



Оценка качества и идентификация отпечатков пальцев путем анализа структурных свойств изображения

Д.Г. Асатрян^{1,2}

¹ Институт проблем информатики и автоматизации НАН РА, Ереван 0014, Армения

² Российско-Армянский университет, Ереван 0052, Армения

Аннотация. Рассмотрена задача оценки качества изображения отпечатков пальцев с применением пространственных методов анализа. Предложено использовать математическую модель, разработанную ранее для описания совокупности магнитуд градиента изображения. Модель основана на двухпараметрическом распределении Вейбулла. Для оценки качества отпечатков пальцев предложены два подхода. Первый реализуется с помощью так называемого метода сравнения с эталоном (Full Reference), когда сравниваются значения статистических оценок параметров распределения Вейбулла. Приведены результаты решения задачи идентификации потовых пор этим методом. Второй подход называется «безэталонным» (No-Reference) и применяется для оценки качества отпечатков при анализе и выделении информативности их отдельных участков. В качестве характеристики качества предлагается использовать карту размытости изображения, а в качестве меры размытости – статистическую оценку параметра формы распределения Вейбулла. Параметр формы оценивается в каждой точке изображения по совокупности магнитуд градиента изображения в окрестности точки, при этом применяется разработанная ранее методика построения карты размытости. Эффективность предложенных подходов иллюстрируется конкретными примерами.

Ключевые слова: отпечаток пальца, качество изображения, эталонный метод, безэталонный метод, размытие, карта качества, потовые поры, распределение Вейбулла

Для цитирования: Асатрян Д.Г. Оценка качества и идентификация отпечатков пальцев путем анализа структурных свойств изображения // Теория и практика судебной экспертизы. 2020. Т. 15. № 4. С. 90–97. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2020-4-90-97>

Quality Assessment and Identification of Fingerprints by Analysis of the Image's Structural Properties

David G. Asatryan^{1,2}

¹ Institute for Informatics and Automation Problems of National Academy of Sciences of Armenia, Yerevan 0014, Armenia

² Russian-Armenian University, Yerevan 0052, Armenia

Abstract. The paper addresses the problem of assessing the quality of fingerprint images using spatial analysis methods. The author proposes using the previously developed mathematical model to describe the set of magnitudes of the image gradient. The model is based on the two-parameter Weibull distribution. The author proposes two approaches to assess the quality of fingerprints. The first approach is implemented by the so-called “Full reference method”, which compares the Weibull distribution parameters’ values of statistical estimates. The results of identifying sweat pores using this method are presented. The second approach is called the “No-Reference method” and is used to assess fingerprints’ quality when analyzing and identifying the information content of their individual sections. It is proposed to use an image blur map as a quality characteristic and a statistical estimate of the Weibull distribution shape parameter as a measure of the blur. The shape parameter is estimated at each image point by the combination of magnitudes of the image gradient in the vicinity of the point; in this, the previously developed blur mapping technique is applied. The specific examples illustrate effectiveness of the proposed approaches.

Keywords: fingerprint, image quality, full reference method, no-reference method, blur, quality map, sweat pores, Weibull distribution

For citation: Asatryan D.G. Quality Assessment and Identification of Fingerprints by Analysis of the Image's Structural Properties. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2020. Vol. 15. No. 4. P. 90–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2020-4-90-97>

Введение

Оценка качества отпечатков пальцев играет решающую роль в процессах биометрической регистрации и распознавания. При автоматическом анализе и идентификации отпечатков пальцев (ОП) приходится основываться на оценке качества изображений, полученных различными техническими средствами.

Плохое качество изображения ОП можно объяснять двумя основными причинами. Первая кроется в низкой разрешающей способности сканеров, но поскольку в настоящее время промышленность выпускает множество сканеров с высоким разрешением, эта причина не является решающей при автоматической обработке данных ОП. Вторая причина связана с методом и условиями, при которых производится регистрация ОП. Наиболее часто искажения изображения ОП происходят при непреднамеренном движении регистрирующей камеры относительно сцены, при неправильном нажатии или неправильном угле установки пальца на поверхность сканера, из-за индивидуальных особенностей кожного покрова пальцев (повышенного потоотделения, загрязнения, наличия повреждений) и ряда других причин. Определенное влияние оказывают и оптические характеристики регистрирующей аппаратуры, особенно при автоматической регистрации и обработке ОП. Поэтому возникает необходимость разработки методов оценки качества ОП, устойчивых к подобного рода искажениям и позволяющих адекватно оценивать качество ОП в целом или классифицировать участки ОП по качеству.

В литературе имеется описание многих методов оценки качества ОП и их сравнительный анализ [1–6]. Большинство методов основано на определении частных признаков изображения в пространственной или частотной областях. Учитывая, что к проблеме оценки качества ОП применимы многие методы, используемые для оценки качества обычных цифровых изображений, и обстоятельный обзор публикаций по этой теме в рамках одной работы затруднителен, ограничимся рассмотрением методов, относящихся к оценке качества ОП, и сосредоточимся на тех, которые используют структурные свойства изображений. При этом поскольку большой объем данных требует значительных временных затрат для обработки, возникает желание использовать лишь те участки ОП, которые менее ис-

кажены и содержат наиболее полезную информацию. Предпочтительно использовать блочные методы, которые дают результаты, удобные и для визуального анализа.

Цель работы – представить метод оценки качества ОП, основанный на использовании структурных свойств изображения [7] и модели для магнитуды градиента изображения, построенной на двухпараметрическом распределении Вейбулла.

В предыдущих работах автора приведены краткие сведения о использовании данного подхода при решении различных задач обработки изображений и отмечены его достоинства [8]. Было экспериментально показано, что параметр формы распределения Вейбулла, оцененный по совокупности магнитуд градиента, можно использовать в качестве меры размытости изображения [9]. В данной работе демонстрируется применение алгоритмов оценки качества изображения ОП двумя методами: путем сравнения с эталоном и безэталонным методом.

Математическая модель и приложения

В научной литературе уже давно имеются публикации относительно выбора подходящих математических моделей для описания тех или иных свойств цифровых изображений. Поскольку одним из информативных и широко применяемых характеристик изображения является градиентное поле, вопрос о распределении магнитуды градиента особенно актуален. Имеются теоретические обоснования и описаны задачи, в которых оправдано применение моделей, основанных на распределении Вейбулла [10–11]. Наши исследования также подтверждают целесообразность применения модели Вейбулла для магнитуды градиента изображения, оцениваемого при помощи оператора Собела [12].

Плотность двухпараметрического распределения Вейбулла задается формулой:

$$f(x; \lambda, \eta) = \frac{\eta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\eta\right], \quad x \geq 0, \quad (1)$$

где $\eta > 0$ – параметр формы, $\lambda > 0$ – параметр масштаба [7–8].

Оценка параметров η и λ производится методом моментов, для чего сначала определяются выборочные среднее $\hat{\mu}$ и дисперсия $\hat{\sigma}^2$ по совокупности магнитуд гра-

диентов изображения ОП, затем решается уравнение

$$\frac{\Gamma(1+2/\hat{\eta})}{\Gamma^2(1+1/\hat{\eta})} = \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\mu}^2} + 1 \quad (2)$$

относительно параметра формы $\hat{\eta}$, где $\Gamma(\cdot)$ – гамма функция. Для численного решения уравнения (2) применяется метод деления отрезка пополам. Аналогично оценивается параметр масштаба λ :

$$\hat{\lambda} = \frac{\hat{\mu}}{\Gamma(1+1/\hat{\eta})}. \quad (3)$$

Ранее нами были разработаны две методики оценки качества изображения. Первая относится к так называемым методикам сравнения с эталоном (Full Reference), когда тестируемое изображение сравнивается с заданным (эталонным). Предлагаемая мера сходства (близости) двух изображений имеет вид

$$W^2 = \frac{\min(\eta_1, \eta_2) \min(\lambda_1, \lambda_2)}{\max(\eta_1, \eta_2) \max(\lambda_1, \lambda_2)}, \quad 0 < W^2 \leq 1, \quad (4)$$

где параметры модели (1) оцениваются по совокупности магнитуд градиентов сравниваемых изображений.

Имеется целый ряд приложений меры (4), в которых эффект достигается за счет слабой зависимости этой меры от размеров и ориентации изображений (см., например, [7–8]). Однако в настоящей работе мы приведем лишь один пример, наглядно показывающий достоинства данного подхода.

Результаты экспериментов

Следует отметить, что сейчас специалисты уделяют большое внимание вопросам использования признаков третьего уровня при анализе и распознавании ОП. Интерес представляют и потовые поры, отображаемые на изображениях ОП с высоким разрешением [13–14]. Одной из важных, но трудных задач является идентификация ОП по картине распределения пор на изображении. Обзор всех многочисленных методов, предложенных в литературе, выходит за рамки настоящей статьи, здесь мы проиллюстрируем применение метода, предложенного нами ранее [15].

Эксперимент 1. Сравнение распределения потовых пор ОП.

На рисунке 1 приведены образцы ОП и соответствующие им распределения закрытых пор (данная методика обнаруживает только закрытые поры). Образцы под номерами 1 и 2 получены с одного и того же ОП при помощи небольшого сдвига (в результате оказалось, что их визуально воспринимаемая идентичность не подтверждается формальным методом). Образцы под номерами 3 и 4 ничего общего не имеют. Распределения пор получены по методике [15], основанной на сегментации и статистическом анализе распределения пор по размерам.

Визуальный анализ распределения пор, приведенного на рисунке 1, позволяет предположить, что образцы 1 и 2 принадлежат одному и тому же лицу, а образцы под номерами 3 и 4 – разным. Однако для фор-

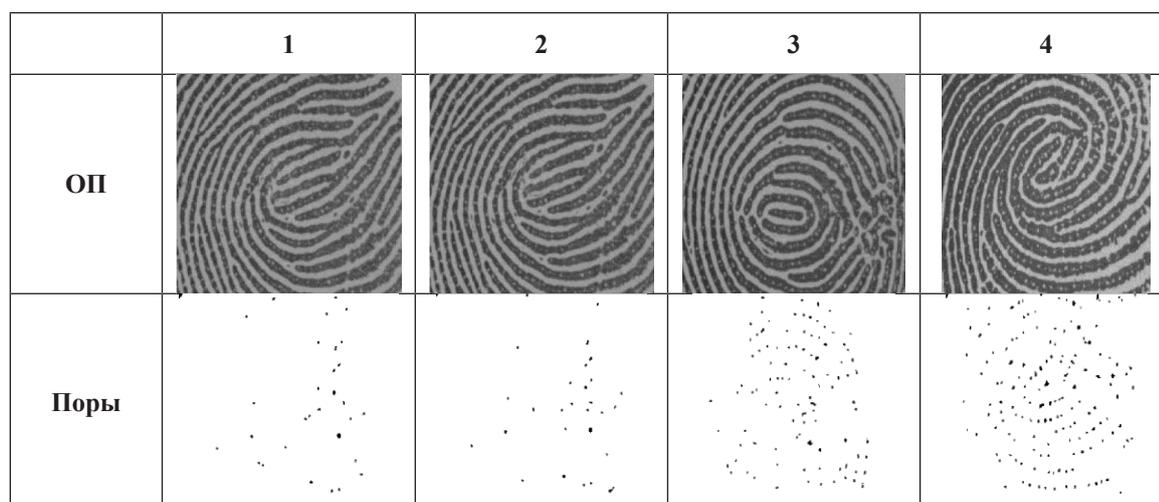


Рис. 1. Примеры отпечатков пальцев и соответствующих им распределений пор
Fig. 1. Samples of fingerprints and their corresponding pore distributions

мальной проверки этих гипотез предлагает применить меру сходства (4), приведенную выше. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения меры сходства изображений распределения пор образцов, приведенных на рисунке 1

Table 1. The values of similarity rates for images of pore distribution for samples shown in figure 1

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|-------------|------|------|
| 1 | 1 | 0.87 | 0.08 | 0.18 |
| 2 | | 1 | 0.07 | 0.02 |
| 3 | | | 1 | 0.33 |
| 4 | | | | 1 |

Анализируя данные (табл. 1), приходим к выводу об информативности характера распределения пор на изображениях ОП. Действительно, значение меры сходства изображений с номерами 1 и 2 достаточно велико (0,87), в то время как сходство этих же изображений с остальными несравнимо мало.

Таким образом, рассмотренная методика может быть с успехом использована при идентификации ОП, а также разработчиками программного обеспечения автоматического распознавания ОП в качестве дополнительных информативных признаков.

Вторая методика (безэталонная) не предполагает наличия эталонного изображения, а решение по качеству принимается на основе определенного анализа структуры и свойств тестируемого изображения. Обе разработанные нами методики используют оценки параметров распределения Вейбулла с той лишь разницей, что в первом случае используются оба параметра, причем для обоих сравниваемых изображений, а во втором – лишь параметр формы для тестируемого изображения.

Ранее мы показали, что параметр формы $\hat{\eta}$ распределения Вейбулла является хорошим индикатором степени размытости тестируемого изображения, причем чем больше размытость, тем больше значение параметра $\hat{\eta}$. При этом значения оценок параметра $\hat{\eta}$ ограничены и сосредотачиваются в районе значения «2». Было также показано, что малые значения параметра характерны

для изображений с достаточно ярко выраженной структурой [9].

Покажем применение данной безэталонной меры оценки качества ОП при помощи специальной процедуры, которая состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Рассчитать магнитуду градиента для всех пикселей изображения при помощи оператора Собела (кроме пикселей, находящихся на крайних столбцах и строках изображения).

Шаг 2. Разбить изображение на блоки размером $K \times K$, $K = 2M + 1$, $M \geq 2$. В результате могут оставаться части изображения с меньшими размерами. Такие части целесообразно выбирать по краям изображения ОП.

Шаг 3. Для каждого блока рассчитать выборочные среднее μ и дисперсию σ^2 магнитуд для всех пикселей блока, а также ква-

драт коэффициента вариации $\gamma = \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\mu}^2}$.

При этом пиксели с нулевыми значениями магнитуд не участвуют в расчетах.

Шаг 4. По значению коэффициента γ по формуле (2) оценить значение параметра формы $\hat{\eta}$ для каждого пикселя изображения.

Шаг 5. Запоминаются индексы пикселей с нулевыми значениями γ , в которых значения $\hat{\eta}$ после линейного контрастирования по множеству всех остальных пикселей и приведения к целочисленному виду заменяются на «1». При этом линейаризация производится так, чтобы большее значение вновь полученного $\hat{\eta}$ соответствовало большей степени размытости, и наоборот.

Шаг 6. Производится визуализация полученных данных.

Шаг 7. При необходимости полученная карта преобразуется в мозаику по обычной стандартной процедуре.

Следующие эксперименты показывают эффективность предлагаемой процедуры оценки качества ОП.

Эксперимент 2. Разбиение оригинала изображения ОП и его бинаризованной версии на 16 блоков и оценка степени размытости в этих блоках. Бинаризация изображения выполнена по алгоритму Отсу [16].

Как и ожидалось, степень размытости оригинала на рисунке 2 (1,560) существенно выше, чем после бинаризации (0,769).

Другими словами, бинаризация в целом улучшает качество изображения ОП, что немаловажно при автоматической обработке изображений. Отметим также, что качество бинаризации можно повысить, применяя другие методы, например метод адаптивной бинаризации.

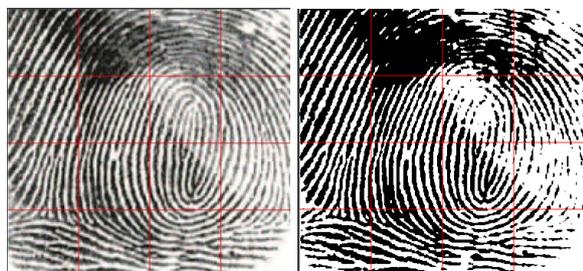


Рис. 2. Оригинал изображения ОП (слева) и его бинаризованная версия (справа)

Fig 2. Original image of a fingerprint (left) and its binarized version (right)

В таблице 2 приведены оценки размытости отдельных частей изображения ОП и, для сравнения, его бинаризованной версии. Изображение разбито на 16 частей примерно одного размера, учитывая что рассматриваемая методика с применением градиентного поля допускает сравнение разных по размеру изображений.

Визуальный анализ изображений (рис. 2, табл. 2) показывает, что в каждом из них у большинства блоков размытость примерно одинакова, причем степень размытости у блоков бинаризованного изображения заметно меньше, чем у оригинала, что также объяснимо. Однако в ряде случаев, особенно при обработке латентных ОП, картина в блоках может получиться более разнообразной и, следовательно, более информативной.

Таблица 2. Результаты расчетов степени размытости $\hat{\eta}$ изображения ОП в блоках: слева – оригинал, справа – бинаризованное изображение

Table 2. Results of calculations for the degree of a fingerprint's image blur $\hat{\eta}$ in blocks: left – original, right – binarized image

| Строки | Столбцы | | | |
|--------|---------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1.613 | 1.456 | 1.811 | 1.740 |
| 2 | 1.808 | 1.899 | 1.703 | 2.007 |
| 3 | 1.976 | 1.870 | 1.935 | 1.880 |
| 4 | 1.721 | 1.879 | 1.824 | 1.201 |

Эксперимент 3. Изучение пространственной неоднородности картины ОП.

При изучении пространственной неоднородности распределения темных и светлых участков ОП обычно применяют операцию бинаризации, что несколько облегчает задачу. Однако, ввиду неоднозначности этой операции вследствие зависимости результата от выбранного порога, она не всегда удовлетворяет требованиям задачи. Иногда не помогает даже применение процедуры нахождения оптимального значения порога Отсу или адаптивных методов бинаризации.

На рисунке 3 показаны результаты эксперимента с применением предложенного подхода. На рисунке 3b приведен результат бинаризации при оптимальном по Отсу пороге. Видно, что сравнение с оригиналом не дает существенной дополнительной информации относительно расположения и размеров неоднородных участков ОП. На рисунке 3c изображена бинаризованная карта размытости ОП, а на рисунке 3d – бинаризованное изображение рисунка 3c после сглаживания методом усреднения. Последние два изображения позволяют значительно более адекватно анализировать изображение ОП.

Эксперимент 4. Составление карты распределения размытости изображения ОП.

Карта позволяет наглядно выделить наименее размытые участки изображения ОП для дальнейшей обработки; предполагается, что на этих участках и сосредоточены информативные признаки.

В верхнем ряду рисунка 4 показаны оригинал ОП (а), бинаризованный оригинал (b) и карта размытости (с), а в нижнем ряду – мозаика этих же изображений. Здесь для

| Строки | Столбцы | | | |
|--------|---------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0.784 | 0.721 | 0.785 | 0.749 |
| 2 | 0.813 | 0.967 | 0.858 | 0.987 |
| 3 | 0.879 | 0.851 | 0.881 | 0.873 |
| 4 | 0.813 | 0.844 | 0.875 | 0.709 |



Рис. 3. Результаты эксперимента: а – оригинал, b – метод Отсу, с – бинаризация карты размытости, d – бинаризация после сглаживания карты размытости
Fig. 3. Experiment results: a – original, b – Otsu's method, c – binarization of the blur map, d – binarization after smoothing the blur map

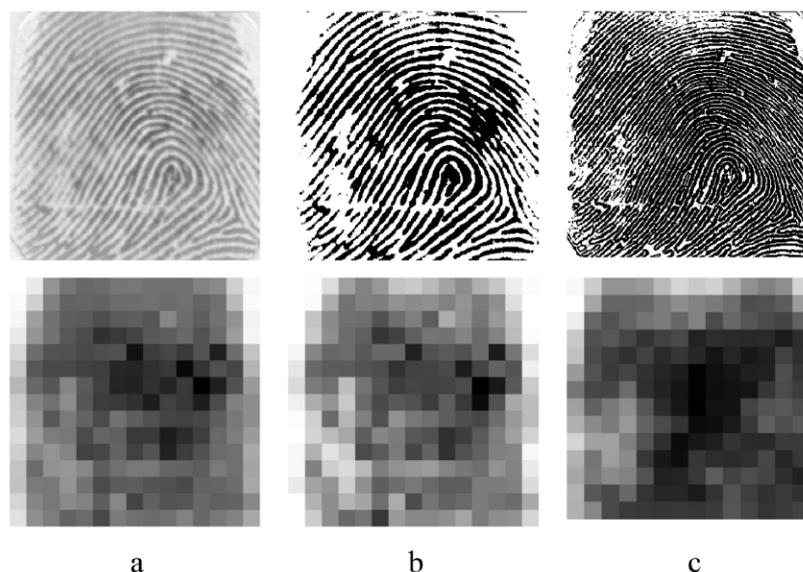


Рис. 4. Выделение информативных участков изображения ОП по мозаичной карте размытости; а – оригинал, b – бинаризованное изображение ОП, с – мозаичная карта размытости
Fig. 4. Selection of informative sections of a fingerprint's image based on the mosaic blur map; a – original, b – binarized fingerprint image, c – mosaic blur map

наглядности размытые участки были изображены светлыми тонами. Мы видим, что наиболее адекватную информацию об информативном участке изображения ОП можно получить по мозаичной карте размытости.

Выводы

В статье рассмотрена задача исследования качества и идентификации ОП путем анализа структурных свойств изображения. Предложено использовать разработанную ранее математическую модель структуры изображения, основанную на распределении Вейбулла. На экспериментальном материале показано применение метода с

полным использованием эталона и безэталонного метода в задаче идентификации ОП по распределению потовых пор. Сделан вывод, что рассмотренная методика может быть с успехом использована при идентификации ОП, а также разработчиками программного обеспечения автоматического распознавания ОП в качестве дополнительного информативных признаков.

Приведены экспериментальные результаты применения безэталонной меры качества для оценки степени размытости изображения ОП и его частей, в частности с применением процедур бинаризации, построения карты размытости и представления мозаичной картины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olsen M.A., Šmida V., Busch C. Finger Image Quality Assessment Features – Definitions and Evaluation // *IET Biometrics*. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 47–64.
<https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2014.0055>
2. Yao Zh., Le Bars J., Charrier C., Rosenberger C. Literature Review of Fingerprint Quality Assessment and Its Evaluation // *IET Biometrics*. 2016. Vol. 5. No. 3. P. 243–251.
<https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2015.0027>
3. Alonso-Fernandez F., Fierrez J., Ortega-Garcia J., Gonzalez-Rodriguez J., Fronthaler H., Kollreider K., Bigun J. A Comparative Study of Fingerprint Image-Quality Estimation Methods // *IEEE Transaction on Information Forensics and Security*. 2007. Vol. 2. No. 4. P. 734–743.
<https://doi.org/10.1109/tifs.2007.908228>
4. Kanjan N., Patil K., Ranaware S., Sarokte P. A Comparative Study of Fingerprint Matching Algorithms // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. No. 11. P. 1892–1896.
5. Chen T., Jiang X., Yau W. Fingerprint Image Quality Analysis / 2004 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2004). (Singapore, October 24–27, 2004). IEEE, 2004. Vol. 2. P. 1253–1256.
<https://doi.org/10.1109/icip.2004.1419725>
6. Shen L., Kot A., Koo W. Quality Measures of Fingerprint Images. In: Bigun J., Smeraldi F. (eds). *Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication. Third International Conference, AVBPA 2001 (Halmstad, Sweden, June 6–8, 2001). Proceedings. Lecture Notes in Computer Science*. 2001. Vol. 2091. P. 266–271.
https://doi.org/10.1007/3-540-45344-x_39
7. Asatryan D., Egiazarian K. Quality Assessment Measure Based on Image Structural Properties / 2009 International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing (Tuusula, Finland, August 19–21, 2009). IEEE. 2009. P. 70–73.
<https://doi.org/10.1109/Inla.2009.5278400>
8. Asatryan D.G. Gradient-Based Technique for Image Structural Analysis and Applications // *Computer Optics*. 2019. Vol. 43. No. 2. P. 245–250. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-245-250>
9. Асатрян Д.Г. Оценивание степени размытости изображения путем анализа градиентного поля // *Компьютерная оптика*. 2017. Т. 41. № 6. С. 957–962. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-6-957-962>
10. Geusebroek J.-M. The Stochastic Structure of Images. In: Kimmel R., Sochen N.A., Weickert J. (eds). *Scale Space and PDE Methods in Computer Vision. Scale-Space 2005. Lecture Notes in Computer Science*. 2005. Vol. 3459. P. 327–338. https://doi.org/10.1007/11408031_28
11. Yanulevskaya V., Geusebroek J.-M. Significance of the Weibull Distribution and its Sub-models in Natural Image Statistics / *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer*

REFERENCES

1. Olsen M.A., Šmida V., Busch C. Finger Image Quality Assessment Features – Definitions and Evaluation. *IET Biometrics*. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 47–64.
<https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2014.0055>
2. Yao Zh., Le Bars J., Charrier C., Rosenberger C. Literature Review of Fingerprint Quality Assessment and Its Evaluation. *IET Biometrics*. 2016. Vol. 5. No. 3. P. 243–251.
<https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2015.0027>
3. Alonso-Fernandez F., Fierrez J., Ortega-Garcia J., Gonzalez-Rodriguez J., Fronthaler H., Kollreider K., Bigun J. A Comparative Study of Fingerprint Image-Quality Estimation Methods. *IEEE Transaction on Information Forensics and Security*. 2007. Vol. 2. No. 4. P. 734–743.
<https://doi.org/10.1109/tifs.2007.908228>
4. Kanjan N., Patil K., Ranaware S., Sarokte P. A Comparative Study of Fingerprint Matching Algorithms. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. No. 11. P. 1892–1896.
5. Chen T., Jiang X., Yau W. Fingerprint Image Quality Analysis. *2004 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2004)*. (Singapore, October 24–27, 2004). IEEE, 2004. Vol. 2. P. 1253–1256.
<https://doi.org/10.1109/icip.2004.1419725>
6. Shen L., Kot A., Koo W. Quality Measures of Fingerprint Images. In: Bigun J., Smeraldi F. (eds). *Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication. Third International Conference, AVBPA 2001 (Halmstad, Sweden, June 6–8, 2001). Proceedings. Lecture Notes in Computer Science*. 2001. Vol. 2091. P. 266–271.
https://doi.org/10.1007/3-540-45344-x_39
7. Asatryan D., Egiazarian K. Quality Assessment Measure Based on Image Structural Properties. *2009 International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing (Tuusula, Finland, August 19–21, 2009)*. IEEE. 2009. P. 70–73.
<https://doi.org/10.1109/Inla.2009.5278400>
8. Asatryan D.G. Gradient-Based Technique for Image Structural Analysis and Applications. *Computer Optics*. 2019. Vol. 43. No. 2. P. 245–250. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-245-250>
9. Asatryan D.G. Image Blur Estimation Using Gradient Field Analysis. *Computer Optics*. 2017. Vol. 41. No. 6. P. 957–962. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-6-957-962>
10. Geusebroek J.-M. The Stochastic Structure of Images. In: Kimmel R., Sochen N.A., Weickert J. (eds). *Scale Space and PDE Methods in Computer Vision. Scale-Space 2005. Lecture Notes in Computer Science*. 2005. Vol. 3459. P. 327–338. https://doi.org/10.1007/11408031_28
11. Yanulevskaya V., Geusebroek J.-M. Significance of the Weibull Distribution and its Sub-models in Natural Image Statistics. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer*

- Vision Theory and Applications (Lisboa, Portugal). 2009. Vol. 1. P. 355–362.
<https://doi.org/10.5220/0001793203550362>
12. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
 13. Jain A.K., Chen Y., Demirkus M. Pores and Ridges: High-Resolution Fingerprint Matching Using Level 3 Features / 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). (Hong Kong, China, August 20–24, 2006) / IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2007. Vol. 29. No. 1. P. 15–27.
<https://doi.org/10.1109/icpr.2006.938>
 14. Maltoni D., Maio D., Jain A., Prabhakar S. Handbook of Fingerprint Recognition. New York: Springer, 2003. 494 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-84882-254-2>
 15. Asatryan D., Sazhumyan G., Sakanyan B. New Technique for Analysis of Fingerprint Poroscopic Map / Proceedings of 9th International Conference on Computer Science and Information Technologies – CSIT'2013. Yerevan: IAP, 2013. P. 181–184.
 16. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9. No. 1. P. 62–66.
<https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310076>
- Vision Theory and Applications (Lisboa, Portugal). 2009. Vol. 1. P. 355–362.
<https://doi.org/10.5220/0001793203550362>*
12. Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. 3rd ed. Moscow: Tekhnosfera, 2012. 1104 p. (In Russ.)
 13. Jain A.K., Chen Y., Demirkus M. Pores and Ridges: High-Resolution Fingerprint Matching Using Level 3 Features. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). (Hong Kong, China, August 20–24, 2006). IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2007. Vol. 29. No. 1. P. 15–27.
<https://doi.org/10.1109/icpr.2006.938>
 14. Maltoni D., Maio D., Jain A., Prabhakar S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York: Springer, 2003. 494 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-84882-254-2>
 15. Asatryan D., Sazhumyan G., Sakanyan B. New Technique for Analysis of Fingerprint Poroscopic Map. *Proceedings of 9th International Conference on Computer Science and Information Technologies – CSIT'2013*. Yerevan: IAP, 2013. P. 181–184.
 16. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. 9. No. 1. P. 62–66.
<https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310076>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Асатрян Давид Гегамович – д. т. н., ведущий научный сотрудник Института проблем информатики и автоматизации Национальной Академии Наук Армении, руководитель научно-исследовательского центра критических технологий Российско-Армянского университета;
 e-mail: dasat@ipia.sci.am

Статья поступила: 10.08.2020

После доработки: 20.10.2020

Принята к печати: 15.11.2020

ABOUT THE AUTHOR

Asatryan David Geghamovich – Doctor of Engineering, Leading Scientist of the Institute for Informatics and Automation Problems of National Academy of Sciences of Armenia, Head of the Research Center for Critical Technologies of Russian-Armenian University;
 e-mail: dasat@ipia.sci.am

Received: August 10, 2020

Revised: October 20, 2020

Accepted: November 15, 2020