

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ ПОТОКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ

© 2019 А.В. Агафонов¹, Д.С. Рожина¹, Х.И. Ваххаб^{1,2}, А.Н. Аль Анссари^{1,3}

¹Южно-Уральский государственный университет
(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76),

²Кербельский университет (56001, а/я 1125, Республика Ирак, Кербела),

³Куфинский университет (54003, а/я 21, Республика Ирак, Наджаф)

E-mail: asp17aav494@susu.ru, asp17rds604@susu.ru, haider.wahhab@uokerbala.edu.iq,
alaan.azeez@uokufa.edu.iq

Поступила в редакцию: 19.08.2019

Поле потоков отпечатков пальцев является одной из наиболее важных характеристик узора и оказывает большое влияние на всю процедуру дактилоскопической идентификации. Методы для построения поля потоков, основанные на градиенте, весьма популярны, однако, слишком чувствительны к различным шумам и дефектам, которые тем или иным образом проявляются на многих изображениях отпечатков. В данной статье предлагается новый метод построения поля потоков для цифровых изображений отпечатков пальцев. Он позволяет улучшить решение ряда ключевых задач обработки изображений. Среди таких задач прогноз направлений линий в области складок кожи, шрамов и других дефектов поверхности пальца. Метод опирается на такие подходы, как обработка изображения на субпиксельном уровне, на кластерный анализ поля градиентов изображения и заключаются в последовательном применении нескольких алгоритмов. Это интерполяция изображения и оценка значений градиента на нем, свертка поля градиента с заданным шаблоном для борьбы с шумами на субпиксельном уровне, выделение опорных областей на основе построения локальных оценок качества узора, прогнозирование поля направлений от опорных областей на все изображение с адаптацией прогнозируемых значений под результаты измерений. Верификация результатов работы предлагаемого метода выполнена с помощью веб-фреймворка, созданного на базе Болонского университета в Италии. Новые результаты верификации сравниваются с результатами верификации предшествующего метода, развитого в данной статье, и с другими опубликованными алгоритмами на том же веб-фреймворке.

Ключевые слова: биометрическая идентификация, поле потоков, распознавание образов, отпечатки пальцев, верификация.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Агафонов А.В., Рожина Д.С., Ваххаб Х.И., Аль Анссари А.Н. Помехоустойчивый алгоритм построения поля потоков изображений отпечатков пальцев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2019. Т. 8, № 4. С. 43–55. DOI: 10.14529/cmse190404.

Введение

Широкое распространение автоматизированных систем идентификации по отпечаткам пальцев свидетельствует о высокой надежности их функционирования и рентабельности. Под рентабельностью понимается более выгодное использование таких систем, по сравнению с ручной работой специалиста. Для надежной работы этих систем необходимо решать ключевые задачи идентификации. Одна из таких задач — построение поля потоков. В настоящее время не известен алгоритм, безошибочно восстанавливающий изображение, свободное от дефектов и шумов, поэтому данное направление исследований является актуальным.

В реальных условиях изображения отпечатков пальцев обычно содержат шумы и другие дефекты. Они затрудняют работу алгоритмов распознавания и повышают общую ошибку идентификации.

В данной статье предложен метод, способный значительно снизить влияние различных дефектов на результат построения поля потоков. С этой целью был разработан и программно реализован алгоритм построения поля потоков и выполнено его тестирование фреймворком, предложенным на сайте FVC Ongoing. Результаты тестирования демонстрируют тринадцатипроцентное снижение ошибки идентификации на наборе изображений плохого качества по сравнению с другим опубликованным алгоритмом.

В данной статье раздел 1 посвящен обзору подходов к построению поля потоков в других работах. Раздел 2 посвящен формальной постановке проблемы построения алгоритма измерения, анализа и синтеза поля потоков. В разделе 3 описана реализация предложенного алгоритма. Раздел 4 содержит анализ результатов разработанного алгоритма. В заключении дана сводка результатов, полученных в работе, и определены направления дальнейших исследований.

1. Предшествующие работы

Поставленная задача широко исследуется авторами из разных стран. Рассмотрим существующие известные методы, подходы и алгоритмы, опубликованные в других работах.

Публикация [1] предлагает улучшенный метод построения поля потоков на основе квадратурных градиентов и шкалы качества. Для борьбы с шумами направление линий узора корректируется при помощи дискретных ортогональных многочленов. В качестве критерия оценки качества используется когерентность. Однако одной когерентности недостаточно, так как она не позволяет отличить жировой след отпечатка пальца от прикосновения кожи к поверхности сенсора.

Статья [2] посвящена применению фильтра Габора к дактилоскопическим изображениям. В нем одним из входных параметров для процедуры фильтрации является информация о поле потоков, подсчитанная на основе метода квадратурных градиентов. Предложенный в статье алгоритм опирается лишь на фильтрацию изображения, чего может быть недостаточно для построения информативного поля потоков для изображений плохого качества.

Работа [3] направлена на улучшение алгоритма построения поля потоков. В ней предлагается усовершенствованный метод квадратурных градиентов на основе минимальной дисперсии. Главная идея метода заключается в том, чтобы найти минимальную дисперсию между четырьмя направлениями квадратурных градиентов. В центральный блок помещается среднее значение, для которого дисперсия достигает минимального значения. Недостатком метода является анализ малого количества заранее заданных направлений с большим шагом, что негативно сказывается на точности вычислений.

Публикация [4] предлагает улучшенный алгоритм построения поля потоков на основе метода градиентов для работы с зашумленными изображениями. Основная идея метода заключается в разбивке изображения на блоки и подсчете для каждого блока величин градиента и когерентности — показателей качества. Значение в целевом блоке рассчитывается как средневзвешенное между его соседними блоками с учетом когерентности. К недостаткам данной работы можно отнести то, что качество области определя-

ется лишь на основе когерентности, а само качество используется только для оценки степени влияния локальных областей на результат. Таким образом, этот метод является, по сути, усовершенствованным сглаживанием.

Интересный подход к построению поля потоков предложен в статье [5]. В описанном методе поле потоков строится на основе сочетания глобальной ориентационной модели и локального подхода к определению направления линий узора. Как недостаток можно отметить то, что фрагменты узоров, которые часто отпечатываются при прикосновении пальцев к поверхности сенсора, плохо вписываются в глобальную модель узора.

В работе [6] предложено решение для построения поля потоков в несколько этапов. На первом этапе происходит нормализация яркостей изображения, на втором этапе — улучшение четкости линий узора на основе подсчета колебаний яркости в восьми направлениях, на третьем — собственно построение поля потоков модифицированным методом наименьших средних квадратов. В качестве недостатка здесь можно отметить наличие восьми фиксированных направлений линий узора, что оказывает негативное влияние на точность работы алгоритма.

Статья [7] предлагает многоэтапный подход к улучшению качества дактилоскопических изображений, включающий построение поля потоков. Первый этап использует оператор Собеля для начального определения направления линий узора. Лучшая оценка дается при помощи индексов Пуанкаре с использованием информации об особых точках. После этого поле потоков уточняется с применением полиномов Лежандра. Подход является любопытным, однако для реализации его основной части требуется информация об особых точках узора, поиск которых является отдельной, нетривиальной задачей и выходит за границы текущей работы. Кроме того, начальное направление линий подсчитывается простым оператором Собеля и не раскрыта тема качества областей узора.

В работе [8] для анализа поля потоков применяют градиентный метод с двумя последовательными процедурами сглаживания — по окрестности и вдоль направления линий узора. Однако работа алгоритма выполняется без учета качественных характеристик локальной области узора. Из-за этого метод успешно работает на изображениях хорошего качества, но на зашумленных изображениях велика ошибка распознавания.

Алгоритм, предлагаемый в данной статье, позволяет устранить подобные недостатки, реализуя многоэтапное улучшение построения поля потоков. Основными этапами являются: оценка производной в точке с применением интерполяции и разностных производных; применение метода квадратурных градиентов со сглаживанием; выделение опорной области внутри области интереса на основе оценки качества фрагментов узора; расширение опорной области до всей области интереса. Такие изменения алгоритма позволяют улучшить результаты распознавания направлений линий.

2. Постановка задачи

Поле потоков — это матрица, элементы которой представляют собой значения направлений линий узора, усредненные для каждого сегмента. Такая матрица обычно визуализируется как сегментированное изображение, состоящее из неперекрывающихся областей, в каждой из которых отображается усредненное направление.

Большинство существующих алгоритмов дактилоскопической идентификации используют построение поля потоков как один из ключевых этапов, который оказывает влияние на последующие этапы обработки изображения, так как является для них

входной информацией. Кроме того, качественное построение поля потоков улучшает детектирование истинных контрольных точек (разветвлений и окончаний линий), что непременно уменьшает ошибки идентификации.

Обычно методы определения поля потоков основаны на методе градиента. К недостаткам этого метода можно отнести чувствительность к шумам и к крутым изгибам линий узора. Но хорошее описание в опубликованных трудах и относительно простая идея обеспечивают его популярность. Различные авторы предлагают богатый набор методов для преодоления указанных недостатков.

Для верификации полезности нового алгоритма авторами было выполнено его сравнение с предыдущим алгоритмом, описанным в статье [8], с использованием инструментов, предоставляемых на ресурсе FVC Ongoing [9]. На нем выполняется верификация результатов работы алгоритма на закрытой базе изображений и вычисляется ряд показателей, которые можно использовать для оценки качественного развития алгоритма.

Кроме того, там же опубликованы и доступны для анализа и сравнения результаты верификации других алгоритмов. Всего на сайте оценено свыше 6000 алгоритмов. Изображения, показанные на рис. 1 и рис. 2, доступны в открытой базе на сайте. База разделена экспертами FVC на изображения хорошего и плохого качества.



Рис. 1. Примеры изображений хорошего качества из открытой базы FVC



Рис. 2. Примеры изображений плохого качества из открытой базы FVC

Требуется предложить такое решение задачи построения поля потоков, которое позволило бы повысить ранг показателей качества поля потоков в таблице опубликованных алгоритмов сайта FVC Ongoing.

3. Описание алгоритма

3.1. Интерполяция и измерение градиента

Градиент — вектор, показывающий направление наискорейшего подъема двумерной функции яркости изображения. Градиент изображения в точке (x, y) — это вектор:

$$\nabla f = (G_x, G_y) = \left(\frac{df}{dx}, \frac{df}{dy} \right), \quad (1)$$

где $\frac{df}{dx}$ и $\frac{df}{dy}$ — скорость изменения яркости соседних пикселей по осям X и Y.

Направление вектора градиента в точке (x, y) совпадает с направлением наибольшего роста функции, а модуль равен значению этого приращения. Вектор градиента, как и любой другой вектор, имеет две основные характеристики: модуль и направление. Модуль вектора находят в виде [10]:

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (2)$$

а направление — угол $\alpha(x, y)$ между направлением ∇f в точке (x, y) и осью абсцисс:

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (3)$$

Направление линий узора в окрестности точки (x, y) , очевидно, перпендикулярно направлению вектора градиента в этой точке, а вычислить градиент изображения можно, вычислив величины частных производных $\frac{\partial f}{\partial x}$ и $\frac{\partial f}{\partial y}$ в каждой точке.

Из-за дискретности изображения его производная не определена, поэтому находят ее приближенные значения, например, оператором Собеля [11]. В работе предложен собственный метод оценки значений производных на основе интерполяции.

В нем исходное изображение с разрешением 500 dpi приводится к 1000 dpi с помощью билинейной интерполяции [10]. После чего на нем применяется метод разностной оценки производной (4) на сегментах 2×2 и сворачивание к исходному разрешению:

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h}. \quad (4)$$

3.2. Градиент в окрестности

Для повышения точности построения поля потоков градиент усредняют в некоторой окрестности. Однако простого усреднения направлений векторов будет недостаточно, так как противоположные по направлению векторы на разных сторонах одной линии взаимно компенсируются, хотя и соответствуют одним и тем же линиям узора.

Обозначим через S окрестность точки (x, y) размером $I * J$. Значения модуля и аргумента градиента в окрестности находят в виде [12]:

$$X(x, y) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |\nabla f(i, j)| \cdot \cos(2\alpha(i, j)), \quad (5)$$

$$Y(x, y) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |\nabla f(i, j)| \cdot \sin(2\alpha(i, j)), \quad (6)$$

$$|\nabla F|(x, y) = \sqrt{X \cdot X + Y \cdot Y}, \quad (7)$$

$$A(x, y) = \text{Atan}\left(\frac{Y}{X}\right)/2. \quad (8)$$

Следует обратить внимание, что в формулах 5 и 6 используется удвоенный угол. Это сделано для того, чтобы векторы градиента на противоположных сторонах линии узора не компенсировали друг друга, так как они относятся к краям одной и той же линии. Фактически, это удвоение полуплоскости $[0, \pi)$ до плоскости $[0, 2\pi)$. В формуле (8) присутствует деление на два, чтобы восстановить аргумент градиента.

3.3. Выделение опорной области

Для выделения опорной области выполняется оценка качества поля потоков, которая строится на основе когерентности и модуля градиента.

В окрестности S мощностью N с центром в точке (x, y) на основе формул (5)–(8) рассчитывают когерентность [13]:

$$Coh(x, y) = \frac{|\sum_{n=1}^N \nabla f_n|}{\sum_{n=1}^N |\nabla f_n|} \quad (9)$$

и среднее значение модуля градиента:

$$\overline{|\nabla F|}(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^N |\nabla F(x, y)|_n}{N}. \quad (10)$$

Когерентность является отношением модуля суммы векторов в окрестности к сумме модулей и не может превышать единицы. Чем ближе значение когерентности к единице, тем качественнее окрестность точки (x, y) . Тогда качество окрестности в точке (x, y) можно оценить по формуле

$$R(x, y) = |\nabla F(x, y)| * \sin(Coh(x, y) * 90^\circ). \quad (11)$$

В работе для выделения опорной области отбирают верхний квартиль качества по гистограмме качества окрестностей.

3.4. Расширение опорной области

Расширение опорной области происходит в два этапа. На первом этапе элементы, примыкающие к опорной области, включаются в нее, если их направление отличается от среднего направления смежных элементов из опорной области не более, чем на заданное значение δ . Первый этап итерационно повторяется пока существуют такие элементы. На втором этапе элементы, примыкающие к опорной области, принимают значение, которое является усредненным среди соседей уже включенных в опорную область.

Для примера если рассматриваемый элемент примыкает к границе опорной области, то среднее значение его соседних элементов, входящих в опорную область, рассчитывают по формулам:

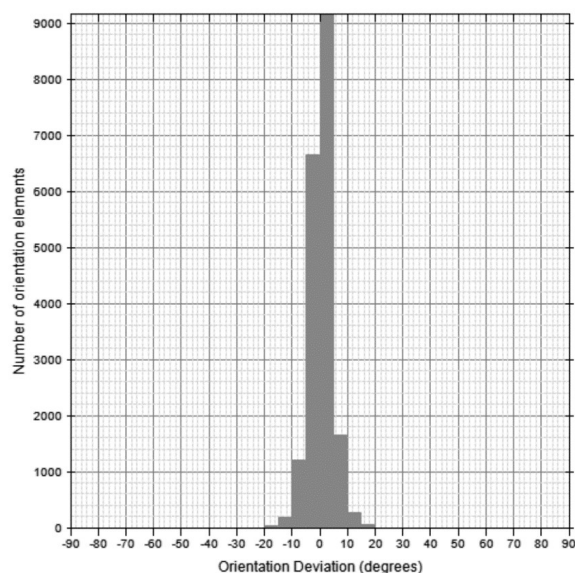
$$X(x, y) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \cos(2\alpha(i, j)) * t(i, j), \quad (12)$$

$$Y(x, y) = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \sin(2\alpha(i, j)) * t(i, j), \quad (13)$$

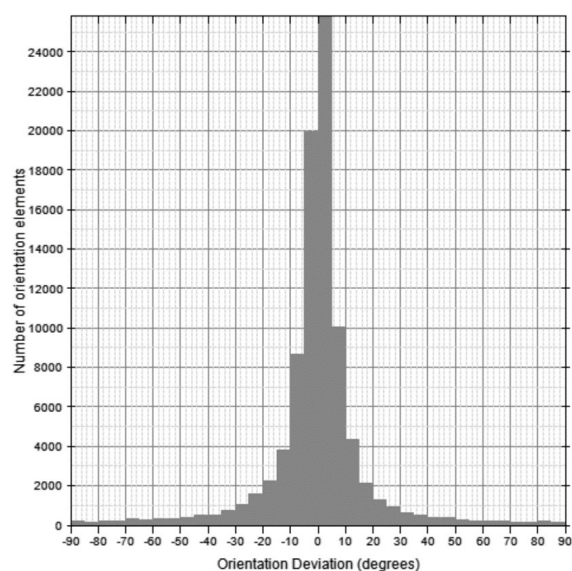
где функция $t(i, j)$ принимает значение 1, если элемент входит в опорную область и 0 в противном случае. Собственно, среднее направление находится по формуле 8.

4. Анализ результатов

Программа с реализацией предлагаемого метода протестирована на сайте FVC Ongoing и результат доступен для сравнения с другими участниками [9]. Сами результаты приведены в 12 строке таблицы и на рис. 3, рис. 4. Также таблица 12 отражает сравнение с другими участниками по параметрам СКО на хорошем и плохом наборе изображений. Разделение изображений по качеству проведено экспертами FVC.

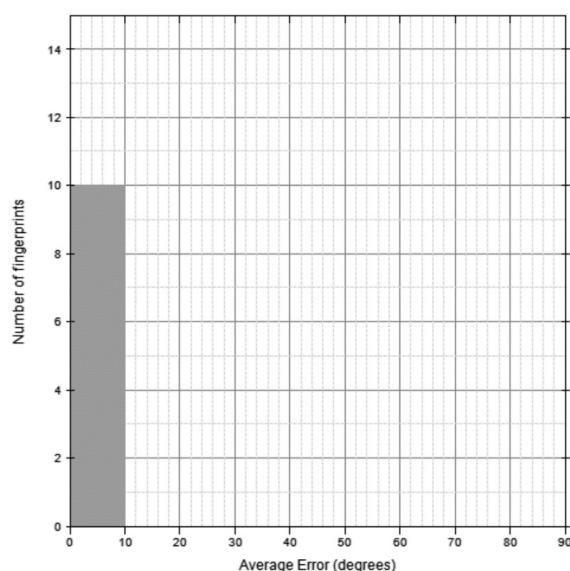


а) набор изображений хорошего качества

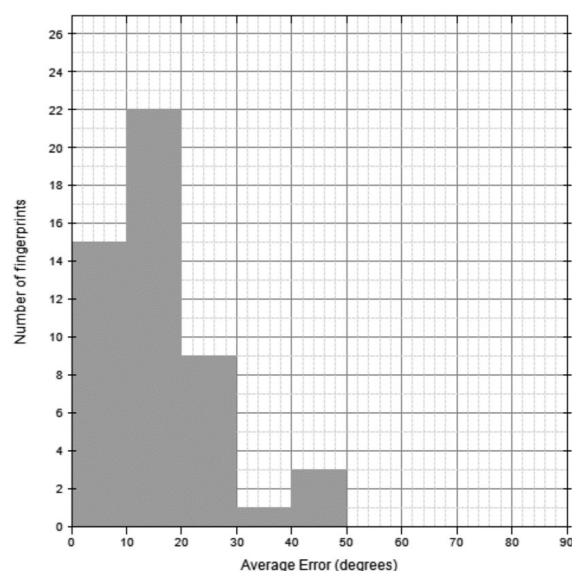


б) набор изображений плохого качества

Рис. 3. Гистограммы распределения отклонений ориентации для наборов изображений



а) набор изображений хорошего качества



б) набор изображений плохого качества

Рис. 4. Гистограммы распределения СКО для наборов изображений

В одиннадцатой строке таблицы приведены результаты тестирования предыдущей версии алгоритма. Сравнительный анализ показывает, что ошибка распознавания на плохом наборе изображений уменьшилась на 13 %. Кроме того, время работы алгоритма снизилось на 46 % (с 4324 мс до 2342 мс).

Сравнение опубликованных алгоритмов

№	Участник тестирования	Название алгоритма	СКО EG	СКО EB
1	Dermalog Identification Systems GmbH	DEX-OF	4,89°	7,52°
2	Dept. of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University	OriNet	6,94°	8,44°
3	Dermalog Identification Systems GmbH	ConvNetOF	5,80°	8,53°
4	Department of Automation, Tsinghua University	LocalDict	6,08°	9,66°
5	Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences	ROF	5,24°	11,20°
6	Antheus Technology, Inc.	AntheusOriEx	5,46°	17,06°
7	Zengbo Xu	MXR	5,59°	11,36°
8	Biometric System Laboratory	Adaptive-3 (Baseline)	5,93°	13,27°
9	School of Engineering and Information Technology, UNSW@ADFA	FOMFE	6,70°	21,44°
10	Biometric System Laboratory	Gradient (baseline)	5,86°	21,83°
11	Предыдущая версия алгоритма	AVG+	5,10°	17,90°
12	Алгоритм из данной работы	DPA	5,03°	15,58°

На основе ресурса FVC Ongoing можно проанализировать влияние модификаций и нововведений алгоритма на снижение ошибки распознавания на примерах набора изображений плохого качества, показанных на рис. 5.



Рис. 5. Примеры изображений для демонстрации работы алгоритма

На рис. 6–9 показаны результаты построения поля потоков для нового и предшествующего алгоритмов для одних и тех же изображений. На них под литерой *а* показано построение поля потоков для дактилоскопического узора, а под литерой *б* демонстрируется сравнение с модельным полем потоков, составленным экспертами FVC, в цветовой интерпретации. Чем светлее области, тем больше ошибка оценки поля потоков алгоритма.

Изображения на рис. 6–9 наглядно демонстрируют преимущество построения поля потоков нового алгоритма в области шумов и дефектов кожи, которое достигается за счет предсказания направлений линий на основе опорной области.



а) поле направлений



б) сравнение с модельным полем

Рис. 6. Результаты работы предшествующего алгоритма



а) поле направлений



б) сравнение с модельным полем

Рис. 7. Результаты работы нового алгоритма



а) поле направлений

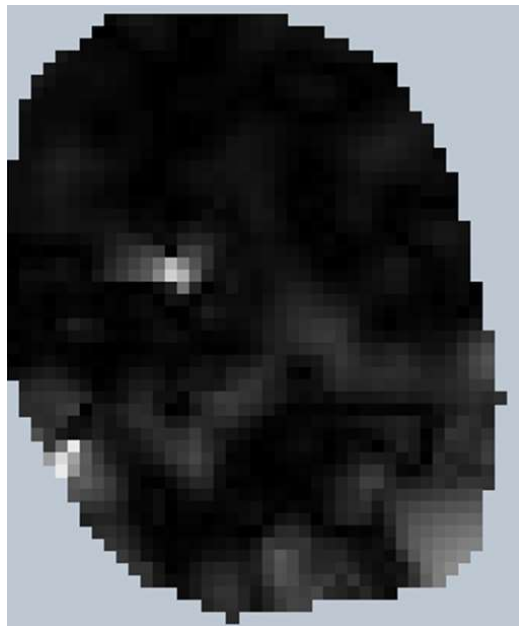


б) сравнение с модельным полем

Рис. 8. Результаты работы предшествующего алгоритма



а) поле направлений



б) сравнение с модельным полем

Рис. 9. Результаты работы нового алгоритма

Заключение

В ходе исследования разработана улучшенная версия алгоритма построения поля потоков для изображений отпечатков пальцев.

Предложенный метод позволяет значительно повысить качество построения поля потоков. Продемонстрирована работа метода на независимых международных тестах FVC Ongoing. Показано улучшение ранговых оценок среди других участников тестов. По результатам теста удалось подняться с восьмого места на седьмое по набору изображений плохого качества.

Анализ и сравнение результатов тестирования показывают, что предложенные идеи привели к значительному повышению качества построения поля потоков по сравнению с

предыдущим алгоритмом. Это способствует снижению ошибки идентификации отпечатков пальцев.

Кроме того, удалось преодолеть недостатки некоторых из ранее опубликованных работ [2, 4, 7], обзор которых представлен в разделе 1.

Дальнейшее направление исследований видится в применении подходов и методов машинного обучения для построения поля потоков.

Литература

1. Weixin B., Shifei D., Yu X. An Improved Fingerprint Orientation Field Extraction Method Based on Quality Grading Scheme. // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. 2018. Vol. 9, no. 8. P. 1249–1260. DOI: 10.1007/s13042-016-0627-7.
2. Гудков В.Ю., Бойцов А.В. Улучшение изображений отпечатков пальцев с помощью фильтра Габора // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т. 15, № 1. С. 128–132.
3. Saparudin M., Ghazali S. A Technique to Improve Ridge Flows of Fingerprint Orientation Fields Estimation // Telkonomika. 2016. Vol. 14. P. 987–998. DOI: 10.12928/telkomnika.v14i2.3112.
4. Wang Y., Jiankun H., Heiko S. A Gradient Based Weighted Averaging Method for Estimation of Fingerprint Orientation Fields // Digital Image Computing: Techniques and Applications. 2005. DOI: 10.1109/DICTA.2005.4.
5. Carsten G., Benjamin T., Stephan H. Perfect Fingerprint Orientation Fields by Locally Adaptive Global Models // IET Biometrics. 2017. Vol. 6, no. 3. P. 183–190. DOI: 10.1049/iet-bmt.2016.0087.
6. Wieclaw L. Fingerprint Orientation Field Enhancement // Computer Recognition Systems 4. 2011. Vol. 95. P. 33–40. DOI: 10.1007/978-3-642-20320-6_4.
7. Khachay M., Pasyukov M. Theoretical approach to developing efficient algorithms of fingerprint enhancement // Analysis of Images, Social Networks and Texts. Communications in Computer and Information Science (CCIS), Springer. 2015. Vol. 542. P. 83–95. DOI: 10.1007/978-3-319-26123-2_8.
8. Агафонов А.В., Рожина Д.С. Верификация алгоритма построения поля потоков цифровых изображений отпечатков пальцев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 67–82. DOI: 10.14529/cmse180405.
9. Biometric System Laboratory. FVC-onGoing: on-line evaluation of fingerprint recognition algorithms. URL: <https://biolab.csr.unibo.it/FvcOnGoing/UI/Form/Home.aspx> (дата обращения: 20.03.2019).
10. Gonzalez. R., Woods E. Digital Image Processing. Prentice Hall, 2001. 794 p.
11. Jane B. Digital Image Processing: Concepts, Algorithms and Scientific applications. Springer Verlag, 2005. 589 p.
12. Maltoni D., Maio D., Jain A.K. Handbook of Fingerprint Recognition. New York: Springer-Verlag, 2003. 348 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-254-2.
13. Bazen A. Fingerprint Identification: Feature Extraction, Matching, and Database Search. The Netherlands: Univ. of Twente, 2002. 187 p.

Агафонов Андрей Валерьевич, аспирант, кафедра электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Рожина Дарья Сергеевна, аспирант, кафедра электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Ваххаб Хадер Ибас АбдулВаххаб, аспирант, кафедра электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Аль Анссари Алаа Неамах, аспирант, кафедра электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

DOI: 10.14529/cmse190404

ROBUST FINGERPRINT FLOW CHART ALGORITHM

© 2019 A.V. Agafonov¹, D.S. Rozhina¹, H.I. Wahhab^{1,2}, A.N. Alanssari^{1,3}

¹*South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia),*

²*University of Karbala (P.O. Box 1125, Karbala, 56001 Iraq),*

³*University of Kufa (P.O. Box 21, Al-Najaf, Kufa, 54003 Iraq)*

E-mail: asp17aav494@susu.ru, asp17rds604@susu.ru, haider.wahhab@uokerbala.edu.iq, alaan.azeez@uokufa.edu.iq

Received: 19.08.2019

The orientation field is an important characteristic of human skin patterns and has a significant impact on the results of fingerprint identification. The methods of constructing the orientation field based on the gradient are diverse, but they are united by a high sensitivity to noise and defects that appear on the images during the formation of tracks. The article proposes a new method for constructing a stream field for digital images of fingerprints. The method allows to improve the solution of a number of key tasks of image processing, including the task of predicting the direction of lines in the area of skin folds, scars and other finger surface defects. The method relies on such approaches as image processing at the subpixel level, on cluster analysis of the field of image gradients and consists in the sequential application of several algorithms. These are image interpolation and estimation of gradient values on it, convolution of the gradient field with a given pattern for noise control at the subpixel level, selection of reference areas based on the construction of local quality estimates of the pattern, prediction of the direction field from reference areas over the entire image with the adaptation of the predicted values for the measurement results. The results of the proposed method were verified using the web framework created on the basis of the University of Bologna in Italy. The new verification results are compared with the verification results of the earlier method developed by the authors, and with other published algorithms on the same web framework.

Keywords: biometrical identification, fingerprint orientation field, pattern recognition, fingerprints, verification.

FOR CITATION

Agafonov A.V., Rozhina D.S., Wahhab H.I., Alanssari A.N. Robust Fingerprint Flow Chart Algorithm. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2019. vol. 8, no. 4. pp. 43–55. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse190404.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Weixin B., Shifei D., Yu X. An Improved Fingerprint Orientation Field Extraction Method Based on Quality Grading Scheme. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2018. vol. 9, no. 8. pp. 1249–1260. DOI: 10.1007/s13042-016-0627-7.
2. Gudkov V.Ju., Bojcov A.V. Enhancement of Fingerprint Images with the Gabor Filter. *Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software*. 2015. vol. 15, no. 1. pp. 128–132. (in Russian)
3. Saparudin M., Ghazali S. A Technique to Improve Ridge Flows of Fingerprint Orientation Fields Estimation. *Telkonomika*. 2016. vol. 14, no. 3. pp. 987–998. DOI: 10.12928/telkomnika.v14i2.3112.
4. Yi W., Jiankun H., Heiko S. A Gradient Based Weighted Averaging Method for Estimation of Fingerprint Orientation Fields. *Digital Image Computing: Techniques and Applications*. 2005. DOI: 10.1109/DICTA.2005.4.
5. Carsten G., Benjamin T., Stephan H. Perfect Fingerprint Orientation Fields by Locally Adaptive Global Models. *IET Biometrics*. 2017. vol. 6, no. 3. pp. 183–190. DOI: 10.1049/iet-bmt.2016.0087.
6. Wieclaw L. Fingerprint Orientation Field Enhancement. *Computer Recognition Systems 4*. 2011. vol. 95. pp. 33–40. DOI: 10.1007/978-3-642-20320-6_4.
7. Khachay M., Pasyukov M. Theoretical approach to developing efficient algorithms of fingerprint enhancement. *Analysis of Images, Social Networks and Texts. Communications in Computer and Information Science (CCIS)*, Springer. 2015. vol. 542. pp. 83–95. DOI: 10.1007/978-3-319-26123-2_8.
8. Agafonov A.V., Rozhina D.S. Verification of the Algorithm for Estimating the Flow Chart of Fingerprint Images. *Bulletin of South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Computer Science*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 67–82. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180405.
9. Biometric System Laboratory. FVC-Ongoing: On-line Evaluation of Fingerprint Recognition Algorithms. Available at: <https://biolab.csr.unibo.it/FvcOnGoing/UI/Form/Home.aspx> (accessed 20.03.2019).
10. Gonzalez R., Woods E. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2001. 794 p.
11. Jane B. *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms and Scientific Applications*. Springer Verlag, 2005. 589 p.
12. Maltoni D., Maio D., Jain A.K. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York, Springer-Verlag, 2003. 348 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-254-2.
13. Bazen A. *Fingerprint Identification: Feature Extraction, Matching, and Database Search*. The Netherlands: Univ. of Twente, 2002. 187 p.