbf{n}_1(b_1) - \mathbf{n}_2(b_2))]^\top [b_1 \mathbf{b}_1 - b_2 \mathbf{b}_2 + r(\mathbf{n}_1(b_1) - \mathbf{n}_2(b_2))] \quad (5)$$

по скалярным переменным b_1 и b_2 .

Затем координаты центра роговицы вычисляются как

$$\mathbf{c} = \sum_{i=1,2} \left(\tilde{b}_i \mathbf{b}_i + \frac{r}{2} \frac{|\tilde{b}_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i| \mathbf{b}_i + \tilde{b}_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i}{\| \tilde{b}_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i | \mathbf{b}_i + \tilde{b}_i \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i \|} \right). \quad (6)$$

Для минимизации целевой функции (5) на языке C++ можно воспользоваться готовой функцией `find_min_using_approximate_derivatives` из открытой библиотеки Dlib [13], реализующей алгоритм Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно [14], или функцией `fminsearch` при реализации в среде MATLAB.

Следует отметить, что при расстоянии от камеры до глаза, значительно превышающем радиус роговицы, целевая функция (5) представляет собой сильно вытянутый в направлении $b_1 + b_2 = \text{const}$ канал, что ухудшает сходимость процедур минимизации. На рис. 3 показано поведение функции $J(b_1, b_2)$ при размещении в системе координат камеры центра сферы радиуса $r = 7,5$ в точке $C(-10, 0, 480)$.

В этом случае поиск решения может быть значительно упрощён, если пренебречь разницей между b_1 и b_2 и положить $b_1 = b_2 = b$. Тогда

$$\mathbf{n}_i = \frac{|b \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i| \mathbf{b}_i + b \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i}{\| |b \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i| \mathbf{b}_i + b \mathbf{b}_i - \mathbf{s}_i \|}. \quad (7)$$

Введём $\mathbf{f}(b) = b(\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2) + r(\mathbf{n}_1(b) - \mathbf{n}_2(b))$ и построим итерационную процедуру оценивания b , пользуясь линеаризацией $\mathbf{f}(b)$:

$$\mathbf{f}(b_{k+1} = b_k + \delta_k) = \mathbf{f}(b = b_k) + \frac{d\mathbf{f}}{db}(b = b_k) \delta_k.$$

Параметры оценок координат центра шарика

σ пикс	Целевая функция $J(b_1, b_2)$						Целевая функция $J(b)$					
	m_x	m_y	m_z	v_x	v_y	v_z	m_x	m_y	m_z	v_x	v_y	v_z
0,1	0,0	0,0	480,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	480,0	0,0	0,0	1,9
1,5	0,0	0,0	480,3	0,1	0,1	28,2	0,0	0,0	480,7	0,1	0,1	26,6
3,0	0,0	0,0	481,6	0,2	0,2	63,2	0,0	0,0	489,1	0,2	0,2	62,5

Теперь целевая функция $J(b)$, зависящая только от одного параметра, на $k+1$ итерации принимает вид

$$J(b_k + \delta_k) = \mathbf{f}^\top(b_k)\mathbf{f}(b_k) + 2\mathbf{f}^\top(b_k) \frac{d\mathbf{f}}{db}(b = b_k) \delta_k + \frac{d\mathbf{f}^\top}{db}(b = b_k) \frac{d\mathbf{f}}{db}(b = b_k) \delta_k^2 \quad (8)$$

и имеет минимум при

$$\delta_k = \frac{\mathbf{f}^\top(b_k) \frac{d\mathbf{f}}{db}(b = b_k)}{d\mathbf{f}^\top/db(b = b_k) \frac{d\mathbf{f}}{db}(b = b_k)}.$$

Здесь

$$\frac{d\mathbf{f}}{db} = (\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2) + r \left(\frac{d\mathbf{n}_1}{db} - \frac{d\mathbf{n}_2}{db} \right).$$

Итерационный процесс завершается при выполнении условия $|\delta_k| < 0,1$. Поскольку приращения δ_k вычисляются в тех же единицах, что и b , выполнение этого условия говорит о положении, достаточно близком к точке минимума функционала. Координаты центра роговицы вычисляются по-прежнему согласно (6) с учётом равенства b_1 и b_2 .

Вычислительный эксперимент. Алгоритм был проверен посредством моделирования хода лучей от пары точечных источников излучения, отражённых шариком с зеркальной поверхностью радиусом $r = 7,5$ (все расстояния указаны в мм) в объектив камеры, формирующей в плоскости сенсора изображения бликов. В системе координат камеры источники излучения размещались в точках $S_1(-120, 0, 0)$ и $S_2(120, 0, 0)$, центр шарика помещался в точке $C(0, 0, 480)$, т. е. расстояние от оптического центра камеры до поверхности шарика более чем в 60 раз превышало его радиус. Формат сенсора камеры — 1280×1024 пикселей, размер пикселя — $0,0053 \times 0,0053$ мм, фокусное расстояние объектива камеры — 25 мм. В вычислительном эксперименте предполагалось, что координаты изображений бликов измеряются с ошибками, независимо распределёнными по обеим координатам бликов по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением σ . Эксперимент состоял в сравнении оценок координат центра шарика C , полученных посредством минимизации целевых функций (5) и (8) по 500 реализациям измерений координат изображений бликов. В таблице приведены средние значения m и среднеквадратичные ошибки v оценок координат (в мм) для трёх значений σ .

Из таблицы следует, что оба варианта алгоритма обеспечивают примерно одинаковую точность оценок. Упрощённый алгоритм на основе целевой функции $J(b)$ приводит к заметной смещённости оценки координаты z центра шарика только при значительных ошибках в координатах изображений бликов. В реальных условиях эти ошибки обычно составляют десятые доли пикселя. Следует отметить, что этот вариант имеет высокую скорость сходимости: при начальных значениях оцениваемого параметра b , отличных от истинного в 2 раза, минимум целевой функции достигается не более чем за 5 итераций.

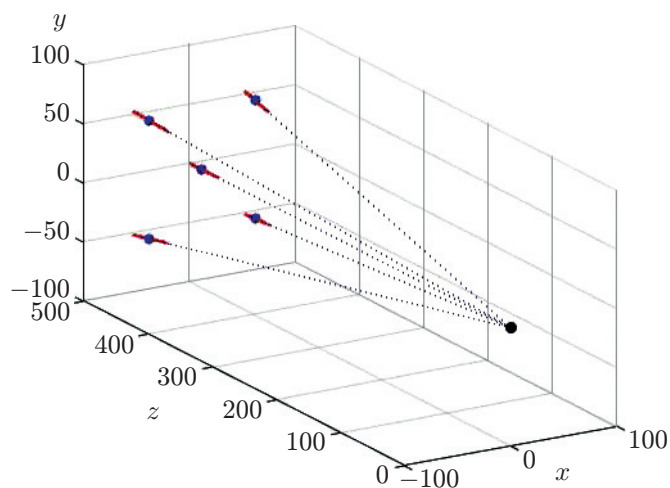


Рис. 4. Геометрия ошибок оценивания трёхмерных координат центра шарика с зеркально отражающей поверхностью

Рис. 4 иллюстрирует распределение ошибок оценки трёхмерных координат при заданных ошибках определения координат в плоскости сенсора камеры. Здесь синими точками обозначено пять заданных положений расчётного центра шарика, чёрной точкой отмечено положение оптического центра объектива камеры, а красными точками показан разброс оценок координат центра шарика, полученных с помощью предлагаемого алгоритма. Центр шарика располагался последовательно в точках с координатами $(0, 0, 480)$, $(-50, -50, 480)$, $(50, -50, 480)$, $(-50, 50, 480)$ и $(50, 50, 480)$. Результат получен для каждого положения по 500 измерениям при значении стандартного отклонения координат блика $\sigma = 0,5$ пикселя.

Как следует из рис. 4, основная составляющая ошибки лежит в направлении «оптический центр — центр шарика» и во много раз превышает ошибки в ортогональной плоскости, что, по-видимому, характерно для ситуации, когда расстояние от шарика до камеры намного больше, чем его радиус.

Заключение. Разработан новый алгоритм оценивания координат центра отражающей свет сферы по изображениям пары бликов, создаваемых точечными источниками света на её поверхности. При условии, что оптический центр видеокamеры, формирующей изображения бликов, удалён от центра сферы на расстояние, значительно превышающее радиус сферы, задача сводится к решению одного нелинейного уравнения. Предложена итерационная процедура поиска решения уравнения, обладающая высокой скоростью сходимости. Назначение алгоритма — определение трёхмерных координат роговицы глаза в системе бесконтактного слежения за направлением взгляда.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 121022000116-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tobii Gaming** — The Next Generation of Head Tracking and Eye Tracking. URL: <https://gaming.tobii.com> (дата обращения: 21.02.2022).
2. **Eid M. A., Giakoumidis N., El Saddik A.** A novel eye-gaze-controlled wheelchair system for navigating unknown environments: Case study with a person with ALS // IEEE Access. 2016. 4. P. 558–573. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2520093.

3. **Said Sh., AlKork S., Beyrouthy T. et al.** Real time eye tracking and detection — a driving assistance system // *Advances in Sci., Technol. and Eng. Syst. Journ.* 2018. **3**, N 6. P. 446–454. URL: <https://www.astesj.com/v03/i06/p53/> (дата обращения: 16.06.2022).
4. **Nguyen T. P., Chew M. T., Demidenko S.** Eye tracking system to detect driver drowsiness // *Proc. of the 6th Int. Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. Queenstown, New Zealand, Feb. 16-18, 2015. P. 472–477. DOI: 10.1109/ICARA.2015.7081194.
5. **Chandon P. P., Hutchinson J. W., Bradlow E. T., Young S. H.** Measuring the value of point-of-purchase marketing with commercial eye-tracking data // *INSEAD Business School Research Paper*. No. 2007/22/MKT/ACGRD. 46 p. Posted: 24 Nov 2007.
6. **Айттрекинг** в психологической науке и практике /Отв. ред. В. А. Барабанщиков. М.: Когито-Центр, 2015. 410 с.
7. **Cherif Z., Nait-Ali A., Motsch J., Krebs M.** An adaptive calibration of an infrared light device used for gaze tracking // *Proc. of the 19th IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf. Anchorage, USA, May 21–23, 2002*. Vol. 2. P. 1029–1033. DOI: 10.1109/IMTC.2002.1007096.
8. **Hennessey C., Nouredin B., Lawrence P.** A single camera eye-gaze tracking system with free head motion // *Proc. of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications*. March 2006. P. 87–54. DOI: 10.1145/1117309.1117349.
9. **Goss D. A., West R. W.** *Introduction to the Optics of the Eye*. Boston: Butterworth Heinemann, 2001. 234 p.
10. **Shih, S., Liu J.** A novel approach to 3-D gaze tracking using stereo cameras // *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics*. Pt. B. 2004. **34**, N 1. P. 234–245. DOI: 10.1109/TSMCB.2003.811128.
11. **Coutinho F. L., Morimoto C. H.** Free head motion eye gaze tracking using a single camera and multiple light sources // *Proc. of the 19th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*. Manays, Brazil, Oct. 8–11, 2006. P. 171–178. DOI: 10.1109/SIBGRAPI.2006.21.
12. **Zhu Z., Ji Q.** Novel eye gaze tracking techniques under natural head movement // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2007. **54**, N 12. P. 2246–2260. DOI: 10.1109/TBME.2007.895750.
13. **Dlib C++ Library**. URL: <http://dlib.net/optimization.html> (дата обращения: 18.02.2022).
14. **Nocedal J., Wright S. J.** *Numerical Optimization*. 2nd ed. Springer, 2006. 634 p.

Поступила в редакцию 16.06.2022

После доработки 17.06.2022

Принята к публикации 30.06.2022
