

Двухканальный подход к определению поля потоков дактилоскопических изображений

В. Ю. Гудков

В научной статье предложена концепция многослойной иерархической обработки изображений, в рамках которой разработан новый метод формирования поля потоков дактилоскопического изображения, относящийся к классу градиентных методов. Разработанная в рамках развиваемого подхода процедура базируется на параллельном сканировании изображения по светотеням, расслоении результатов сканирования по двум каналам и группировке потоков на основе алгоритма перколяционного типа.

Введение

Как известно, теоретическую базу современных систем цифровой обработки изображений (ЦОИ) составляют теория цифровой обработки сигналов и изображений, теория распознавания образов, теория вероятности, математическая статистика, дискретная математика, теория графов, теория множеств. При этом, однако, прямое применение классических методов для организации процесса анализа латентных дактилоскопических изображений (ДИ) — отпечатков пальцев и особенно следов, является весьма неэффективным и, как правило, не приводит к желаемым результатам. Комплексное решение всего спектра проблем, возникающих при построении высоконадежных быстродействующих систем, по существу требует создания специальных технологий обработки дактилоскопической информации, в рамках которых характер и уникальные особенности пространственно-топологической структуры и геометрии ДИ могут быть учтены оптимальным образом.

В статье раскрывается способ определения поля потоков ДИ, оригинальность которого обусловлена следующими положениями:

- 1) применение адаптивных процедур, синтезируемых в рамках принципов иерархической сегментации и многослойных преобразований ДИ;

- 2) использование при формировании поля потоков по светотеням практически любых направлений, а не небольшого множества их представителей;
- 3) внедрение специальных алгоритмов корреляционного типа на основе принципа параллельного сканирования;
- 4) включение в процесс анализа ДИ качественно новой процедуры перколяционного типа.

1. Постановка задачи

Изображения формируются в электронно-цифровом виде в результате ввода в компьютер с дактилокарт отпечатков пальцев и ладоней или их следов с другого твердого носителя. В дактилоскопии накоплен достаточно обширный эмпирический материал, формализация которого возможна далеко не полностью [5, 11].

Узоры на коже пальцев рук образуются папиллярными линиями. Почти параллельные между собой, они образуют на поверхности кожи *общие признаки* — узоры в виде петель, дельт, завитков и карманов [15], сочетание которых определяет тип узора. Наиболее употребительны дуговой, шатровый, правопетлевой, левопетлевой, завитковый и неопределенный типы узоров [5, 15].

Совокупность из нескольких папиллярных линий называется *поток*. Линии оканчиваются или начинаются, соединяются или расщепляются, образуя *частные признаки* (рис. 1). Продольные границы линий содержат микронеровности. Линии обычно утолщаются в местах расположения отверстий потовых канальцев, которые выделяются светлыми точками. На линиях в большом количестве наблюдаются микроразрывы, которые на некоторых отпечатках образуют пересекающие узор светлые штрихи [11].

Микроразрывы, микронеровности, межпапиллярные линии, случайные микродетали, поры, загрязнения вносят искажения при автоматическом построении поля потоков. Человек значительно лучше определяет истинное направление папиллярных линий, очевидно, за счет превосходства естественного интеллекта над искусственным. Отчасти это обусловлено бедностью и ограниченностью системы признаков в системах ЦОИ [10, 11].

В данной работе делается попытка обогатить и качественно улучшить систему признаков потоков на основе процедур корреляционного и перколяционного типов.



Рис. 1. Частные и общие признаки отпечатка пальца с ожогом выше завитка

Реализация процедур анализа ДИ опирается на специальные функции. Ясно, что целостные единицы информации, такие как байт, слово, диктуют доминирование градусов, а не радиан в качестве аргумента тригонометрических функций. Кроме того, главные значения обратных тригонометрических функций [8] не охватывают весь желаемый диапазон значений, например $0..359^\circ$. Наконец работа с векторами, в частности с их аргументами, требует отдельного рассмотрения. Поэтому для компактности формализмов вводятся обратная тригонометрическая $atan(x,y)$, масштабные тригонометрические $cot(\alpha)$ и $sit(\alpha)$ функции по формулам:

$$atan(x,y) = \frac{180}{\pi} \begin{cases} \arctan(y/x), & \text{если } x \geq 0 \& y \geq 0, \\ \pi - \arctan(y/|x|), & \text{если } x < 0 \& y \geq 0, \\ \pi + \arctan(|y|/|x|), & \text{если } x < 0 \& y < 0, \\ 2\pi - \arctan(|y|/x), & \text{если } x \geq 0 \& y < 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$cot(\alpha) = \cos(\alpha\pi/180), \quad (2)$$

$$sit(\alpha) = \sin(\alpha\pi/180). \quad (3)$$

2. Концепция многослойной иерархической обработки ДИ

Исходное изображение как статическое изображение представляется в виде $F = \{f(x,y) \in 0..2^b - 1 | (x,y) \in X \times Y\}$, где b — глубина изображения (8 для байта), $X = 0..x_0 - 1$ и $Y = 0..y_0 - 1$, а изображение определено в прямоугольной области G мощностью $|G| = x_0 y_0$ с сеткой $h_x = l_x / x_0$ и $h_y = l_y / y_0$, где l_x и l_y — длина области G по оси абсцисс и ординат соответственно [1, 9, 10, 12]. Примем равномерную сетку $h_x = h_y = h$. Тогда максимальное число реализаций ДИ равно $(2^b)^{|G|}$, где $|G|$ — мощность области определения. Этот объем содержит все многообразие изображений [2, 7].

Согласно принципу иерархической сегментации данных [7, 9] исходное изображение разбивают на $|G_h| = x_h y_h$ квадратных сегментов $S_h(x,y) \in X \times Y$ с длиной стороны 2^h точек и центрами $(u,v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h$, вершины сегментов как пирамид представляются в виде

$$F_h = \{f_h(x,y) \in 0..2^b - 1 | (x,y) \in X_h \times Y_h\},$$

где b — глубина изображения, $X_h = 0..x_h - 1$ и $Y_h = 0..y_h - 1$,

$$\begin{cases} \hat{X}_h = \{ \lfloor 2^{h-1} + x2^h \rfloor | x \in X_h \}, \\ \hat{Y}_h = \{ \lfloor 2^{h-1} + y2^h \rfloor | y \in Y_h \}, \end{cases} \quad (4)$$

$h \in 0..n$ — уровень иерархии или эшелона, к которой относятся сегменты ДИ, n — высшая иерархия; $x_h = \lceil x_0 / 2^h \rceil$ и $y_h = \lceil y_0 / 2^h \rceil$ — размер области определения h -й иерархии. Через $\lfloor a \rfloor$ обозначают целую часть вещественной величины a , символом $\lceil a \rceil$ обозначается наименьшее целое число, превышающее вещественную величину a .

Применяемый механизм сегментации может быть реализован посредством семейства взаимно-однозначных отображений: целочисленным величинам упорядоченных пар $(u,v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h \subset X \times Y$ ставят в

соответствие упорядоченные пары целочисленных величин координат $(x,y) \in X_h \times Y_h$. Доступ к каждой точке сегмента $S_h(x,y)$ записывается в координатах $(u,v) \in \bar{X}_h \times \bar{Y}_h$:

$$\begin{cases} \bar{X}_h = \{u + x2^h | x \in X_h \& u \in 0..2^h - 1\}, \\ \bar{Y}_h = \{v + y2^h | y \in Y_h \& v \in 0..2^h - 1\}. \end{cases} \quad (5)$$

Если рассматривается объединение всех сегментов иерархии h , используется обозначение S_h . Доступ к данным h -й иерархии 1-го слоя ДИ в общем случае записывается в координатах этой иерархии

$$F_h^{(1)} = \{f_h^{(1)}(x,y) | (x,y) \in X_h \times Y_h\} = \{f(x,y)\} = F.$$

В пределах каждой иерархии слоям присваивают свои символы (a, r, g, \dots) или номера $(0, 1, 2, \dots)$. Если верхние индексы метят семейство каким-либо образом связанных слоев, то они записываются вне скобок: $F_h^1 = \{F_h^{(d)1}\} = \{\{f_h^{(d)1}(x,y)\}\}$. Операция над $F_h^{(d)1} = F_h^{(d)1}$ справедлива для любого подмножества семейства F_h^1 .

Иерархическая сегментация может производиться для любого слоя произвольной иерархии. Тогда 1-й слой k -й иерархии $F_k^{(1)}$ разбивается на $x_h y_h$ квадратных сегментов $S_{h,k}^{(1)}(x,y)$ с длиной стороны 2^{h-k} и координатами $(x,y) \in X_h \times Y_h$, где $k \in 0..h-1$ — номер иерархии. Выделение необходимых точек сегмента производится аналогично. Так, например, как и в (5) доступ к каждой точке сегмента $S_{h,k}(x,y)$ записывается в координатах $(u,v) \in \bar{X}_{h,k} \times \bar{Y}_{h,k}$:

$$\begin{cases} \bar{X}_{h,k} = \{u + x2^{h-k} | x \in X_h \& u \in 0..2^{h-k} - 1\}, \\ \bar{Y}_{h,k} = \{v + y2^{h-k} | y \in Y_h \& v \in 0..2^{h-k} - 1\}. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом процесс анализа ДИ имеет многослойную иерархическую организацию (рис. 2), где слой $F_h^{(1)}$ — множество как структурированных, так и неструктурированных данных 1-го слоя h -й иерархии.

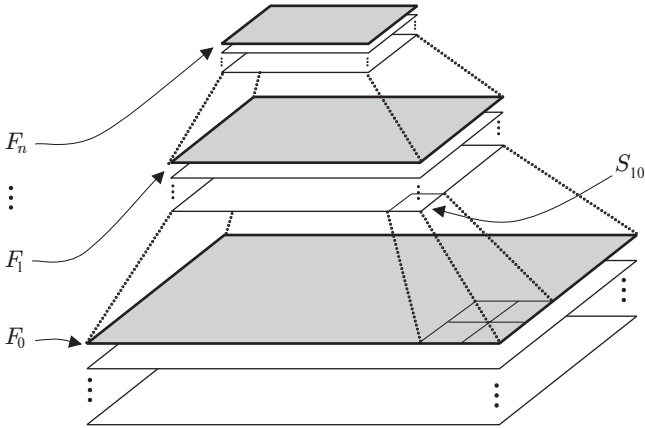


Рис. 2. Иерархическое разбиение слоев в пирамиде Э

Высота пирамиды задается величиной n , длина стороны самого большого сегмента равна 2^n . Множество сегментов образуют матрицы размерности $(2^k \times 2^k)$, $k \in 1..n$ и планигоны [7, 9].

Для математической формализации методов анализа ДИ широко применяется аппарат апертур, позволяющий компактно формализовать излагаемые методы. На основе (2, 3) ключевую роль играют прямолинейная щелевая $A_h(x, y, \alpha, w)$, точечная $A_h^0(x, y, \alpha, w)$, круговая $A_h(x, y, w)$, сегментная $A_h(x, y, a, b, w)$, дуговая $A_h^0(x, y, a, b, w)$ апертуры — множества точек слоя данных h -й иерархии и связанные с ними углы, определяемые по формулам:

$$\begin{cases} A_h(x, y, \alpha, w) = \{(u, v, \beta) = (x +]t \cot \alpha[, y +]t \operatorname{sit} \alpha[, \beta) | t \in Z_w\}, \\ A_h^0(x, y, \alpha, w) = \{(u, v, \beta) = (x +]t \cot \alpha[, y +]t \operatorname{sit} \alpha[, \beta) | t \in Z_w^0\}, \end{cases} \quad (7)$$

$$A_h(x, y, w) = \bigcup_{\alpha=0,359} A_h(x, y, \alpha, w), \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_h(x, y, a, b, w) = \bigcup_{\varphi=\overline{a,b}} A_h(x, y, \varphi, w), \\ A_h^0(x, y, a, b, w) = \bigcup_{\varphi=\overline{a,b}} A_h^0(x, y, \varphi, w), \end{cases} \quad (9)$$

где $(x,y) \in X_h \times Y_h$ — упорядоченная пара — центр апертуры;
 $(u,v) \in X_h \times Y_h$ — упорядоченная пара — точка апертуры; w — размер апертуры; $Z_w = 1..w$, $Z_w^0 = \{w\}$; α — направление щелевой или точечной апертуры в градусах, причем $0 \leq \alpha < 360$; через $]a[$ обозначается ближайшее к вещественной величине a целое число:

$$]a[= \begin{cases} \text{если } a \geq 0 \begin{cases} \lfloor a \rfloor, & \text{если } a < \lfloor a \rfloor + 0,5, \\ \lfloor a \rfloor + 1, & \text{если } a \geq \lfloor a \rfloor + 0,5, \end{cases} \\ \text{если } a < 0 \begin{cases} \lfloor a \rfloor, & \text{если } a > \lfloor a \rfloor - 0,5, \\ \lfloor a \rfloor - 1, & \text{если } a \leq \lfloor a \rfloor - 0,5; \end{cases} \end{cases}$$

β — угол в целочисленных градусах, определяющий направление из центра апертуры (x,y) в точку (u,v) апертуры по формуле

$$\beta =]atan(u - x, v - y)[.$$

Апертуры (7–9) компактно определяют множество упорядоченных троек (u,v,β) и позволяют однозначно представить кластерные операции в слоях пирамиды, например когда результаты какого-либо анализа в слоях одного эшелона выносятся на слои более высокого эшелона.

Апертуру (9) для сектора $\pm 45^\circ$ относительно направления $d \in 0..7$ можно развить:

$$A_h^d(x,y,w) = A_h(x,y,45(d+1),45(d-1),w). \quad (10)$$

Для реализации процедур движения по ДИ вводится формализм отношения

$$R = \{(x_d, y_d)\} = \{(1,0), (1,1), (0,1), (-1,1), (-1,0), (-1,-1), (0,-1), (1,-1)\}$$

полного строго порядка по $d \in 0..7$ — направлению движения, в котором элемент $(1,0)$ есть минимальный элемент, соответствующий направлению $d = 0$ (рис. 3).

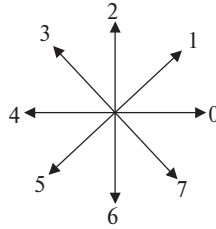


Рис. 3. Направления движений

Отношение R определяет функцию перехода $T_h^d(x,y)$ в h -й иерархии для направления d , описывающей синхронное смещение множества точек или одной точки

$$T_h^d(\{(x,y)\}) = \{(a,b) = (x + x_d, y + y_d) | (a,b) \in X_h \times Y_h\}. \quad (11)$$

Например, финальная позиция траектории рис. 4 записывается в виде

$$(u,v) = T_h^0(T_h^1(T_h^1(T_h^0(T_h^7(T_h^0(x,y)K))),$$

где (x,y) — стартовая позиция.

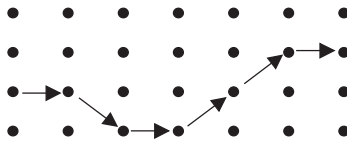


Рис. 4. Траектория для $\{d\} = \{0, 7, 0, 1, 1, 0\}$

В тексте через $(a) \bmod p$ обозначается остаток от деления целого числа a на натуральный модуль числа p , символом $D = 2^{b-1} - 1$ — середина шкалы по глубине изображения, $\text{MIN}(A)$ — минимальный элемент множества A .

На основе концепции (4–11) рассматривается коррекция входного изображения, сглаживание изображения, формирование слоев светотеней, измерение поля потоков.

3. Коррекция входного изображения

В большинстве современных систем обработки изображений (СОИ) в первую очередь производится нормализация изображений, у разных авторов по-разному [1, 2, 10, 12]. Начальным шагом является предварительное линейное растяжение исходного ДИ $F_0^{(0)} = \{f_0^{(0)}(x, y)\} = \{f(x, y)\} = F$ по яркости с целью обеспечения полного динамического диапазона по яркости:

$$f_0^{(1)}(x, y) = \left[\frac{(f_0^{(0)}(x, y) - f_{\min})(2^b - 1)}{f_{\max} - f_{\min}} \right],$$

где

$$f_{\min} = \min_{(x, y) \in X \times Y} \{f_0^{(0)}(x, y)\},$$

$$f_{\max} = \max_{(x, y) \in X \times Y} \{f_0^{(0)}(x, y)\}.$$

4. Сглаживание входного изображения

Данная процедура осуществляется при помощи двумерного фильтра с импульсной характеристикой [12] вида

$$H = [h(i, j)] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

согласно формуле двумерной дискретной свертки

$$f_0^{(2)}(x, y) = \left[\frac{1}{\|H\|} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 h(i, j) f_0^{(1)}(x + i, y + j) \right], \quad (12)$$

где $\|H\|$ — норма импульсной характеристики, $h(0, 0)$ — центральный элемент.

Полученный в результате операции препарат F_0^2 [12] располагается в другой области памяти. Этим обеспечивается анизотропная обработка ДИ, устраняющая артефакты [2, 4, 6, 14]. За норму принимается число

$$\|H\| = \sum_i \sum_j h(i,j). \quad (13)$$

Двумерную свертку (12) для всех точек слоя принято обозначать

$$F_0^{(2)} = H ** F_0^{(1)} = F_0^{(1)} ** H. \quad (14)$$

5. Формирование слоев светотеней

Слой $F_0^{(2)} = \{f_0^{(2)}(x, y)\}$ нулевой иерархии служит основой для формирования слоев светотеней $F_0^{(d+3)} = \{f_0^{(d+3)}(x, y)\}$ по формуле

$$f_0^{(d+3)}(x,y) = \left[\frac{1}{\|H^d\|} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 h^d(i,j) f_0^{(2)}(x+i, y+j) \right] + D,$$

где $\|H^d\|$ — норма в виде (13); d — направление засветки изображения и $d \in D = 0..3$; $h^d(i,j)$ — элементы квадратной матрицы $H^d = [h^d(i,j)]$. Здесь используются операторы Собела [12]:

$$H^0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$H^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H^2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \dots$$

Данные слоев $F_0^{(d+3)}$ трансформируются функцией

$$f_0^{(d+3)}(x,y) = L_n((f_0^{(d+3)}(x,y) - D)/f_{\max}) + D, \quad (15)$$

где

$$f_{\max} = \max_{(x,y) \in D} \{f_0^{(d+3)}(x,y)\},$$

L_n — интерполяционный многочлен (Лагранжа [8]) n -й степени (рис. 5), $L_n(0) \equiv 0$.

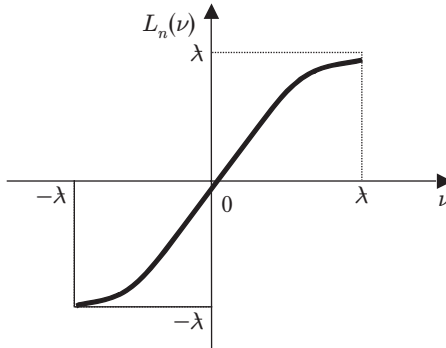


Рис. 5. График интерполяционного многочлена

6. Измерение поля потоков

По полученным слоям светотеней $F_0^{(d+3)}$ нулевой иерархии производится оценка потоков светотеней.

Определение 1. Скелетом папиллярной линии называется воображаемая непрерывная линия толщиной в одну точку, проходящая по центру папиллярной линии.

Определение 2. Поток называется касательная к скелету папиллярной линии на фрагменте ДИ, не имеющем частных и общих признаков.

За базовую оценку применяется метод локального адаптивного сканирования слоев (15) вдоль путей «света» и «тени». Выполняемая процедура для направления $d \in D = 0..3$ реализует отображение

$$\Gamma: \{S_h^{(d+3)}\} \rightarrow \{\{\Delta_h^k\}, \{\Lambda_h^k\}\},$$

где $S_h^{(d+3)} = \{S_h^{(d+3)}(u,v) | (u,v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\}$ — множество сегментов с центрами по (4) изображений $F_0^{(d+3)}$; $\Delta_h^k = [\delta_h^k(x,y)]$ — слои F_h как матрицы потоков «света» и «тени» на сегментах изображения S_h с углами $\delta_h^k(x,y)$ из промежутка $0..179$; $\Lambda_h^k = [\lambda_h^k(x,y)]$ — слои как матрицы показателей достоверностей Λ_h^k матриц потоков Δ_h^k ; h — номер иерархии; $k \in \{0,1\}$.

Заметим, что потоки характеризуются повышенной дробностью и инвариантностью к направлению δ и $\delta+180$.

При разрешении 500 dpi ДИ редко встречающиеся самые мелкие папиллярные линии (подростков или детей) имеют период 4 точки по оси абсцисс (3 точки на диагональных направлениях — предел разрешающей способности для папиллярных линий изображения). Поэтому базовыми выбраны сегменты S_2 размера 4×4 точек.

Расчет указанных матриц производится в пять этапов. Первые четыре этапа реализуются для $\forall d \in D$, четвертый этап дополнительно отображает результаты предшествующих операций в верхние эшелоны, пятый этап завершает реализацию отображения Γ для $\forall h \in H = 2..n$.

Первый этап. Целью первого этапа является определение стартовых точек. Для сегментов $S_h^{(d+3)}$ с центрами $\{(u,v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\}$ (4) иерархии $h=2$ выполняется перенос центральной точки в направлениях d и $\bar{d} = (d+4) \bmod 8$:

$$\begin{cases} \{(x^l, y^l)\} = \{A_0^0(u,v,45d,t) | (u,v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\}, \\ \{(x^r, y^r)\} = \{A_0^0(u,v,45\bar{d},t) | (u,v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\}, \end{cases}$$

где t — расстояние, на которое переносится точка ($t = 4$). Точка остается в центре (u, v) , если она выходит за пределы изображения. В результате на сегменте формируются две точки $p^l = (x^l, y^l)$ и $p^r = (x^r, y^r)$. В слоях $F_0^{(d+3)}$, начиная с вычисленной пары точек $\{p^l, p^r\}$, выделяются отсчеты, отвечающие последовательностям точек $\{p_i = (x_i, y_i)\}$ в направлении $s \in \bar{D}$, где $\bar{D} = \{(d+1) \bmod 8, (d+2) \bmod 8, (d+3) \bmod 8\}$. Выделенные отсчеты соответствуют четырем простым цепям на решетке. Цепи в процессе движения синтезируются независимо: две простые цепи от двух точек для «света» ($k = 0$) и две простые цепи от двух точек для «тени» ($k = 1$):

$$\begin{cases} P^{lk} = \{p_i^{lk} = (x_i^{lk}, y_i^{lk}) | i \in 0..q \& (x_0^{lk}, y_0^{lk}) = (x^l, y^l)\}, \\ P^{rk} = \{p_i^{rk} = (x_i^{rk}, y_i^{rk}) | i \in 0..q \& (x_0^{rk}, y_0^{rk}) = (x^r, y^r)\}, \end{cases}$$

где $k \in \{0, 1\}$; q — длина цепи.

Синтез четырех простых цепей для «света» и «тени» происходит независимо и определяется условиями

$$f_0^{(d+3)}(x_i, y_i) = \psi^k(f_0^{(d+3)}(u, v) | (u, v) \in T_0^s(x_{i-1}, y_{i-1})),$$

где

$$(\psi^k(a) | k = \overline{0, 1}) = (\max_{s \in \bar{D}}(a), \min_{s \in \bar{D}}(a)),$$

T_0^s — функция перехода по (11).

Альтернативно функцию перехода можно реализовать апертурой (10). На q -м шаге синтеза цепей фиксируются четыре позиции: две для «света» ($k = 0$) и две для «тени» ($k = 1$):

$$\begin{cases} p_q^{lk} = (x_q^{lk}, y_q^{lk}) \in P^{lk}, \\ p_q^{rk} = (x_q^{rk}, y_q^{rk}) \in P^{rk}. \end{cases}$$

Первый этап фиксирует на каждом сегменте для текущего направления d (как гипотезы) четыре позиции. Величина q выбирается опти-

мальной по критерию: рост q приводит к смещению общих признаков узора; уменьшение q снижает точность определения потоков из-за наличия на ДИ пор, складок, загрязнений...

Второй этап. Целью второго этапа является измерение параметров потоков на сегментах $S_n = S_2$. Зададим два множества из двух точек $P^k = \{p^{lk}, p^{rk}\}$, соответствующих двум точкам для «света» и двум точкам для «тени» на каждом шаге итерации, $k = \overline{0, 1}$. Расчет матриц сводится к выделению в слоях $F_0^{(d+3)}$ отсчетов, отвечающих последовательностям точек $\{p_i = (x_i, y_i)\}$ для $s \in \overset{\Delta}{D} = \{(d+5) \bmod 8, (d+6) \bmod 8, (d+7) \bmod 8\}$, причем $\overset{\Delta}{D}$ «зеркально» $\overset{\Delta}{D}$. Выделенные отсчеты соответствуют четырем простым цепям: две простые цепи для «света» ($k = 0$) и две простые цепи для «тени» ($k = 1$). Каждая пара цепей формируется как две копии с одной последовательности направлений:

$$\begin{cases} \overline{P}^{lk} = \{p_i^{lk} = (x_i^{lk}, y_i^{lk}) | i \in q..3q\}, \\ \overline{P}^{rk} = \{p_i^{rk} = (x_i^{rk}, y_i^{rk}) | i \in q..3q\}, \end{cases}$$

где $k = \overline{0, 1}$; $2q$ — длина цепи. Синтез двух разнесенных на решетке копий простых цепей для «света» и «тени» определяется условиями

$$\begin{aligned} f_0^{(d+3)}(x_i, y_i) = \\ = \psi^k \left(\sum_{(u,v)} f_0^{(d+3)}(u,v) | (u,v) \in T_0^s(\{(x_{i-1}, y_{i-1})\}) \& (x,y) \in P^k \right) \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$(\psi^k(a) | k = \overline{0, 1}) = \left(\max_{s \in D} (a), \min_{s \in D} (a) \right),$$

T_0^s — функция перехода по (11).

В соответствии с изложенным для определения потоков «света» и «тени» на сегменте $S_n^{(d+3)}(u,v)$ при рассматриваемых засветках ДИ (15) используются пары точек (p_q^{lk}, p_{3q}^{lk}) или (p_q^{rk}, p_{3q}^{rk}) нулевой иерархии. Свя-

занные с ними потоки $\delta_h^{(dk)}(x,y) \in F_2$ для заданного направления d определяются по (1):

$$\delta_h^{(dk)}(x,y) = \left] \text{atan}(x_q^{lk} - x_{3q}^{lk}, y_q^{lk} - y_{3q}^{lk}) \right[\text{mod } 180,$$

где $k \in \{0, 1\}$. Заметим, что выбор точек для расчета потоков из цепей \bar{P}^{lk} или \bar{P}^{rk} равнозначен в силу параллельности цепей. Показателем достоверности такого решения могут служить величины $\lambda_h^{(dk)}(x,y) \in F_2$

$$\lambda_h^{(dk)}(x,y) = \left[\frac{1}{q} \varphi^k \left(\sum_{i=q}^{3q} (f_0^{(d+3)}(x_i^{lk}, y_i^{lk}) - D), \sum_{i=q}^{3q} (f_0^{(d+3)}(x_i^{rk}, y_i^{rk}) - D) \right) \right],$$

где

$$(\varphi^k(a,b) | k = \overline{0, 1}) = (\min(a,b), \max(a,b)),$$

а $\lambda_h^{(dk)}$ по величине достаточно разнообразны: $\lambda_h \in 0..255$.

В результате из двух параллельных цепей выбирается цепь, начальная и конечная вершина которой определяет поток, достоверность которого находится как достоверность наихудшей цепи. Такой подход отражает свойства самого ДИ. Метод напоминает корреляцию параллельных цепей, синтезируемых в процессе движения по критерию (16). Без сглаживания (14) метод не работает (утверждение проверяется на ксерокопиях дактилокарт).

Третий этап. Целью третьего этапа является оптимизация параметров потоков на сегментах $S_h = S_2$ для заданного d . Измерения в направлении d в общем не совпадают с измерениями в противоположном направлении $\bar{d} = (d + 4) \text{mod } 8$. Поскольку такие направления равноправны, то логично выбрать для «света» и «тени» наилучшее по величине достоверности одно измерение из двух: по направлению d или по направлению \bar{d} :

$$\vartheta_h^k(x,y) = \arg \max_{\{d, \bar{d}\}} (\lambda_h^{(dk)}(x,y), \lambda_h^{(\bar{d}k)}(x,y)),$$

где $\vartheta_h^k(x,y) \in \{d, \bar{d}\}$, $k = \overline{0, 1}$. Опираясь на победителя в каждом сегменте, в вершины сегментов $S_h^{(d+3)}$ записываются собственно потоки

$$\delta_h^{(dk)}(x,y) = \delta_h^{(t_h^k(x,y)k)}(x,y) \quad (17)$$

и достоверности

$$\lambda_h^{(dk)}(x,y) = \lambda_h^{(t_h^k(x,y)k)}(x,y). \quad (18)$$

В результате в слоях $F_h = F_2$ для $k = \overline{0, 1}$ формируется две матрицы (как множество полного линейного порядка по кортежу (x,y)) потоков

$$\Delta_h^{(dk)} = \left[\delta_h^{(dk)}(x,y) \right] \quad (19)$$

и две матрицы достоверностей

$$\Lambda_h^{(dk)} = \left[\lambda_h^{(dk)}(x,y) \right]. \quad (20)$$

Четвертый этап. Это этап перколяции [3, 13] матриц потоков (19) с элементами (17) и достоверностей (20) с элементами (18) для заданного направления d с иерархии $h = \text{MIN}(H)$, $H = 2..n$, на более высокие иерархии. Процедура сводится к модели сложения векторов для «света» и «тени» с величинами модуля $\lambda_h^{(dk)}(x,y)$ и аргумента $2\delta_h^{(dk)}(x,y)$ для сегмента $S_{h+1,h}(x,y)$, в векторных пространствах по рекуррентным формулам

$$\lambda_{h+1}^{(dk)}(x,y) = \left[K \sqrt{\left(\text{re}_{h+1}^{(dk)} \right)^2 + \left(\text{im}_{h+1}^{(dk)} \right)^2} \right],$$

$$\delta_{h+1}^{(dk)}(x,y) = \left[\frac{1}{2} \text{atan}(\text{re}_{h+1}^{(dk)}, \text{im}_{h+1}^{(dk)}) \right],$$

где $k = \overline{0, 1}$ и используется разложение векторов по осям координат

$$\text{re}_{h+1}^{(dk)} = \sum_{(u,v \in \bar{G})} \lambda_h^{(dk)}(u,v) \cot(2\delta_h^{(dk)}(u,v)),$$

$$\text{im}_{h+1}^{(dk)} = \sum_{(u,v \in \bar{G})} \lambda_h^{(dk)}(u,v) \text{sit}(2\delta_h^{(dk)}(u,v));$$

иерархия $h \in 2..n-1$; $\bar{G} \in \bar{X}_{h+1,h} \times \bar{Y}_{h+1,h}$ — множество точек сегмента $S_{h+1,h}(x,y)$ (6); аргумент $\delta_h^{(dk)}(u,v) \in 0..179$ любого вектора при вычислении удваивается для расширения полуплоскости $[0,\pi)$ до плоскости $[0,2\pi)$, K — коэффициент нормировки векторов из \bar{G} :

$$K = \frac{\max_{(u,v) \in \bar{G}} \lambda_h^{(dk)}(u,v)}{\sum_{(u,v) \in \bar{G}} \lambda_h^{(dk)}(u,v)}.$$

Таким образом для $k = \overline{0,1}$ в каждой иерархии $h \in 2..n$ на выходе четвертого этапа формируется по две матрицы потоков

$$\Delta_h^{(dk)} = \left[\delta_h^{(dk)}(x,y) \right], \quad (21)$$

по две матрицы достоверностей

$$\Lambda_h^{(dk)} = \left[\lambda_h^{(dk)}(x,y) \right]. \quad (22)$$

Пятый этап. Целью пятого этапа является выбор локальных наиболее достоверных потоков на сегментах $S_h^{(d+3)}$ в слоях F_h . Формально алгоритм реализуется перебором направлений из $D = 0..3$ для иерархии $H = 2..n$ итерационно $h = \text{MIN}(H) \Rightarrow H = H \setminus \{h\}$ по формулам

$$v_h^k(x,y) = \arg \max_{d \in D} \lambda_h^{(dk)}(x,y),$$

$$\Delta_h^{(k)} = \left[\delta_h^{(k)}(x,y) \right] = \left[\delta_h^{(v_h^k(x,y)k)}(x,y) \right], \quad (23)$$

$$\Lambda_h^{(k)} = \left[\lambda_h^{(k)}(x,y) \right] = \left[\lambda_h^{(v_h^k(x,y)k)}(x,y) \right], \quad (24)$$

где $k = \overline{0,1}$; $v_h^k(x,y) \in D$ — направление-победитель для «света» ($k = 0$) и «тени» ($k = 1$) на соответствующем сегменте.

Потоки покрывают все многообразие ориентаций папиллярных линий $0..179$, так как d и \bar{d} по сути равноправны для $\forall d \in D$, а выбор производится среди (21) и (22). В результате для каждой иерархии $h \in H$ формируется 20 слоев: $\{\Delta_h^{(dk)}\}, \{\Delta_h^{(k)}\}, \{\Lambda_h^{(dk)}\}, \{\Lambda_h^{(k)}\}$, где $d = \overline{0..3}$, $k = \overline{0..1}$. Для пирамиды задействуются $20(n-2)$ слоя — носители развитой системы признаков потоков.

Заключение

В статье предложен способ измерения потоков ДИ, основанный на корреляции точек «света» и «тени» при параллельном сканировании препаратов ДИ. Такой подход позволяет разделить результаты статистического анализа на две условные группы или на два канала: канал «света» и «канал» тени. Это приводит к существенному обогащению пирамиды ДИ результатами измерений потоков по выдвигаемым гипотезам засветки ДИ, что позволяет в дальнейшем провести более качественный поиск по полю потоков (23, 24) с адаптацией на данных (21, 22) опорных зон общих признаков узора.

Литература

1. *Абламейко С. В., Лагуновский Д. М.* Обработка изображений: технология, методы, применение: Учебное пособие. Минск: Амалфея, 2000. 304 с.
2. *Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К.* Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая школа, 1983. 295 с.
3. *Гулд Х., Тобочник Я.* Компьютерное моделирование в физике: В 2 т. / Пер. с англ. В. А. Панченко, А. Н. Полюдова. М.: Мир, 1990. Т. 2. 400 с.
4. *Даджион Д., Мерсеро Р.* Цифровая обработка многомерных сигналов / Пер. с англ. В. А. Григорьевы / Под ред. Л. П. Ярославского. М.: Мир, 1988. 488 с.
5. *Корноухов В. Е., Анциферов В. К., Морозов Г. П.* и др. Дактилоскопическая экспертиза: современное состояние и перспективы развития / Под ред. Г. Л. Грановского. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1990. 416 с.
6. *Каппелини В., Константинодис А. Дж., Эмилиани П.* Цифровые фильтры и их применение / Пер. с англ. В. Н. Елисеева / Под ред. Н. Н. Слепова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
7. *Кондратьев В. В., Утробин В. А.* Основы теории активного восприятия изображений. Н. Новгород: НГТУ, 1997. 249 с.
8. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука, 1974. 831 с.

9. *Марр Д.* Информационный подход к представлению и обработке зрительных образов у человека. М.: Радио и связь, 1987. 402 с.
10. *Павлидис Т.* Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Пер с англ. Н. Г. Гуревич. М.: Радио и связь, 1986. 400 с.
11. *Полевой Н. С.* Криминалистическая кибернетика. М.: Изд-во МГУ, 1989. 328 с.
12. *Прэнт У.* Цифровая обработка изображений: В 2 т. М.: Мир, 1982, Т. 2. 480 с.
13. *Эфрос А. Л.* Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982. 176 с.
14. *Янин В. В.* Анализ и обработка изображений: Принципы и алгоритмы. М.: Машиностроение, 1994. 112 с.
15. *The Science of Fingerprint: Classification and Uses.* Washington: U. S. Government Printing Office, 1984. 211 p.