

УДК 517. 58; 621. 372. 542

Методы анализа дактилоскопических изображений на основе поля направлений / Н. Ю. Ильясова, А. В. Устинов, А. Г. Храмов // Научное приборостроение. — 1993. — Т. 3. — N 1: Дифракционная плоская оптика и обработка изображений. — С. 89—101.

Рассматривается задача анализа дактилоскопических изображений и предлагается при ее решении использовать новый объект — поле направлений. Описано несколько методов построения поля направлений и дан их сравнительный анализ. Предложена нестандартная алгебра векторов, составляющих поле направлений, которая используется при фильтрации поля. Предложен способ аппроксимации функции при нелинейной параметрической зависимости, используемый в одном из методов построения поля направлений. Библ. 1 назв. Ил. 5. Табл. 1.

Н. Ю. Ильясова, А. В. Устинов, А. Г. Храмов
(Самарский филиал ЦКБ уникального приборостроения РАН)

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАКТИЛОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЯ НАПРАВЛЕНИЙ

The problem of finger-prints analysis has been investigated. In connection it has been proposal to use a new object called the field of directions. A number of the methods for constructing the field of directions has been discussed and compared. A non-standard algebra of vectors included into the field of directions has been developed and used in filtering the field.

Введение

Растущий объем криминалистической информации и наличие современных средств автоматизации делают одним из важнейших направлений криминалистической работы создание комплексных автоматизированных банков дактилоскопических изображений. На сегодняшнем этапе существует потребность в создании и использовании автоматизированных систем кодирования дактилоскопических изображений. Дактилоскопические изображения широко



Рис. 1. Исходное изображение отпечатка пальца.

используются не только в криминалистике для идентификации личности правонарушителя, но и во многих типах запорных устройств.

Система кодирования изображений отпечатков основана на обнаружении глобальных особенностей, характеризующих тип узора и включающих в себя типичные конфигурации папиллярных линий, такие, как дельты, центры петель и спиралей, и локальных, определяющих мелкие нерегулярности папиллярного узора. В данной работе предлагается для обнаружения характерных точек дактилоскопического изображения использовать понятие поля направлений, характеризующего направление линий папиллярного узора в каждой точке изображения. Изображение отпечатка пальца можно рассматривать как функцию яркости двух переменных $I(x, y)$. Пример такого изображения приведен на рис. 1. Полем направлений будем называть функцию $D(x, y)$, значение которой в данной точке равно углу касательной к линии уровня функции $I(x, y)$ в этой же точке, приведенному к диапазону $[0; 180^\circ)$. Было разработано и испытано несколько методов построения и обработки поля направлений.

Методы построения поля направлений

Дисперсионный метод. Для построения поля направлений производится сканирование изображения квадратной маской и для каждого ее положения составляются четыре последовательности сумм отсчетов, попадающих в маску и расположенных вдоль линий, параллельных одному из четырех направлений: $0, 45, 90, 135^\circ$. Величины сумм нормируются на длину линии. Считая каждую из последовательностей дискретной случайной величиной с равными вероятностями значений, вычисляются их дисперсии. В качестве результата — угла наклона линии — выбирается тот угол, у которого соответствующая ему

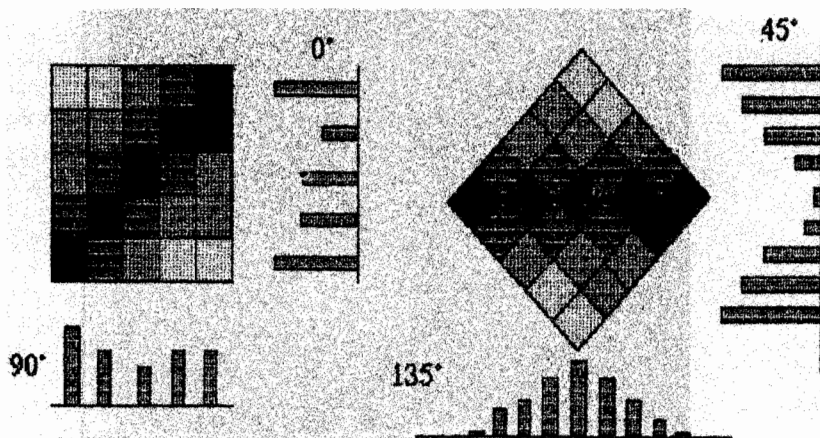


Рис. 2. Фрагмент дактилоскопического изображения с диаграммами, иллюстрирующими дисперсионный метод.

последовательность имеет максимальную дисперсию. Такой выбор обосновывается тем, что у последовательности, соответствующей направлению полосы, имеется наибольший разброс значений. Это согласуется с тем, что максимум модуля производной по направлению достигается в направлении нормали к линии уровня.

Последовательность, соответствующая выбранному направлению, представляет собой дискретные отсчеты среднего значения функции яркости вдоль нормали к этому направлению. Отметим, что достоинством метода является то, что размер маски может варьироваться. Он зависит от частоты полос на изображении. Среди методов, допускающих переменный размер маски, дисперсионный метод имеет наивысшее быстродействие.

Недостатком метода является малое число градаций (четыре) угла направления линий. Но при сглаживании полученного поля направлений с целью устранения шумов число градаций увеличивается. Это свойство сохраняется и для других методов, дающих малое число градаций.

На рис. 2 представлен фрагмент изображения с направлением линий 45° и диаграммы, содержащие четыре рассмотренные последовательности. Рассчитанное данным методом поле направлений для тестового изображения (см. рис. 1) показано на рис. 3. При визуализации поля направлений яркость точек

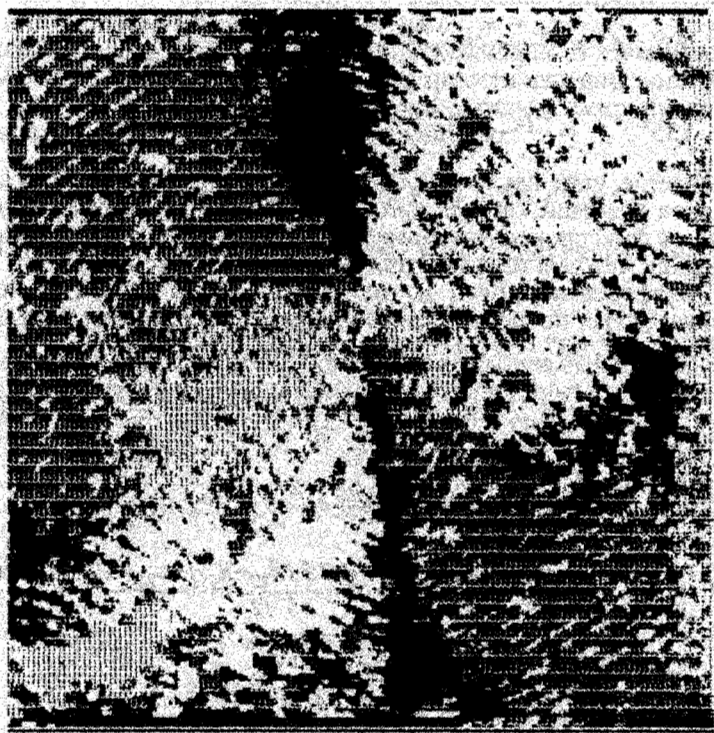


Рис. 3. Изображение поля направлений, полученного дисперсионным методом (маска 7×7).

изображения выбирается пропорциональной рассчитанному углу наклона $D(x, y)$.

Дифференциальные методы. Данные методы расчета поля направлений основаны на том факте, что производная функции яркости по направлению, совпадающему с направлением линий, имеет наименьшее (по модулю) значение среди производных по направлению в текущей точке. При использовании дифференциального метода с маской 3×3 по отсчетам внутри окна вычисляются производные вдоль направлений, определяемых углами $0, 45, 90, 135^\circ$. При этом используются разностные схемы, соответствующие симметричной формуле непрерывного случая

$$f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h}.$$

Оценки производной для различных направлений имеют вид

$$0^\circ: f' = \frac{x_{13} - x_{11} + x_{23} - x_{21} + x_{33} - x_{31}}{6};$$

$$45^\circ: f' = \frac{x_{12} - x_{21} + 0,5(x_{13} - x_{31}) + x_{23} - x_{32}}{3\sqrt{2}};$$

$$90^\circ: f' = \frac{x_{31} - x_{11} + x_{32} - x_{12} + x_{33} - x_{13}}{6};$$

$$135^\circ: f' = \frac{x_{23} - x_{12} + 0,5(x_{33} - x_{11}) + x_{32} - x_{21}}{3\sqrt{2}}.$$

В качестве угла наклона линии берется угол, которому соответствует минимальное значение модуля производной. Характерной особенностью метода является фиксированный размер маски. Среди других дифференциальных и градиентных методов он имеет наибольшее быстродействие.

Для дифференциального метода с маской 5×5 возможно вычисление производных по восьми направлениям, определяемым углами $0, 26^\circ = \arctg(1/2), 45^\circ, 63^\circ = \arctg(2), 90, 116, 135, 153^\circ$

$$0^\circ: f' = \frac{x_{15} - x_{11} + x_{25} - x_{21} + x_{35} - x_{31} + x_{45} - x_{41} + x_{55} - x_{51}}{20};$$

$$26^\circ: f' = \frac{x_{15} - x_{31} + x_{25} - x_{41} + x_{35} - x_{51}}{6\sqrt{5}};$$

$$45^\circ: f' = \frac{1,5(x_{13} - x_{31}) + x_{14} - x_{41} + 0,75(x_{15} - x_{51}) + x_{25} - x_{52} + 1,5(x_{35} - x_{53})}{15\sqrt{2}};$$

$$63^\circ: f' = \frac{x_{13} - x_{51} + x_{14} - x_{52} + x_{15} - x_{53}}{6\sqrt{5}};$$

$$90^\circ: f' = \frac{x_{51} - x_{11} + x_{52} - x_{12} + x_{53} - x_{13} + x_{54} - x_{14} + x_{55} - x_{15}}{20};$$

$$116^\circ: f' = \frac{x_{11} - x_{53} + x_{12} - x_{54} + x_{13} - x_{55}}{6\sqrt{5}};$$

$$135^\circ: f' = \frac{1,5(x_{31} - x_{53}) + x_{21} - x_{54} + 0,75(x_{11} - x_{55}) + x_{12} - x_{45} + 1,5(x_{13} - x_{35})}{15\sqrt{2}};$$

$$153^\circ: f' = \frac{x_{11} - x_{35} + x_{21} - x_{45} + x_{31} - x_{55}}{6\sqrt{5}}.$$

Градиентные методы. Данные методы основаны на том, что градиент функции в любой точке перпендикулярен касательной к линии уровня в этой же точке. Совокупность всех градиентных методов характеризуется различными способами нахождения градиента.

Градиентный метод с использованием разностных схем. В этом методе для нахождения градиента используется непосредственно его определение. При вычислении частных производных применяется разностный метод со сканированием изображения маской произвольного размера. В отличие от описанных выше, этот метод, как и все градиентные, позволяет получить практически непрерывные значения угла наклона, что обеспечивает повышенную точность. Быстродействие метода существенно зависит от размера маски. Недостатком данного метода является повышенная чувствительность к шумам на дактилоскопическом изображении; его целесообразно применять лишь в том случае, когда изображение мало зашумлено.

Метод локальной квадратичной аппроксимации. В этом методе используется локальная аппроксимация функции яркости дактилоскопического изображения в пределах скользящего окна W . Аппроксимирующей функцией является квадратичный полином двух переменных

$$F(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f.$$

Выражения для частных производных имеют следующий вид:

$$\partial F / \partial x = 2ax + cy + d; \quad \partial F / \partial y = 2by + cx + e.$$

Коэффициенты аппроксимирующего параболоида вычисляются по методу наименьших квадратов из следующей системы линейных уравнений:

$$a \sum m^4 + b \sum m^2 n^2 + f \sum m^2 = \sum m^2 I(m, n),$$

$$a \sum m^2 n^2 + b \sum n^4 + f \sum n^2 = \sum n^2 I(m, n),$$

$$c \sum m^2 n^2 = \sum mn I(m, n),$$

$$d \sum m^2 = \sum m I(m, n),$$

$$e \sum n^2 = \sum n I(m, n),$$

$$a \sum m^2 + b \sum n^2 + f \sum 1 = \sum I(m, n).$$

Во всех этих формулах предполагается, что $(m, n) \in W$.

Для вычисления моментных функций изображения

$$\mu_{p,q} = \sum_{(k,l) \in W} k^p l^q I(k,l),$$

использующихся в правых частях приведенной системы, целесообразно использовать быстрые рекуррентные алгоритмы, описанные в [1]. Основными преимуществами метода локальной квадратичной аппроксимации являются высокое быстродействие, не зависящее от размеров окна, и высокая помехоустойчивость к шумам, так как метод наименьших квадратов обладает сглаживающим свойством.

С увеличением размера маски достоверность вычисления коэффициентов параболоида, а значит, и поля направлений, увеличивается, но размер маски ограничен условием попадания в нее не более одной линии. Это объясняется тем, что линии на дактилоскопическом изображении являются местоположениями локальных экстремумов. При увеличении размера маски в нее начинает попадать более одной линии, что противоречит свойству квадратичной функции иметь только один экстремум. Отсюда следует, что оптимальный размер маски равен среднему расстоянию между линиями. От ограничения на увеличение размера маски свободен рассматриваемый далее градиентный метод с аппроксимацией синусоидой.

Градиентный метод с аппроксимацией синусоидой. Также как и в методе с аппроксимацией параболоидом, здесь функция яркости изображения в пределах окна аппроксимируется функцией двух переменных следующего вида:

$$F(x, y) = A \sin(\omega_1 x + \omega_2 y + \varphi).$$

Значения частных производных в центре окна (при $x = y = 0$)

$$\partial F / \partial x = A \omega_1 \cdot \cos(\varphi), \quad \partial F / \partial y = A \omega_2 \cdot \cos(\varphi). \quad (1)$$

Отсюда следует, что для определения направления полос достаточно найти пространственные частоты ω_1 и ω_2 .

Параметры A , ω_1 , ω_2 , φ , в принципе, можно определить методом наименьших квадратов (МНК), который сводится к системе нелинейных уравнений. Получаемую систему в силу ее нелинейности аналитически решить невозможно. Численные методы очень сложны в реализации, а в данном случае ненадежны в связи с неоднозначностью обратных тригонометрических функций. Поэтому данная задача решается без использования метода наименьших квадратов и формулируется таким образом, что допускает аналитическое решение.

Сначала рассмотрим общую схему оценивания неизвестных параметров в случае нелинейной аппроксимации функции одной переменной. Допустим, что требуется аппроксимировать произвольную функцию, заданную таблицей пар значений (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$, аналитическим выражением

$$y = f(x; a_1, \dots, a_m),$$

где a_1, \dots, a_m — неизвестные параметры, причем функция $f(x; a)$ зависит от параметров a_k ($k = 1, \dots, m$) нелинейно. Задача заключается в оценке неизвестных параметров a_1, \dots, a_m . Последовательность пар разбивают на группы по m пар (в одномерном случае способ разбиения произволен): группа 1

— пары с 1 по m ; группа 2 — пары с 2 по $m + 1$; группа $n - m + 1$ — пары с $n - m + 1$ по n .

Пусть k — номер группы. В каждой из групп записываем систему уравнений

$$y_k = f(x_k; a), \tag{2}$$

$$y_{k+m-1} = f(x_{k+m-1}; a).$$

В системе (2) m уравнений и m неизвестных, в большинстве практически используемых моделей ее можно решить аналитически. Пусть a_k — решение системы (2) для группы k . За окончательную оценку вектора неизвестных параметров для всей таблицы принимается среднее значение решений по всем группам

$$a_0 = \frac{1}{n - m + 1} \sum_{k=1}^{n - m + 1} a_k. \tag{3}$$

Обычно $n \gg m$, поэтому выбор окончательного вектора a_0 практически однозначен независимо от числа корней уравнения (2). Метод гарантированно дает результат в случаях, когда уравнение (2) при любых x_i и y_i имеет единственное решение. Если корней несколько, то для выбора одного из них требуются дополнительные условия. Ниже приведем несколько примеров решения системы для различных видов аппроксимирующей функции.

| Вид функции $y = f(x; a)$ | Система (2) | Решение |
|------------------------------|---|--|
| $y = A x^n$ | $A x_1^n = y_1$ $A x_2^n = y_2$ | $A = y_1 / x_1^n = y_2 / x_2^n$ $n = \ln(y_2 / y_1) / \ln(x_2 / x_1)$ |
| $y = A a^x$ | $A a_1^x = y_1$ $A a_2^x = y_2$ | $A = y_1 / a^{x_1} = y_2 / a^{x_2}$ $a = (y_2 / y_1)^{1/(x_2 - x_1)}$ |
| $y = \frac{1}{ax + b}$ | $\frac{1}{ax_1 + b} = y_1$ $\frac{1}{ax_2 + b} = y_2$ | $a = \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1} \cdot \frac{1}{y_1 y_2}$ $b = \frac{x_2 y_2 - x_1 y_1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{1}{y_1 y_2}$ |
| $y = a x^n + x^m$ | $a x_1^n + x_1^m = y_1$ $a x_2^n + x_2^m = y_2$ $a x_3^n + x_3^m = y_3$ | Решается численно |

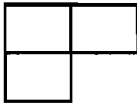
Первые три примера даны для иллюстрации метода, хотя решение можно было получить с использованием МНК после некоторого преобразования исходных данных и функции $f(x; a)$, которое сводит задачу к случаю линейной зависимости.

Общая схема метода при двумерной аппроксимации $z = f(x, y; a)$ аналогична одномерной. В отличие от одномерного варианта, где способ разбиения на группы не имеет особого значения, здесь отсчеты, входящие в группу, должны находиться рядом, иначе уравнение значительно усложнится. Однако, если неизвестных параметров более двух, то нельзя брать отсчеты из одной строки или одного столбца таблицы $(x_i, y_j; z_{ij})$, $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N$; в противном случае система уравнений (2) станет несовместимой.

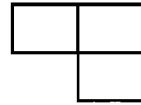
Используем рассмотренный метод для расчета градиента в случае аппроксимирующей функции двух переменных следующего вида:

$$F(x, y) = A \cdot \sin(\omega_1 x + \omega_2 y + \varphi).$$

Величина A является константой, равной наибольшему значению функции яркости. Необходимо определить параметры $\omega_1, \omega_2, \varphi$. По окну размером $N \cdot M$ движется маски следующей формы:



и



1. Маска первого типа

| | |
|-------|-------|
| z_1 | z_3 |
| z_2 | |

Выбирается стандартная декартова система координат (ось Ox — вправо, Oy — вверх) с началом координат в угловой точке. Такой выбор начала отсчета обеспечивает наименьшее значение фазы, что определяется неоднозначностью арксинуса. Кроме того, как показали эксперименты, хорошие результаты получаются только при следующих комбинациях значений (показан бинарный случай):



и



(4)

Для данной задачи важен лишь знак частного ω_2 / ω_1 . Вероятно, это всегда можно сделать выбором начала отсчета и начальной фазы. Поэтому частоту

ω_1 всегда считаем положительной, а ω_2 в комбинациях (4) — отрицательной. Чтобы избежать излишних вычислений, заранее проверяем условие, аналогичное условию (4) в полутоновом случае — значение углового отсчета является либо наибольшим, либо наименьшим. Алгебраически это записывается в виде выражения

$$[(z_1 < z_3) \wedge (z_1 < z_2)] \vee [(z_1 > z_3) \wedge (z_1 > z_2)] . \quad (5)$$

Если данное условие выполняется, то решаем систему уравнений

$$A \cdot \sin \varphi = z_1 ; \quad A \cdot \sin (-\omega_2 + \varphi) = z_2 ; \quad A \cdot \sin (\omega_1 + \varphi) = z_3 .$$

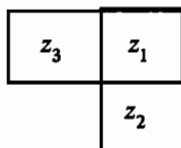
Решение системы имеет вид

$$\varphi = \arcsin \frac{z_1}{A} ,$$

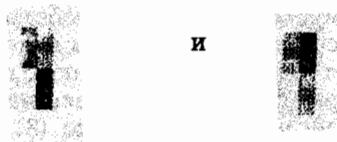
$$\omega_1 = \left| \arcsin \frac{z_3}{A} - \varphi \right| ; \quad \omega_2 = - \left| \varphi - \arcsin \frac{z_2}{A} \right| . \quad (6)$$

Если первая маска не позволяет найти ω_1 и ω_2 (условие (5) не выполняется), то надо использовать вторую маску.

2. Маска второго типа



Также, как и в случае окна первого типа, выбирается система координат с центром в угловой точке. Аналогично первой маске, хорошие результаты получаются при комбинациях



В таких комбинациях обе частоты ω_1 и ω_2 являются положительными. Аналитически требуемое условие выражается таким же выражением (5). Если условие истинно, то решение системы уравнений

$$A \cdot \sin \varphi = z_1 ; \quad A \cdot \sin (-\omega_2 + \varphi) = z_2 ; \quad A \cdot \sin (-\omega_1 + \varphi) = z_3$$

имеет следующий вид :

$$\varphi = \arcsin \frac{z_1}{A},$$

$$\omega_1 = |\varphi - \arcsin \frac{z_3}{A}|; \quad \omega_2 = |\varphi - \arcsin \frac{z_2}{A}|. \quad (7)$$

Если условие (5) ложно, то полагаем $\omega_1 = \omega_2 = 0$. Анализ показывает, что с учетом использования окон двух типов вероятность отказа равна $2/24$, так как в квадрате

| | |
|-----|-----|
| a | b |
| c | d |

возможно 24 соотношения между числами a, b, c, d , если считать их все различными. Только в двух случаях выражение (5) ложно при окнах обоих типов — в случае $c < a < b < d$ и в случае $d < b < a < c$.

Величина $1/12$ не очень мала, но она является значительно завышенной оценкой вероятности отказа в ситуации, когда таблицей $(x_i, y_j; z_{ij})$ является изображение. Причина в том, что изображение имеет большую корреляцию между соседними отсчетами. Поэтому 24 соотношения становятся неравновесными, причем вероятность двух "плохих" случаев меньше $1/12$. Факт, что изображение имеет периодическую структуру, еще больше уменьшает вероятность отказа. В маске размером $M \cdot N$ укладывается $(M-1) \times (N-1)$ квадратов размером $2 \cdot 2$. В формулах (1) используются усредненные величины

$$\omega_1 = (\sum_i \omega_1^i) / ((M-1) \times (N-1)),$$

$$\omega_2 = (\sum_i \omega_2^i) / ((M-1) \times (N-1)), \quad (8)$$

где $i = 1 \div (M-1) \times (N-1)$, а ω_1^i и ω_2^i считаются по формулам (6) или (7).

По сравнению с методом аппроксимации параболоидом качество построения поля направлений существенно выше, так как очевидно, что синусоида гораздо лучше соответствует природе изображения с периодической структурой, чем параболоид. Выигрыш в скорости однако не очень велик: алгоритм позволяет рекурсивные вычисления по формуле (8), но достаточно велики число укладываемых в маску квадратов размером $2 \cdot 2$ и объем вычислений на каждом шаге рекурсии. На рис. 4 изображено поле направлений, полученное описанным выше методом.

Полученное поле направлений в силу наличия шума на изображении и большой чувствительности к локальным свойствам функции яркости неустойчиво, что проявляется в виде ряби на изображении поля. Поэтому требуется его фильтрация. В ходе ее реализации был разработан метод, который позволяет свести задачу к обычному алгебраическому усреднению векторов, так как в исходной постановке применять традиционные методы нельзя. В отличие от обычных векторов в геометрии, у нас противоположные векторы соответству-



Рис. 4. Изображение поля направлений, полученное градиентным методом с аппроксимацией синусоидой.

ют одному и тому же направлению в силу того, что они лежат на одной прямой. Поэтому угол наклона находится в пределах $[0; 180^\circ)$. Каждый вектор, образующий точку поля направлений, характеризуется кроме угла α еще и "весом" w , который показывает, насколько данное направление выражено. Например, в комбинациях полос



один из методов построения поля даст один и тот же угол 45° , но "вес" в первом случае будет больше.

В силу вышесказанного традиционные методы векторной алгебры (после разложения на компоненты) не подходят, так как там диапазон углов вдвое больше. Обычное усреднение углов как чисел не учитывает "вес", кроме того, при этом не соблюдается принцип близости направлений, отличающихся на углы около 180° .

Был предложен способ фильтрации поля направлений при помощи усредняющего фильтра. Основная идея состоит в том, чтобы применять обычные

методы векторной алгебры. Для этого необходимо по-другому производить разложение на компоненты. Используем самый простой способ

$$x = w \cdot \cos(2\alpha),$$

$$y = w \cdot \sin(2\alpha).$$

Он приводит векторы к диапазону углов $[0; 360^\circ)$, при этом вполне соответствует принципам близости направлений, изложенным выше.

Отсюда вытекает следующая схема фильтрации:

1) исходное поле направлений, записанное в формате (w, α) , преобразуется к компонентному формату (x, y) ;

2) с каждой из компонент производится фильтрация традиционным способом — используется рекурсивный усредняющий фильтр с равными весами в маске;

3) отфильтрованное поле направлений в формате $(w, \bar{\alpha})$ получается обратным преобразованием по формулам

$$\bar{w} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2},$$

$$\bar{\alpha} = 0,5 \cdot \arctg(\bar{y} / \bar{x});$$

значение арктангенса необходимо нормализовать на диапазон $[0; 2\pi]$ с учетом знаков y и x .

Независимо от числа градаций угла в исходном поле после фильтрации угол определяется с точностью до $1,4^\circ$, но при дальнейшем использовании поля направлений нам достаточно иметь поле в четырех градациях: $0, 45, 90$ и 135° . Отметим, что в формате (w, α) в файле записывается не прямо в градусах, а в уменьшенном масштабе, который отображает интервал $[0; 179^\circ]$ в $[0; 127]$. Отфильтрованное поле направлений показано на рис. 5.

Таким образом, нами описано несколько методов построения поля направлений. Этому уделено особое внимание по той причине, что поле направлений используется почти на всех этапах анализа дактилоскопического изображения:

— обнаружении глобальных особенностей;

— повышении качества изображения папиллярных линий (логическая фильтрация);

— обнаружении и классификации точек нарушения папиллярного узора;

— выделении наиболее информативных областей изображения;

— приведении списка особенностей к виду, инвариантному относительно геометрических преобразований изображения отпечатка пальца.

Данный перечень показывает роль поля направлений при анализе и кодировании дактилоскопического

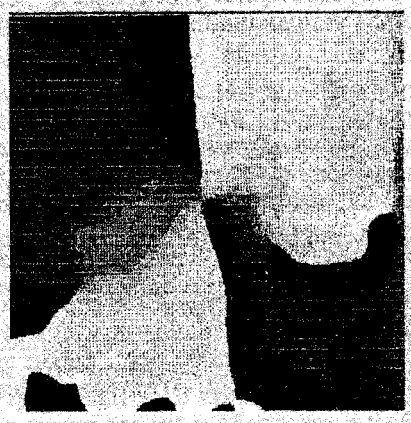


Рис. 5. Отфильтрованное поле направлений.

изображения. Теоретически важным является также предложенный способ нелинейной аппроксимации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Glutov N. I., Krainyukov N. I., Sergeev V. V., Khramov A. G. // Pattern Recognition and Image Analysis. 1991. Vol. 1, N 4. P. 423—425.*

Рукопись поступила 25.01.93