

БИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА ПО СОСУДИСТОМУ РИСУНКУ ПАЛЬЦА

Грижебовская А. Г.¹, Михалев А. В.²

Целью работы является исследование, анализ и разработка алгоритма распознавания по сосудистому рисунку пальца, который может применяться в системах верификации или идентификации. Рисунок вен пальца является биометрическим признаком. Для анализа используются изображения сосудистого рисунка пальца, полученные с биометрического сканера.

В результате разработан алгоритм, который обрабатывает и распознает изображения рисунка вен пальца. По изображению сосудов пальца строится шаблон или модель. Полученные шаблоны распознаются в автоматическом режиме. Рассчитаны ошибки распознавания для данной системы. Предложена и реализована схема обработки изображений, включающая последовательность фильтров выделения области пальца, оценки угла поворота, усиления контраста изображения, выделения характерных особенностей и признаков на изображении. Применялись фильтры уменьшения шумов, морфологические операции, фильтры Габора. Предложен и реализован алгоритм нахождения качества изображения вен пальца. Разработан алгоритм сравнения двух шаблонов, позволяющий распознавать изображения венного рисунка.

Ключевые слова: биометрия, распознавание образов, обработка изображений, сосудистый рисунок пальца, биометрический шаблон, выделение особенностей, сравнение шаблонов.

DOI:10.21681/2311-3456-2019-5-51-56

1. Введение

В биометрических системах для распознавания могут применяться различные признаки. Основные биометрические характеристики человека: черты лица, термограмма лица, параметры голоса, узор радужной оболочки лица, отпечатки пальцев, сосудистый рисунок ладони, сосудистый рисунок пальца, фрагменты ДНК и другие. Подход к биометрическому распознаванию делится на две категории: выделение внешних характеристик (лицо, отпечаток пальца) и внутренних (сосуды руки, ладони, пальца) [1-3]. Таким образом, распознавание сосудистого (венного) рисунка пальца является одной из форм биометрии. Венный рисунок пальца является уникальной характеристикой, отличается у разных людей, в том числе близнецов, существует только у живых людей. Вены расположены под поверхностью кожи и невидимы в световом диапазоне, поэтому данный признак сложно подделать. Данная технология может обеспечить высокую и хорошую степень защиты. Тем не менее, рисунок вен и артерий может изменяться с течением времени, по разным источникам в течение двух – пяти лет, данная статистика должна еще исследоваться. Таким образом, признак не является стабильным и требуется обновление шаблонов через несколько лет после регистрации [1]. В системах распознавания по рисунку вен могут использоваться не только пальцы, могут распознаваться сосуды ладони, руки, ноги. Но небольшой размер пальца, большее количество сосудов, чем на ладони или руке, делают данную технологию легко доступной и удобной в применении. Технология рас-

познавания сосудистого рисунка может быть как контактной, так и бесконтактной технологией. В последние годы данная технология активно развивается.

Принцип работы считывателя венного рисунка состоит в том, что гемоглобин крови поглощает инфракрасное излучение, изображение сосудистого рисунка становится видимым в инфракрасном диапазоне. Применяется длина волны 700-900 нм, рисунок вен визуализируется в виде темных линий, далее полученные изображения обрабатываются и могут быть распознаны [2-5].

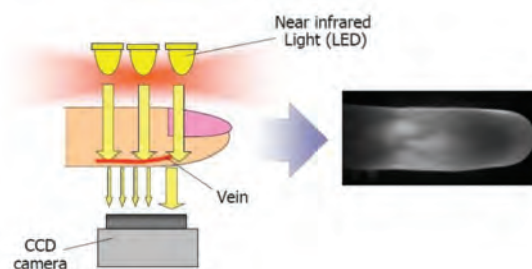


Рис.1 Схема работы биометрического сканера сосудов пальца³

3 URL: https://motherboard.vice.com/en_us/article/wjzen/future-digital-security-is-in-our-veins

1 Грижебовская Анна Георгиевна, аспирант МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия. E-mail: a_gree@mail.ru

2 Михалев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Теоретической информатики, член-корреспондент Академии криптографии РФ, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия. E-mail: aamikhalev@mail.ru

Возможно интегрирование данной технологии в мультибиометрические системы, дополнительное применение разных биометрических признаков повышает надежность распознавания, возможно применение биометрии в дополнительной комбинации с паролем.

2. Методы построения шаблонов венного рисунка пальца, сравнение шаблонов

Изображения, полученные с биометрического сканера, обычно зашумленные, могут быть повернуты, иметь смещение. Первым этапом обработки выступает нахождение области пальца. Применяются методы бинаризации, выделение границ фильтрами Собеля, детектор Канни. После нахождения области пальца обычно определяется угол поворота. Угол поворота может вычисляться по бинаризованному изображению, вычисляются центральные моменты инерции второго порядка, определяется угол поворота [6-8].

Следующей стадией обработки выступает нормализация и улучшение изображения. Применяются фильтры усиления контраста и уменьшения шумов. Контрастно ограниченная адаптивная эквализация гистограммы, Clahe-метод, один из общих подходов для улучшения изображений венных рисунков [9, 10]. Используются также другие подходы, например, круговые фильтры Габора, комбинация фильтров Габора и детектор Канни [11-12].

Извлечение признаков, выделение характерных особенностей, является следующим этапом обработки. Исследовалось много методов выделения линий вен, хорошо зарекомендовали себя следующие методы: метод многократной трассировки линий [13], метод максимальной кривизны [14, 15], фильтры Габора [16, 17], метод локальных бинарных шаблонов [18]. Возможна комбинация способов обработки, например фильтры Габора и метод многократной трассировки линий. Данные алгоритмы могут хорошо работать с изображениями вен плохого качества. Возможно применение технологии выделения и анализа особых точек [19].

Сравнение двух шаблонов является завершающей стадией в распознавании, принимается решение, соответствует ли предъявляемый шаблон зарегистрированному ранее образцу. Могут применяться традиционные методы и методы машинного обучения [20, 21, 22]. Традиционные методы могут использовать корреляцию пересечения областей шаблонов, попиксельно сравнивать отдельные точки шаблона с группой точек другого. Могут применяться методы сравнения по особым точкам, окончаниям и ветвлениям. Алгоритмы распознавания по особым точкам широко применяются для отпечатков пальцев и могут применяться в распознавании венного рисунка. Вычисляется мера сходства между двумя шаблонами, которая обычно вычисляется в диапазоне [0,1]. Если величина меры сходства близка к 0, то два предъявляемых биометрических образца принадлежат разным людям. Чем ближе она к 1, тем с большей долей вероятности можно утверждать, что образцы принадлежат одному человеку. На системном уровне регулируется введением порога распознавания.

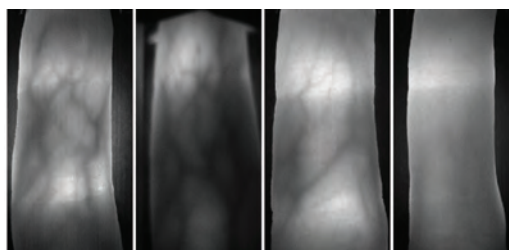
3. Ошибки распознавания биометрической системы

Для оценки точности распознавания используются следующие характеристики [23]: ошибка первого рода FRR (False Rejection Rate) – ошибочный отказ в доступе; ошибка второго рода FAR (False Acceptance Rate) – ошибочный допуск или ложное распознавание; ошибка третьего рода – невозможно получить изображение или построить шаблон. Также применяется усредненная ошибка распознавания EER (Equal Error Rate), которая представляет равный процент ошибок распознавания, когда FAR=FRR.

4. Описание алгоритма построения шаблонов

В рамках проводимого исследования была поставлена задача разработки алгоритма распознавания по рисунку вен и сосудов пальца. Алгоритм состоит из 3 частей: предобработка, улучшение изображения и выделение структур, сравнение шаблонов.

С биометрического сканера получаем изображение I , где $I(x,y)$ – интенсивность яркости изображения в точке (x,y) . Интенсивность яркости изменяется в диапазоне от 0 до 255. Показаны примеры изображений (Рис.2).



а) б) в) г)

Рис.2 Примеры изображений рисунков вен: а) отличное качество; б) затемненное изображение; в) хорошее качество; г) плохое

Изображения вен пальца являются малоконтрастными, качество изображений бывает разным. Могут быть изображения, где сосуды хорошо различимы, есть затемненные, где линии почти не видны.

Для нахождения области пальца применяется выделение контуров на изображении, применяем фильтр Собеля. Находим границы области пальца. Для уменьшения неровностей границ применяем морфологические операции дилатации и эрозии с шаблоном 3x3.

Для нахождения угла поворота используется вычисление центральных моментов второго порядка. Производится поворот изображения.

Для уменьшения шумов на изображении применяется медианный фильтр 5x5 и 3x3, фильтр Винера.

Для увеличения контраста рисунка вен может применяться Clahe- метод, метод контрастно-ограниченной адаптивной эквализации гистограммы, который хорошо работает с небольшими локальными окрестностями.

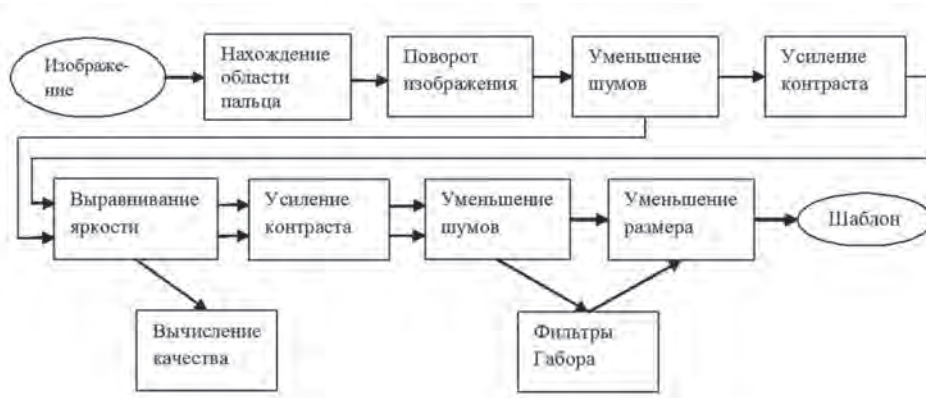


Рис.3 Блок-схема построения шаблонов.

Для восстановления контраста в затемненных областях изображений венного рисунка используем метод адаптивной эквализации гистограммы. Сущность данного метода состоит в том, что для квадратного блока W размером $M \times M$ с центром в точке (x,y) строится гистограмма Gist интенсивности яркости, которая представляет собой массив из 256 чисел. Гистограмма нормализуется для области W , значение яркости в точке (x,y) пересчитывается. Далее применяется смещение окна, гистограмма вычисляется для каждого блока $M \times M$ с центром в каждой точке изображения. Для ускорения вычислений, достаточно пересчитывать вклад в гистограмму значений яркости левой и правой границ блока, например, при смещении окна по горизонтали. Таким образом, происходит последовательное вычисление яркости в каждой точке изображения.

Следующим этапом обработки является выравнивание яркости изображения. Изображение разбивается на блоки $M \times M$, для каждого блока вычисляется средняя яркость и коэффициент:

$$I_{av} = \frac{1}{M \times M} \sum_{x,y \in M} I(x,y), \quad (1)$$

Тогда яркость произвольной точки $I'(x,y)$ вычисляется методом линейной интерполяции:

$$t = \frac{T}{M}, \quad s = \frac{S}{M}, \quad (2)$$

$$k = (1-s) \times (1-t) \times I_1 + s \times (1-t) \times I_2 + (1-s) \times t \times I_3 + s \times t \times I_4, \quad (3)$$

$$I' = I \times \frac{I_0}{k}, \quad (4)$$

где $I(x,y)$ – яркость точки, (s,t) – координаты точки относительно центра ближайшего блока. I_0 – заданный уровень яркости, например, $I_0 = 128$. I_1, I_2, I_3, I_4 – средние яркости соседних блоков, вычисляются по формуле (1).

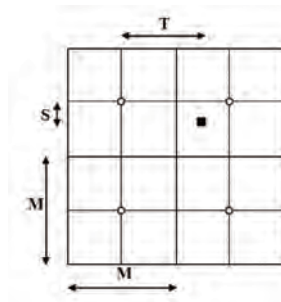


Рис.4 Выравнивание яркости изображения по блокам $M \times M$

После выравнивания яркости применяется метод эквализации гистограммы, фильтр уменьшения шумов. На следующем этапе размер изображения уменьшается в 4 раза.

Для лучшего выделения линий вен в данной работе изображение обрабатывается фильтрами Габора[23]. Двумерные фильтры Габора описываются следующими формулами:

$$g(x, y, \theta, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2} \right) \right\} \times \cos(2\pi f \times x), \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} x_\theta \\ y_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Здесь: θ – ориентация фильтра, (x_0, y_0) координаты после поворота точки (x, y) на угол $(90^\circ - \theta)$, f – частота, σ_x, σ_y – дисперсия Гауссиана.

Таким образом, для выделения линий сосудов применяется набор фильтров Габора с разными углами поворота, вычисляется отклик каждого пикселя изображения на серию фильтров.

Показаны отдельные этапы построения шаблона (Рис.5)

к 1 показывают, что шаблоны принадлежат одному человеку.

Шаблон представляет собой обработанное и улучшенное изображение, содержащее характерные линии вен $Temp1(x, y)$. Для каждого шаблонов выделяем 3 прямоугольные области W_t размера $A \times B$, которые находятся в верхней, центральной и нижней части. Производится сравнение пикселей по каждой из областей W_t для двух шаблонов, вычисляется корреляция областей

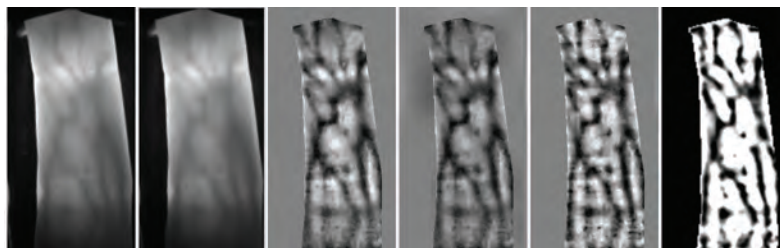
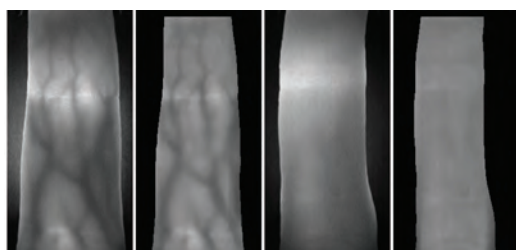


Рис.5. Этапы обработки изображений

Качество исходных изображений может отличаться, линии сосудов могут быть хорошо или плохо различимы. Поэтому важно иметь оценку качества изображения. В данной системе анализируется качество методом вычисления контраста изображения в трех зонах: верхней, средней и нижней. Для оценки контраста применяется метод выравнивания яркости изображения по формулам (1-4). После этого оценивается дисперсия в каждой из трех зон, производится численная оценка качества по шкале [1-5], где 1 означает хорошее качество, 5 – плохое качество.



а) б)
Рис.6 Оценка качества изображений:
а) хорошее; б) плохое

5. Сравнение шаблонов

Сравнение двух шаблонов венного рисунка является заключительной стадией алгоритма распознавания. На вход программы подаются два шаблона, оценивается их сходство между собой, вычисляется мера сходства, в диапазоне 0-1. Числа близкие к 0 означают, что шаблоны принадлежат разным людям. Числа близкие

пересечения. Процесс сравнения включает многократное смещение двух шаблонов относительно друг друга на $vector(i, j)$, и сравнение $Temp1(x, y)$ и $Temp2(x+i, y+j)$. Для пары шаблонов получаем три меры сходства и оптимальный вектор смещения зон W_t относительно друг друга. Данные анализируются, каждой паре шаблонов ставится в соответствие число M_{templ} , которое отражает меру сходства двух шаблонов.

6. Основные результаты и заключение

Предложенный алгоритм тестировался на базе изображений вен, полученной с биометрического сканера. Использовалась база отпечатков, состоящая из 2700 изображений сосудов пальцев правой и левой руки. Получена следующая статистика распознавания:

EER = 0.009;
FRR = 0.009 on 10-2 FAR;
FRR = 0.022 on 10-4 FAR;
FRR = 0.040 on 10-6 FAR;

Для данной базы изображений вен получили, что EER = 0.9%. Алгоритм показывает устойчивое распознавание, он может применяться для распознавания мало контрастных изображений рисунка вен, имеющих среднее или плохое качество. Данная модель может применяться в биометрической системе верификации, когда происходит сравнение шаблонов «один к одному».

Планируется исследование по дальнейшему улучшению алгоритма, связанное с реализацией быстрого алгоритма распознавания. Такой моделью может быть нахождение особых точек и других структур на изображениях вен хорошего и среднего качества.

Литература

1. Kayode Akinlekan A., Mohd Shafry Mohd R., Abdul Hanan A. challenges of finger vein verification system: a theoretical perspective // Advanced Science Letters. 2018. Vol. 24, no. 5. P. 3602-3608. DOI: 10.1166/asl.2018.11445.

2. Kulkarni S., Raut R. D., Dakhole P. K. A novel authentication system based on hidden biometric trait // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 85. P. 255-262. URL:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.229>.
3. Liu Z., Song S. An embedded real-time finger-vein recognition system for mobile devices // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2012. Vol. 58. P. 522-527. DOI:10.1109/TCE.2012.6227456.
4. Xie S., Fang L., Wang Z., Ma Z., Li J. Review of personal identification based on near infrared vein imaging of finger // In *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*. Chengdu, China, 2017. P. 206–213.
5. Yang L., Yang G., Yin Y., Zhou L. A survey of finger vein recognition // In *Proceedings of the Chinese Conference on Biometric Recognition*. Shenzhen, China, 2014; Springer: Cham, Switzerland, 2014. P. 234–243.
6. Lu Y., Yang G., Zhou L., Yin Y. Superpixel based finger vein roi extraction with sensor interoperability // In *Proceedings of the 2015 International Conference on Biometrics (ICB)*. Phuket, Thailand, 2015. P. 444-451.
7. Wang M., Tang D. Region of interest extraction for finger vein images with less information losses // *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 76. P. 14937-14949. URL:<https://doi.org/10.1007/s11042-016-4285-2>.
8. Zheng H., Ye Y., Liu S., Ni N., Zhang Y., Huang H., Li W. Parameter adjustment of finger vein recognition algorithms // In *Proceedings of the Identity, Security and Behavior Analysis (ISBA), 2017 IEEE International Conference*. New Delhi, India, 2017. P. 1-8.
9. Xie S. J., Lu Y., Yoon S., Yang J., Park D. S. Intensity variation normalization for finger vein recognition using a guided filter based single scale retinex // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 17089-17105. DOI: 10.3390/s150717089.
10. Kauba C., Reissig J., Uhl A. Pre-processing cascades and fusion in finger vein recognition // In *Proceedings of the 2014 International Conference of the Biometrics Special Interest Group (BIOSIG)*. Darmstadt, Germany, 2014. P. 1-6.
11. Akintoye K.A., Shafry M. R. M., Abdullah H. A novel approach for finger vein pattern enhancement using Gabor and Canny edge detector // *International Journal of Computer Applications*. 2017. Vol. 157. P. 16-20. DOI: 10.5120/ijca2017912637.
12. Yang J., Shi Y., Yang J., Jiang L. A novel finger-vein recognition method with feature combination // In *Proceedings of the 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Cairo, Egypt, 2009. P. 2709-2712.
13. Miura N., Nagasaka A., Miyatake T. Feature extraction of finger-vein patterns based on repeated line tracking and its application to personal identification // *Machine Vision and Applications*. 2004. Vol. 15. P. 194-203. DOI: 10.1007/s00138-004-0149-2.
14. Miura N., Nagasaka A. Miyatake T. Extraction of finger-vein patterns using maximum curvature points in image profiles // *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2007. Vol. 90. P. 1185-1194. DOI: 10.1093/ietisy/e90-d.8/1185.
15. Tagkalakis F., Fotopoulos V. A low cost finger vein authentication system, using maximum curvature points // In *Proceedings of the 2015 International Conference on Applied Electronics (AE)*. Pilsen, Czech Republic, 2015. P. 249-252.
16. Kaur M., Babbar G. Finger vein detection using repeated line tracking, even Gabor and multilinear discriminant analysis (mda) // *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2015. Vol. 6. P. 3280-3284.
17. Kumar A., Zhou Y. Human identification using finger images // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2012. Vol. 21. P. 2228-2244. DOI: 10.1109/TIP.2011.2171697.
18. Lee H. C., Kang B. J., Lee E. C., Park K. R. Finger vein recognition using weighted local binary pattern code based on a support vector machine // *Journal of Zhejiang University Science C*. 2010. Vol. 11. P. 514-524. URL:<https://doi.org/10.1631/jzus.C0910550>.
19. Mantrao N., Sukhpreet K. An efficient minutiae matching method for finger vein recognition // *Int. J. Adv.Res. Comput. Sci. Softw. Eng.*. 2015. Vol. 5 P. 657-660.
20. Liu C., Kim Y. H. An efficient finger-vein extraction algorithm based on random forest regression with efficient local binary patterns // In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Phoenix, AZ, USA, 2016. P. 3141-3145. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7532938.
21. Radzi S. A., Hani M. K., Bakhteri R. Finger-vein biometric identification using convolutional neural network // *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*. 2016. Vol. 24. P. 1863-1878. DOI: 10.3906/elk-1311-43.
22. Xie C., Kumar A. Finger Vein Identification Using Convolutional Neural Network and Supervised Discrete Hashing // *Pattern Recognition Letters*. 2019. Vol. 119. P. 148-156. URL:<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.12.001>.
23. Maltoni D., Maio D., Jain A.K., Prabhakar S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York, Springer-Verlag, 2009. 510 p.

FINGER VEIN RECOGNITION TECHNIQUE

Grizhebovskaya A. G.⁴, Mikhalev A. V.⁵

The purpose of this paper is to research, to analyze and develop a finger vein recognition algorithm that can be used in biometric verification and /or identification systems. The picture of veins is a biometric feature. We are getting finger vein images from biometric scanner.

The result of the work is an algorithm that processes and matches finger vein images. The vein template or model

4 Anna Grizhebovskaya, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, E-mail: a_gree@mail.ru

5 Alexander Mikhalev, Dr.Sc., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, E-mail: aamikhalev@mail.ru

is built according to vascular image. The templates can be recognized. The recognition errors are calculated for this system. The image processing algorithm is proposed and implemented. Finger vein recognition includes a region of interest selection, estimation of angle rotation, image rotation, image enhancement and normalization, feature extraction. Noise reduction filters, morphological operations, Gabor filters were used. The image quality is analyzed. A matching algorithm that compares vein patterns is under consideration.

Keywords: biometrics, pattern recognition, image processing, finger vein, biometric template, feature extraction, matching.

References

1. Kayode Akinlekan A., Mohd Shafry Mohd R., Abdul Hanan A. challenges of finger vein verification system: a theoretical perspective // *Advanced Science Letters*. 2018. Vol. 24, no. 5. P. 3602-3608. DOI: 10.1166/asl.2018.11445.
2. Kulkarni S., Raut R. D., Dakhole P. K. A novel authentication system based on hidden biometric trait // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 85. P. 255-262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.229>
3. Liu Z., Song S. An embedded real-time finger-vein recognition system for mobile devices // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2012. Vol. 58. P. 522-527. DOI:10.1109/TCE.2012.6227456
4. Xie S., Fang L., Wang Z., Ma Z., Li J. Review of personal identification based on near infrared vein imaging of finger // In *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*. Chengdu, China, 2017. P. 206-213.
5. Yang L., Yang G., Yin Y., Zhou L. A survey of finger vein recognition // In *Proceedings of the Chinese Conference on Biometric Recognition*. Shenzhen, China, 2014; Springer: Cham, Switzerland, 2014. P. 234-243.
6. Lu Y., Yang G., Zhou L., Yin Y. Superpixel based finger vein roi extraction with sensor interoperability // In *Proceedings of the 2015 International Conference on Biometrics (ICB)*. Phuket, Thailand, 2015. P. 444-451.
7. Wang M., Tang D. Region of interest extraction for finger vein images with less information losses // *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 76. P. 14937-14949. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-016-4285-2>.
8. Zheng H., Ye Y., Liu S., Ni N., Zhang Y., Huang H., Li W. Parameter adjustment of finger vein recognition algorithms // In *Proceedings of the Identity, Security and Behavior Analysis (ISBA)*, 2017 IEEE International Conference. New Delhi, India, 2017. P. 1-8.
9. Xie S. J., Lu Y., Yoon S., Yang J., Park D. S. Intensity variation normalization for finger vein recognition using a guided filter based single scale retinex // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 17089-17105. DOI: 10.3390/s150717089.
10. Kauba C., Reissig J., Uhl A. Pre-processing cascades and fusion in finger vein recognition // In *Proceedings of the 2014 International Conference of the Biometrics Special Interest Group (BIOSIG)*. Darmstadt, Germany, 2014. P. 1-6.
11. Akintoye K.A., Shafry M. R. M., Abdullah H. A novel approach for finger vein pattern enhancement using Gabor and Canny edge detector // *International Journal of Computer Applications*. 2017. Vol. 157. P. 16-20. DOI: 10.5120/ijca2017912637.
12. Yang J., Shi Y., Yang J., Jiang L. A novel finger-vein recognition method with feature combination // In *Proceedings of the 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Cairo, Egypt, 2009. P. 2709-2712.
13. Miura N., Nagasaka A., Miyatake T. Feature extraction of finger-vein patterns based on repeated line tracking and its application to personal identification // *Machine Vision and Applications*. 2004. Vol. 15. P. 194-203. DOI: 10.1007/s00138-004-0149-2.
14. Miura N., Nagasaka A., Miyatake T. Extraction of finger-vein patterns using maximum curvature points in image profiles // *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2007. Vol. 90. P. 1185-1194. DOI: 10.1093/ietisy/e90-d.8/1185.
15. Tagkalakis F., Fotopoulos V. A low cost finger vein authentication system, using maximum curvature points // In *Proceedings of the 2015 International Conference on Applied Electronics (AE)*. Pilsen, Czech Republic, 2015. P. 249-252.
16. Kaur M., Babbar G. Finger vein detection using repeated line tracking, even Gabor and multilinear discriminant analysis (mda) // *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2015. Vol. 6. P. 3280-3284.
17. Kumar A., Zhou Y. Human identification using finger images // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2012. Vol. 21. P. 2228-2244. DOI: 10.1109/TIP.2011.2171697.
18. Lee H. C., Kang B. J., Lee E. C., Park K. R. Finger vein recognition using weighted local binary pattern code based on a support vector machine // *Journal of Zhejiang University Science C*. 2010. Vol. 11. P. 514-524. URL: <https://doi.org/10.1631/jzus.C0910550>.
19. Mantrao N., Sukhpreet K. An efficient minutiae matching method for finger vein recognition // *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng.*. 2015. Vol. 5 P. 657-660.
20. Liu C., Kim Y. H. An efficient finger-vein extraction algorithm based on random forest regression with efficient local binary patterns // In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Phoenix, AZ, USA, 2016. P. 3141-3145. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7532938.
21. Radzi S. A., Hani M. K., Bakhteri R. Finger-vein biometric identification using convolutional neural network // *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*. 2016. Vol. 24. P. 1863-1878. DOI: 10.3906/elk-1311-43.
22. Xie C., Kumar A. Finger Vein Identification Using Convolutional Neural Network and Supervised Discrete Hashing // *Pattern Recognition Letters*. 2019. Vol. 119. P. 148-156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.12.001>.
23. Maltoni D., Maio D., Jain A.K., Prabhakar S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York, Springer-Verlag, 2009. 510 p.