

## ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ ПОТОКОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ

© 2018 А.В. Агафонов, Д.С. Рожина

*Южно-Уральский государственный университет*

*(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)*

*E-mail: asp17aav494@susu.ru, asp17rds604@susu.ru*

Поступила в редакцию: 08.04.2018

Построение полей потоков для цифровых изображений дактилоскопических узоров является важным шагом в процедурах идентификации и сравнения по отпечаткам пальцев. В частности, результаты построения поля потоков существенно влияют на фильтрацию таких признаков изображений, как минуции, петли, дельты и завитки. Кроме того, улучшение качества построения поля потоков может значительно снизить общую ошибку идентификации. В данной статье представлено описание разработанного алгоритма построения поля потоков цифровых изображений отпечатков пальцев. Предложенный алгоритм основан на улучшенном методе градиентов. Этот метод применяется в два прохода с различными размерами апертур и двумя видами сглаживания: общим и вдоль направления линий узора. Произведена оценка качества данного алгоритма с помощью веб-фреймворка, созданного на базе Болонского университета в Италии. Этот фреймворк организован с целью автоматической, удаленной оценки результатов работы различных режимов распознавания отпечатков пальцев, в том числе и распознавание поля потоков. Выполнены требования, предъявляемые данным фреймворком к структуре программы, входным и выходным данным. Рассмотрены и проанализированы результаты оценки работы алгоритма выбранным фреймворком. Выполнено сравнение оценки результатов алгоритма с исходным методом градиентов, а также с опубликованными в открытом доступе результатами других участников тестирования.

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

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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.

### Введение

Известно, что отпечатки пальцев уникальны у каждого человека и остаются неизменными на протяжении всей жизни [1, 2]. Такие свойства позволяют отпечаткам быть надежным средством для идентификации личности. Сегодня автоматизированные системы идентификации по отпечаткам пальцев широко применяются в криминалистике, различных системах доступа и даже мобильных устройствах. Хотя опубликовано множество патентов и статей, эта тематика продолжает активно развиваться [2–9].

Изображения отпечатков считывают с сенсорных панелей различных датчиков и качество полученного изображения зависит от различных условий. Это и состояние кожи, и наличие шрамов или складок, и загрязненность кожи или датчика, а также влажность и пыль. Эти эффекты значительно влияют на надежность распознавания признаков узора

и, как следствие, на ошибку идентификации [10, 11]. В настоящее время не известен алгоритм, безошибочно восстанавливающий изображение, свободное от дефектов и шумов, поэтому данное направление исследований является актуальным.

В статье обсуждается верификация промежуточных результатов обработки изображений отпечатков пальцев, а именно верификация построения поля потоков. С этой целью был разработан и реализован алгоритм построения поля потоков и выполнено его тестирование фреймворком, предложенным на сайте FVC Ongoing [12]. Результаты тестирования показывают, что предлагаемый алгоритм демонстрирует конкурентоспособные результаты на выборке изображений, используемой на этом сайте.

В данной статье раздел 1 посвящен обзору подходов к построению поля потоков и верификации результатов в других работах. Раздел 2 посвящен формальной постановке проблемы верификации результатов построения поля потоков. В разделе 3 описаны требования к программе, содержащей алгоритм построения поля потоков, а также реализация самого алгоритма. В разделе 4 обсуждается влияние на результат и целесообразность новых решений, внедренных в предложенный алгоритм. Раздел 5 содержит анализ результатов разработанного алгоритма. Направление дальнейших исследований определено в заключении.

## 1. Предшествующие работы

Данная статья посвящена верификации разработанного алгоритма для построения поля потоков дактилоскопических изображений, поэтому будет уместно рассмотреть другие работы, целиком посвященные построению поля потоков и те в которых оно играет ключевую роль, а также подходы к верификации результатов.

Статья [3] посвящена применению фильтра Габора к дактилоскопическим изображениям. В ней одним из входных параметров для процедуры фильтрации является информация о поле потоков, подсчитанная на основе метода градиентов, усредненных в области. Усреднение производится методом квадратурных градиентов. Что касается верификации результатов, то она в данной работе не формализована. Это свидетельствует о том, что не все разработчики уделяют внимание проблеме верификации.

Работа [4] целиком посвящена улучшению алгоритма построения поля потоков. Метод, предложенный здесь также основан на методе градиентов. Авторы работы отмечают, что отсутствие модельной базы данных для верификации построения поля потоков представляет серьезную проблему. Поэтому, подход к верификации результатов заключается в тестировании алгоритма на подготовленной базе изображений, а верификация производится вручную специалистами. Такой подход имеет недостатки, так как точность оценки человеком ограничена, кроме того, отсутствует объективность и повторяемость результатов.

Публикация [5] предлагает улучшенный алгоритм построения поля потоков на основе метода градиентов. Здесь авторы также отмечают отсутствие модельного поля потоков. Для верификации используется общедоступная база изображений NIST. Но выводы о превосходстве разработанного алгоритма с предыдущими производятся лишь визуально. Данный способ недостаточно объективен и не позволяет численно измерить превосходство одного алгоритма над другим.

Еще один подход к построению поля потоков и верификации результатов предложен в статье [6]. Здесь поле потоков определяется на основе сочетания глобальной ориентационной модели и локального подхода к определению направления линий узора. Верификация результатов в работе происходит с использованием базы изображений и информации о модельном поле потоков, подготовленными другими специалистами. Такой способ уже более объективен и позволяет оценивать изменения в работе алгоритма со временем, однако это модельное поле потоков не находится в общем доступе и не может быть использовано для верификации результатов другими разработчиками.

В заключении рассмотрим работу [7]. Здесь предложено решение для построения поля потоков в несколько этапов. В первом этапе проходит нормализация изображения, во втором улучшение четкости линий узора, а в третьем непосредственно построение поля потоков модифицированным методом наименьших средних квадратов. Верификация результатов построения поля потоков проводилась с использованием наборов изображений из открытых баз данных и полученных со сканера. Модельное поле потоков было определено экспертами–криминалистами. Такой подход так же, как и в предыдущем случае не может быть использован другими разработчиками для точного сравнения результатов работы алгоритма из-за отсутствия в открытом доступе такой же базы изображений и модельного поля потоков.

Алгоритм, предложенный в данной статье основан на усреднении градиента в области, однако подход к усреднению модифицирован, и оно выполняется в несколько проходов со сглаживанием вдоль направления линий узора, а главное, что предложен иной подход к верификации результатов, позволяющий упростить, придать объективность верификации, позволяющий проследивать тенденции в долгосрочной перспективе и сравнивать результаты верификации своих алгоритмов разным разработчикам.

## 2. Постановка задачи

Изображения отпечатков пальцев редко бывают хорошего качества. На них часто встречаются дефекты, отпечатывающиеся с кожи пальца, шумы, появляющиеся в процессе слепообразования, эластичные растяжения поверхности пальца. Эти эффекты влияют на всех участников тестирования в равной степени. Поэтому интересно сравнение результатов работы различных алгоритмов и сравнение разных версий одного и того же алгоритма. В целом, тестирование выполняют сравнением результатов обработки изображений с моделями для этих изображений, построенных в полуавтоматическом режиме обработки их экспертами. Обработка является частью сложной, многоэтапной процедуры идентификации изображений (рис. 1).

Каждый из этапов обработки может быть отдельной задачей с возможной необходимостью контроля результатов. Такой контроль является нетривиальной задачей и требует много ручной работы. Например, составление специальных модельных баз данных. Таким образом, очевидно, что необходима верификация промежуточных результатов обработки изображений. Данная работа акцентирована на проведении верификации построения поля потоков, и на это есть несколько причин.

Во-первых, как видно по рис. 1 результаты построения поля потоков оказывают влияние на многие ключевые этапы процедуры идентификации. Улучшение качества построения поля потоков может значительно снизить общую ошибку идентификации.

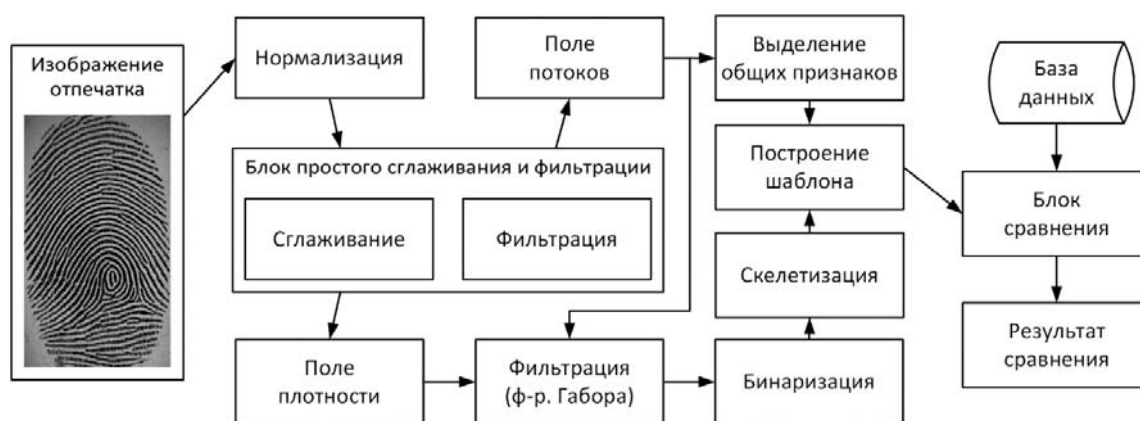


Рис. 1. Структура процесса идентификации

Во-вторых, совершенствование алгоритмов построения полей потоков само по себе является важной задачей, так как низкое качество изображений значительно повышает ошибку идентификации. Например, улучшение построения поля потоков увеличивает процент нахождения истинных минуций, что непосредственно влияет на величину ошибки [10, 11].

В-третьих, большинство существующих методов классификации отпечатков пальцев используют поля потоков. Точность оценки поля потоков имеет решающее значение для классификации отпечатков пальцев, а сам этап построения поля потоков является существенным шагом к построению полноценной системы идентификации по отпечаткам пальцев [2–5].

Перед построением поля потоков изображение, как правило, сегментируется.

Для пояснения ключевых понятий авторами статьи даны следующие определения.

**Определение 1.** 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 визуально показано усредненное направление.

**Определение 2.** Модельное поле потоков — это эталонные значения усредненных направлений линий для каждого сегмента изображения, обычно задается базой данных.

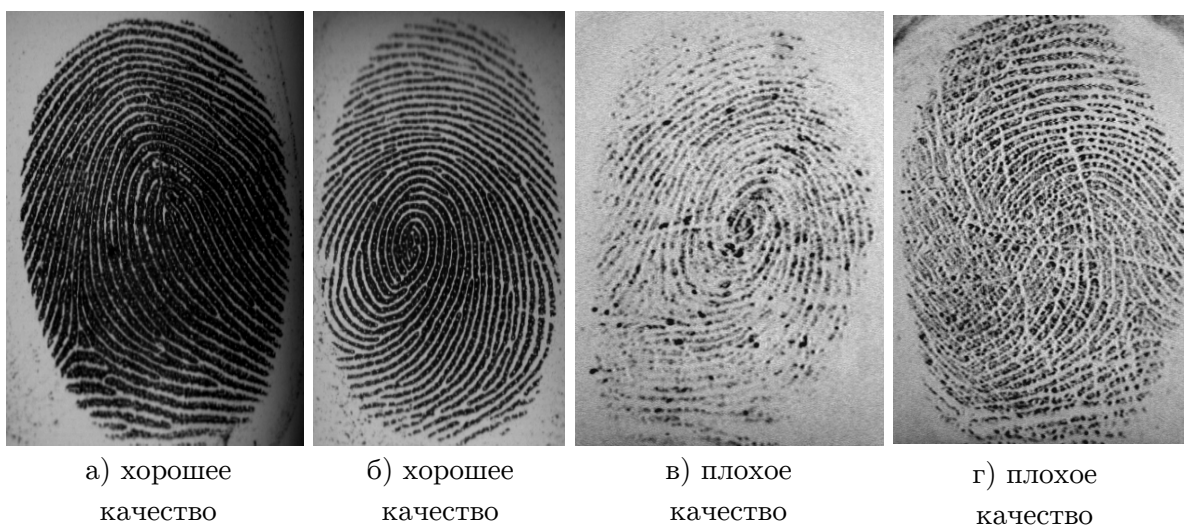
Обычно, методы определения поля потоков основаны на градиенте яркостей, измеряемого для некоторой окрестности каждого пикселя [3–5]. К их недостаткам можно отнести то, что они чувствительны к шумам. Кроме того, на крутых изгибах линий узора градиентные методы также показывают ощутимую погрешность. К их достоинствам можно отнести хорошее описание этих методов в литературе и относительно небольшие вычислительные затраты. Таким образом, градиентный метод плохо применим к изображениям очень плохого качества. Поэтому градиентные методы и алгоритмы совершенствуют или их используют в качестве входной, оценочной информации для других методов [3, 4].

Сайт FVC Ongoing предоставляет услугу для верификации результатов работы алгоритма построения поля потоков, которая заключается в том, что тестирование исполняемой программы выполняется на десяти изображениях хорошего качества и пятидесяти плохого. На экран выдается результат работы алгоритма в виде таблиц и графиков. Важно то, что изображения, на которых выполняется тестирование, не доступны разработчику [12].

Перед выбором сайта FVC был проведен обзор схожих по функциональности платформ и выделены следующие: NIST (National Institute of Standards and Technology) и CASIA (China Academy of Science) [13, 14].

Среди всех рассмотренных наиболее продвинутым и оснащенным является сайт NIST, однако, для верификации алгоритма на этом сайте необходимо быть зарегистрированным, как юридическое лицо. Сайт CASIA возник позднее FVC и на нем представлено меньшее количество участников. Другие сайты возможно существуют, но менее популярны, в России подобных сайтов не найдено. Исходя из вышесказанного был выбран сайт FVC как наиболее представительный по числу участников, алгоритмов для тестирования и по доступности.

Исполняемая программа, отправляемая для тестирования, должна удовлетворять ряду требований. Кроме реализации алгоритма для построения поля потоков, необходима поддержка интерфейса для входных и выходных данных. Для тестирования, существует возможность пробного запуска программы на открытой базе изображений. Примеры изображений из этой базы показаны на рис. 2.



**Рис. 2.** Изображения различного качества из открытой базы FVC

Задача верификации поля потоков заключается в измерении и построении поля потоков изображения и оценка полученных результатов для сравнения с модельным полем потоков, в данном случае с помощью инструментов, предложенных на сайте FVC.

Кроме того, регулярное участие в тестах позволяет оценить направление развития алгоритма и избежать потери времени на эксперименты с неперспективными методами. Анализ результатов различных тестов алгоритма позволяет лучше оценить особенности каждого из методов внутри алгоритма и оценить влияние изменения, внесения и удаления методов. Конечная цель — постепенное завоевание лидирующих позиций среди результатов, опубликованных на сайте.

### 3. Решение поставленной задачи

Программа должна содержать алгоритм построения поля потоков для изображений формата \*.bmp. Результат работы программы представляется в виде матрицы, каждый элемент которой является числом, кодирующим локальное направление линий узора на

сетке с заданными параметрами. Программа запускается роботом в среде Win32 и принимает входные данные в виде параметров командной строки.

Скрипт имеет следующий вид: '*Extractor.exe <indexfile> <outputfolder>*'. Здесь *Indexfile* — это файл, содержащий число изображений для обработки, пути в файловой системе, размеры границы и шага сетки для каждого изображения. *Outputfolder* — путь для сохранения результатов работы программы [12].

### 3.1. Чтение входных и запись выходных данных

Для получения информации об изображении необходимо прочитать файл *indexfile*. В нем для каждого изображения указан путь в файловой системе, а также величина шага установки локальной ориентации (на рис. 3 шаг представлен символом *s*) и ширина границы от левого и верхнего края, за пределами которой локальная ориентация не требуется (на рис. 3 граница представлена символом *b*). Полагается, что ширина границы не менее 14 пикселей [12].

Таким образом локальную ориентацию детектируют только в указанных точках на сетке внутри заданной границы.

Первым шагом обработки изображения является чтение файла формата *\*.bmp* по пути, указанному в *indexfile*. Для чтения используется класс *Bitmap* из *.NET Framework*. Его методы позволяют организовать быстрое чтение с диска и доступ к цветовым составляющим каждого пикселя изображения. Также в нем присутствует возможность получения информации о яркости пикселей.

Для удобства тестирования предоставлен файл формата *.fg* по тому же пути, который указан в *indexfile*, и с тем же именем, что и обрабатываемое изображение. Данный элемент хранит информацию о том, является ли каждый элемент изображения фоном или отпечатком (0 или 1). Локальную ориентацию нужно находить только для отпечатка, а для фона можно оставить ее равной нулю [12].

Результат работы сохраняется в файл формата *\*.dirmap* с тем же именем, что и входное изображение, по пути, указанному в *outputfolder*. В данном файле каждый элемент, показывающий направление, должен храниться в формате одного байта в единицах 0,703125 градуса, измеренных против часовой стрелки от правой части горизонтальной координатной оси.

### 3.2. Алгоритм построения поля потоков

Алгоритм, разработанный для верификации результатов построения поля потоков, состоит из нескольких этапов:

- выделение яркости исходных пикселей и сглаживание;
- приближенное вычисление локального направления узора;
- сглаживание вдоль направления линий узора;
- точное определение поля потоков по изображению, сглаженному вдоль линий узора.

Первый этап подразумевает сглаживание изображения по слою яркости. Второй и четвертый основаны на методе усредненного градиента в некоторой области. Причем для более точного определения в четвертом этапе выбраны большие размеры области по сравнению со вторым этапом. На третьем этапе выполняется сглаживание вдоль направления линий узора, что позволяет повысить качество финального результата.

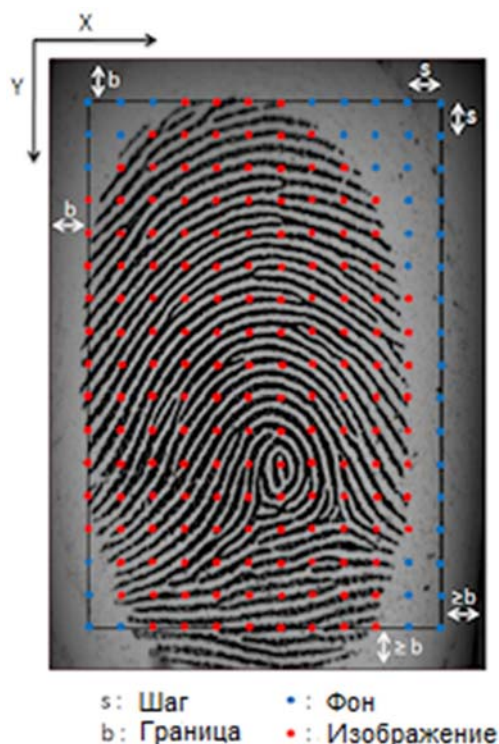


Рис. 3. Пример шага и границы на изображении

### 3.2.1. Выделение яркости и сглаживание

Для получения информации о яркости были использованы стандартные методы .NET Framework. В качестве способа сглаживания был выбран метод обработки изображений матрицей свертки. Коэффициенты матрицы умножаются на соответствующие яркости пикселей изображения, суммируются и делятся на коэффициент нормирования, чтобы средняя яркость изображения осталась неизменной. Свертка выполняется в виде:

$$\begin{bmatrix} b9 & b2 & b3 \\ b8 & b1 & b4 \\ b7 & b6 & b5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k9 & k2 & k3 \\ k8 & k1 & k4 \\ k7 & k6 & k5 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{div} = \begin{bmatrix} b9 \cdot k9 & b2 \cdot k2 & b3 \cdot k3 \\ b8 \cdot k8 & b1 \cdot k1 & b4 \cdot k4 \\ b7 \cdot k7 & b6 \cdot k6 & b5 \cdot k5 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{div}, \quad (1)$$

где  $b1 \dots b9$  — яркости входного изображения;  $k1 \dots k9$  — коэффициенты матрицы;  $div$  — коэффициент нормирования.

### 3.2.2. Метод усреднения градиентов в окрестности

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

$$\nabla f = (G_x, G_y) = \left( \frac{df}{dx}, \frac{df}{dy} \right), \quad (2)$$

где  $\frac{df}{dx}$  и  $\frac{df}{dy}$  — скорость изменения яркости соседних пикселей по осям X и Y [15].

Направление вектора градиента совпадает с направлением максимальной скорости изменения функции в точке, а модуль равен значению этой скорости. Вектор градиента, как и любой другой вектор, имеет две основные характеристики: модуль и направление. Модуль вектора обозначается и равен:

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (3)$$

Направление вектора градиента является углом  $\alpha(x, y)$  между направлением вектора  $\nabla f$  в точке  $(x, y)$  и осью абсцисс

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (4)$$

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

Из-за дискретности изображения в классическом смысле производной не существует, поэтому находят ее приближенного значения, например, оператором Собеля [16]. Оператор применяется к изображению в виде матриц свертки.

$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \text{ и } \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Первая матрица позволяет найти приближенное значение  $\frac{\partial f}{\partial x}$ , а вторая  $\frac{\partial f}{\partial y}$ . Эти значения подставляются в формулы (3) и (4).

Для повышения точности построения поля потоков усредняют градиент в некоторой окрестности. Однако простое усреднение направлений векторов не даст должного результата, так как противоположные по направлению векторы компенсируются, хотя и соответствуют одинаково направленным линиям узора.

Обозначим через  $S$  окрестность для поиска модуля и направления векторов. Размер окрестности  $I * J$  при  $I = J$ . Так как градиент в точке  $(x, y)$  известен, то значение модуля градиента, усредненного по окрестности точки  $(x, y)$ , находят в виде [17]:

$$X = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |\nabla f|(i, j) \cdot \cos(2\alpha(i, j)), \quad (6)$$

$$Y = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y |\nabla f|(i, j) \cdot \sin(2\alpha(i, j)), \quad (7)$$

$$|\nabla F|(x, y) = \sqrt{X \cdot X + Y \cdot Y}, \quad (8)$$

$$A(x, y) = \text{Atan}\left(\frac{Y}{X}\right)/2. \quad (9)$$

Следует обратить внимание, что в формулах 6 и 7 используется удвоенный угол. Это сделано, для того, чтобы вектора градиента на противоположных сторонах линии узора не компенсировали друг друга, так как по сути они указывают на одно и то же направление линий. В формуле 9 присутствует деление на два, чтобы восстановить истинный угол направления градиента.

### 3.2.3. Сглаживание вдоль направления линий узора

Для каждого пикселя изображение будет сглажено вдоль локального направления линий узора. Сглаживание осуществляется внутри апертуры, толщиной в один пиксель с центром в данном пикселе. Для построения такой апертуры применяется алгоритм Бре-



зенгема, принимающий в качестве входных параметров координаты точек начала и окончания линий [15]. Задача усложняется тем, что на данный момент имеется лишь информация о центре  $(x, y)$  и угле  $\alpha$ . Для получения координат точек начала и окончания искомой апертуры  $s(x_1, y_1)$  и  $e(x_2, y_2)$  можно воспользоваться следующими формулами:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - l \cdot \sin(\alpha) \\ y - l \cdot \cos(\alpha) \\ x + l \cdot \sin(\alpha) \\ y + l \cdot \cos(\alpha) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $l$  — длина сглаживающей апертуры [11].

Стоит отдельно сказать о параметре  $l$ . Так как узоры отпечатков пальцев в локальной области могут не только быть прямыми но и иметь резкие повороты, в общем случае параметр  $l$  имеет смысл подбирать индивидуально для каждой точки узора. Особенно это касается областей частных признаков, таких как петли, дельты и завитки. Но прежде всего нужно детектировать такие признаки, что является отдельной проблемой и не входит в состав постановки задачи. В данной работе параметр  $l$  подобран экспериментально, так чтобы разрабатываемый алгоритм показывал лучшие результаты в пробном тестировании.

После построения линии с центром в текущем пикселе и параллельно локальному направлению линий, выполняется операция, аналогичная свертке, только в одномерном представлении с коэффициентами по формуле:

$$h(x) = \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \cdot \cos(2\pi\theta x), \quad (11)$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение, а  $\theta$  — частота колебаний, определяемая как обратная величина по отношению к периоду функции  $\cos(2\pi\theta x)$ . Чем больше  $\theta$ , тем более пологий вид примет функция. Чем меньше, тем более острый пик получится в результате построения графика функции. Их следует подобрать так, чтобы сумма коэффициентов равнялась единице [3].

Сглаживание вдоль линий устраняет небольшие разрывы в линиях папиллярного узора, что повышает общее качество построения поля потоков.

#### 4. Анализ разработанного алгоритма

Разработанный с целью верификации поля потоков алгоритм для оценки локального направления линий узора является модификацией алгоритма, предложенного в работе [16]. Поэтому имеет смысл сравнить оба алгоритма и определить приносят ли внесенные изменения выигрыш при тестировании. Для этого будет проведено сравнение содержания обоих алгоритмов и результата их тестирования на сайте FVC.

Содержание ядра предложенного алгоритма:

1. Расчет модуля и направления градиента в точке узора с помощью оператора Собеля.
2. Расчет промежуточных векторов, модуль которых соответствует модулю, а угол удвоенному углу исходного градиента.
3. Усреднение промежуточных векторов.
4. Восстановление исходного направления градиента и линий узора.

Полное содержание предложенного алгоритма:

1. Предварительное сглаживание.
2. Применение ядра с малой апертурой.

3. Сглаживание вдоль направления линий узора с помощью экспоненциальной составляющей фильтра Габора.
4. Применение ядра с большей апертурой.

Содержание алгоритма, предложенного в работе [16]:

1. Подсчет модуля и направления градиента в точке узора, при этом не указан способ расчета.
2. Подсчет вспомогательных векторов, модуль которых соответствует квадрату модуля, а угол удвоенному углу исходного градиента.
3. Усреднение промежуточных векторов.
4. Восстановление исходного направления градиента и линий узора.

Разработанный алгоритм имеет в своем ядре модифицированный алгоритм М. Базена, в котором для подсчета вспомогательных векторов складываются квадраты модулей, что увеличивает чувствительность к выбросам длин векторов, а в предложенном алгоритме используется сложение оригинальных модулей, что увеличивает сглаженность.

Также ядро алгоритма применяется два раза с разными апертурами и происходит два сглаживания — общее и вдоль направления линий узора. Сглаживание вдоль локального направления линий узора позволят устранить разрывы в линиях, что является положительным моментом, так как разрывы не являются постоянными признаками и могут в дальнейшем привести к детектированию ложных особых точек.

Таким образом алгоритм проявляет устойчивость по отношению к разрывам линий, за счет сглаживания вдоль их направления, а также обладает устойчивостью к небольшим складкам, шрамам, другим дефектам кожи, а также иным помехам, свойственным цифровым изображениям за счет модернизированного усреднения направлений градиента. Кроме того, за счет многоэтапности в целом улучшается качество построения поля потоков. Целесообразность примененных модификаций очевидна после, сравнения результатов работы разработанного алгоритма с предложенным в работе М. Базена (табл. 1). Средняя ошибка на хорошей базе упала на 19%, а на плохой на 27%.

Таблица 1

Сравнение разработанного алгоритма и алгоритма из работы М. Базена

№	Алгоритм	Средняя ошибка на хорошей базе	Средняя ошибка на плохой базе
1	Алгоритм из данной работы	5,10°	17,90°
2	Алгоритм из работы М. Базена	6,27°	24,59°

## 5. Результаты экспериментов

После отправки исполняемого файла на сайт FVC Ongoing робот выполняет программу и возвращает результаты тестирования. Для всех изображений хорошего и плохого качества рассчитывается среднеквадратичное отклонение (СКО) между полем потоков, построенном программой, и модельным полем потоков. А также некоторые другие характеристики работы.

Для разработанного алгоритма были получены следующие показатели:

1. СКО для набора изображений хорошего качества: 5,10 градусов (EG).
2. СКО для набора изображений плохого качества: 17,90 градусов (EB).
3. Среднее время работы для каждого изображения: 4324 мс.

4. Максимум используемой памяти: 54032 Кб.
5. Гистограмма распределения отклонений от истинного значения для набора хорошего качества — рис. 4а, для плохого — рис. 4б.
6. Гистограмма распределения СКО для набора хорошего качества — рис. 5а, плохого — рис. 5б.

Стоит отметить что основная цель проводимого исследования на данный момент — это не разработка алгоритма, обладающего параметрами наибольшей скорости выполнения и минимума используемой памяти. На данном этапе самое важное — это выполнить верификацию результатов работы алгоритма, корректно определяющего поле потоков изображения.

Таким образом полученные результаты прежде всего имеют ценность как объективные показатели текущего этапа развития алгоритма. Учитывая это, при сравнении его с другими алгоритмами ограничимся показателями EG и EB (табл. 2).

Что касается остальных показателей, то они будут крайне полезны для оценки степени значимости дальнейших улучшений текущего алгоритма или разработке на его основе нового.

Далее приведено сравнение качества выходных результатов разработанного алгоритма с другими опубликованными на сайте FVC алгоритмами по критериям EG и EB.

Глядя на табл. 2, можно провести сравнение полученного алгоритма с опубликованными [9]. Значение показателя EG у разработанного составляет  $5,10^0$ , такое значение позволяет сказать, что разработанный алгоритм по этому показателю занимает второе место среди опубликованных результатов. Кроме того, можно сделать вывод, что сам алгоритм работает корректно и для изображений хорошего качества показывает крайне положительные результаты для своей первой версии. Отклонение в пределах 5 градусов в окрестности, например,  $20 \times 20$  практически незаметно для невооруженного глаза.

По показателю EB, составившему  $17,90^0$ , алгоритм показал средний рейтинг по сравнению с другими участниками теста.

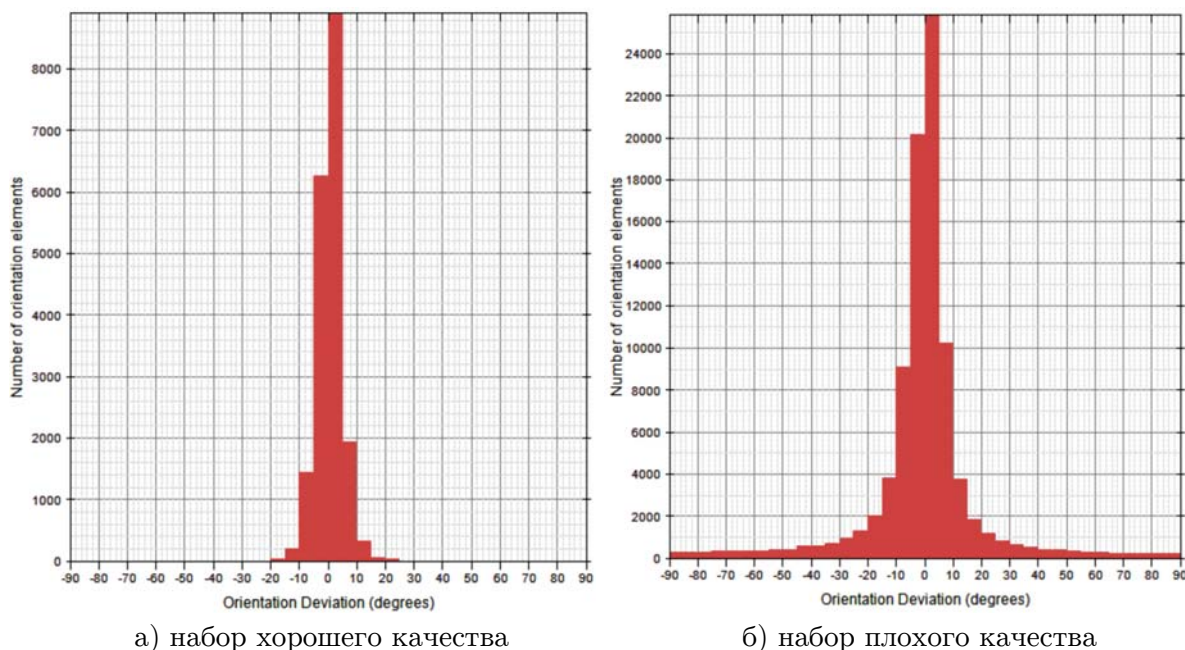


Рис. 4. Гистограммы распределения отклонений ориентации для наборов изображений

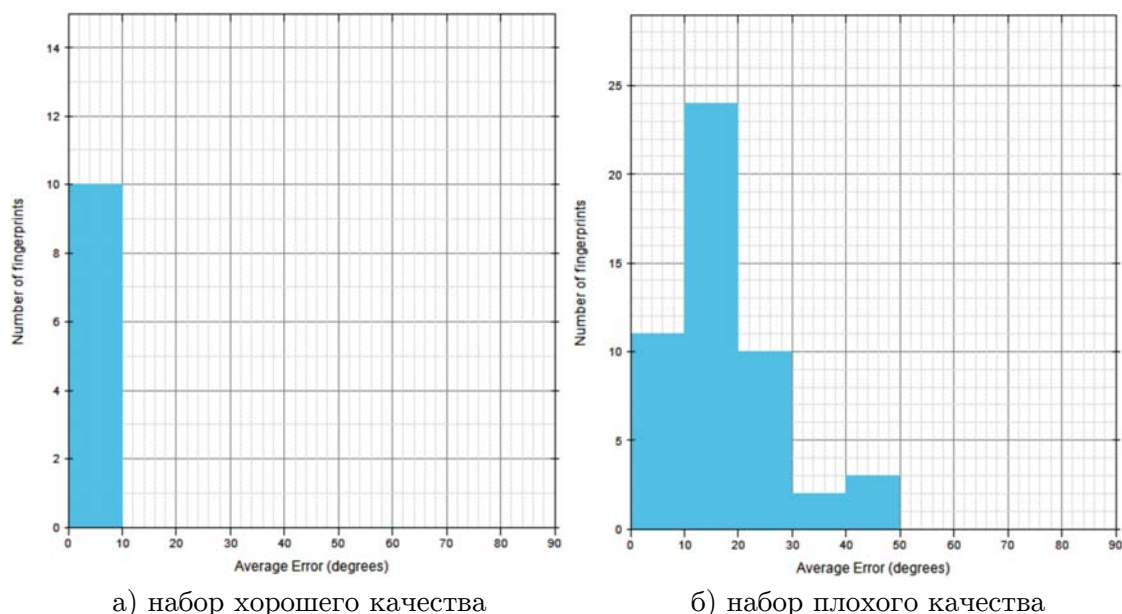


Рис. 5. Гистограммы распределения СКО для наборов изображений

Это объясняется тем, что алгоритм в первую очередь разрабатывался для верификации результатов построения поля потоков, а модернизация алгоритма для такой обработки изображений плохого качества, которая бы по своим показателям опережала конкурентов требует длительных исследований. Кроме того, очевидно, что необходимо искать новые методы, подходы, алгоритмы и парадигмы для понижения ошибки обработки изображений плохого качества, чему и будут посвящены дальнейшие исследования.

Таблица 2

Сравнение параметров EG и EB с опубликованными результатами

№	Участник тестирования	Название алгоритма	EG	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	Агафонов А.В., Рожина Д.С.	AVG+	5,10°	17,90°

## Заключение

В ходе выполненного исследования изучена соответствующая печатная литература и электронные источники, разработан алгоритм построения поля потоков для изображений отпечатков пальцев. Самостоятельно написана программа на языке C++, исходных кодов которой нет в общем доступе. Программа может быть представлена в виде исполняемого файла, который запускается в работу на удаленном сервере в независимой организации. Это позволяет объективно оценивать промежуточные результаты обработки изображений и сравнивать их с результатами работы алгоритмов других независимых разработчиков.

Оценка разработанного алгоритма по качеству построения поля потоков близка к компаниям, выступающим на рынке биометрии в течении многих лет. Однако алгоритм, метод и подход, продемонстрированный в данной разработке, не совершенны и требуют развития.

Дальнейшее направление работ по этой тематике видится в применении производных более высокого порядка, в том числе Лапласиана, компенсации контрастности и фона изображения. Кроме того, в областях высокой кривизны линий изображения требуется дополнительный механизм уточнения локального направления линий. Учет перечисленных недостатков распознавания поля потоков позволит уменьшить ошибки распознавания.

## Литература

1. Задорожный В.И. Идентификация по отпечаткам пальцев // PC Magazine. 2004. № 2. С. 114–119.
2. Гаспарян А.В., Киракосян А.А. Система сравнения отпечатков пальцев по локальным признакам // Вестник РАУ. Серия физико-математические и естественные науки. 2006. № 3. С. 85–91.
3. Гудков В.Ю., Бойцов А.В. Улучшение изображений отпечатков пальцев с помощью фильтра Габора // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2015. Т. 15, № 2. С. 128–132.
4. 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/telkonomika.v14i2.3112.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Е.М. Орлов. Способ верификации и идентификации отпечатков папиллярных узоров. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/231/2310910.html> (дата обращения 15.10.2017).
9. Гудков В.Ю. Способ кодирования папиллярного узора. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2413300.html>. (дата обращения: 15.10.2017).
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. 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: 12.11.2017).
13. NIST. Biometric Evaluations Homepage. URL: <https://www.nist.gov/itl/iad/image-group/resources/biometrics-evaluations> (дата обращения: 02.02.2018).
14. Biometrics Ideal Test. The First CCBR Competition on Fingerprint Recognition. URL: <http://biometrics.idealtest.org/2014/CCFP2014.jsp> (дата обращения: 02.02.2018).
15. 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.
16. Bazen A., Fingerprint Identification: Feature Extraction, Matching, and Database Search. The Netherlands: Univ. of Twente. 2002. 187 p.
17. Rodgers D. Procedural Elements for Computer Graphics. WCB/McGraw-Hill Inc. 1989. pp. 54–63.

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)

## VERIFICATION OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE FLOW CHART OF FINGERPRINT IMAGES

© 2018 A.V. Agafonov, D.S. Rozhina

*South Ural State University*

*(pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)*

*E-mail: asp17aav494@susu.ru, asp17rds604@susu.ru*

Received: 08.04.2018

The construction of the flow chart for fingerprints digital images is an important step in biometric identification and comparison procedure. In particular, the results of building the flow chart significantly affect the filtering of such attributes of images as minutiae, loops, deltas and curls. In addition, improving the quality of the flow chart construction can significantly reduce the overall identification error. This article describes the developed algorithm for constructing the flow chart of fingerprints digital images. The proposed algorithm is based on an improved method of gradients. This method is applied in two stages with different sizes of aperture and two types of smoothing: common and along the direction of the pattern lines. The quality of this algorithm was evaluated using a web-framework created on the platform of the University of Bologna (Italy). This framework is created for automatic, remote evaluation of the results of different fingerprint recognition algorithms including the estimation of the flow chart. The requirements for the program structure, input and output data imposed by this framework were fulfilled. The outputs of the algorithm work evaluation by the selected framework are considered and analyzed. A comparison of the algorithm results evaluation with the original gradient method is made, as well as with the results of other test participants published in open access.

*Keywords: biometrical identification, fingerprint flow chart, pattern recognition, fingerprints, verification.*

### FOR CITATION

Agafonov A.V., Rozhina D.S. Verification of the Algorithm for Estimating the Flow Chart of Fingerprint Images. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 67–82. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180405.

*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. Zadorozhnyj V.I. Fingerprint Identification. *PC Magazine*. 2004. no. 2. pp. 114–119. (in Russian)
2. Gasparyan A.V., Kirakosyan A.A. A System for Comparing Fingerprints Based on Local Characteristics. *Vestnik RAU. Seriya fiziko-matematicheskie i estestvennye nauki* [Bulletin of RAU. Series: Physics and Mathematics Sciences]. 2006. vol. 3. pp. 85–91. (in Russian)
3. Gudkov V.Ju., Bojcov A.V. Enhancement of Fingerprint Images with the Gabor Filter. *Vestnik Yuzho-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye"* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2015. no. 2. vol. 15. pp. 128–132. (in Russian)

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Orlov E.M. *Sposob verifikacii i identifikacii otpechatkov papilljarnyh uzorov* [Method for Verification and Identification Fingerprints]. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/231/2310910.html> (accessed: 15.10.2017).
9. Gudkov V.Ju. *Sposob kodirovanija otpechatka papilljarnogo uzora* [Method for Encoding Fingerprints]. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2413300.html> (accessed: 15.10.2017).
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. 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: 12.11.2017).
13. NIST. *Biometric Evaluations Homepage*. Available at: <https://www.nist.gov/itl/iad/image-group/resources/biometrics-evaluations> (accessed: 02.02.2018).
14. Biometrics Ideal Test. *The First CCBP Competition on Fingerprint Recognition*. Available at: <http://biometrics.idealtest.org/2014/CCFP2014.jsp> (accessed: 02.02.2018).
15. 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.
16. Bazen A. *Fingerprint Identification: Feature Extraction, Matching, and Database Search*. The Netherlands: Univ. of Twente. 2002. 187 p.
17. Rodgers D. *Procedural Elements for Computer Graphics*. WCB/McGraw-Hill Inc. 1989. 433 p.