

УДК 681.3.06(082)

М.Ю. Селянинов, Ю.А. Чернявский

## СЕГМЕНТАЦИЯ ДАКТИЛОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*Рассматривается составной метод сегментации изображений отпечатков пальцев. Особенность предлагаемого метода состоит в совместном анализе градиентных характеристик и поля направлений потока папиллярных линий входного дактилоскопического изображения. Разработанный метод сегментации был проверен на большом количестве изображений отпечатков пальцев, полученных с разных носителей, и показал высокую эффективность и устойчивость.*

### Введение

При обработке изображений и распознавании образов часто возникает необходимость разделения информативной и фоновой областей входного изображения. Для этого на предварительном этапе обработки, состоящей из нескольких последовательных стадий, выделяется только та часть изображения, которая представляет интерес для дальнейшего анализа. Это значительно уменьшает временные затраты, обеспечивает экономию требуемых ресурсов и, соответственно, снижает стоимость системы в целом. Организация процесса сегментации изображений особенно важна в автоматизированных дактилоскопических информационных системах идентификации личности, сравнения отпечатков и системах ограничения доступа. Сложность автоматической сегментации дактилоскопических изображений (ДИ) обусловливается тем, что в реальности на входных изображениях отпечатков пальцев (ОП), получаемых как с бумажных носителей и пленок, так и с помощью «живых» сканеров, всегда присутствуют различного рода помехи и шумы. Вместе с тем реализуемый процесс сегментации должен обеспечивать максимальную независимость результатов обработки ДИ от типа входного изображения, его контрастности, нарушений потока папиллярных линий, имеющих место из-за наличия шрамов, загрязнений, смазов и других факторов.

Наиболее известные и простые методы сегментации ДИ основываются на анализе распределения полутоновых уровней яркости изображения с последующим использованием методов порогового разделения [1, 2]. Однако эти методы дают приемлемые результаты только для высококонтрастных изображений хорошего качества. Если же разность между уровнями яркости выделяемой информативной зоны и фона незначительно превосходит разброс в распределении уровней яркости, то использование только гистограммной обработки не позволяет достичь удовлетворительных результатов. Более сложные методы сегментации базируются на оценке среднего уровня яркости и его вариации для отдельных зон ДИ [3].

Предлагаемый в настоящей статье метод сегментации основан на совместном анализе градиентных характеристик изображения и поля направлений папиллярных линий входного ДИ. Экспериментальная проверка данного композиционного метода сегментации для различных по качеству исходных отпечатков показала, что он дает лучшие результаты по сравнению с сегментацией на основе яркостных характеристик ДИ.

### 1. Формирование поля градиентных характеристик и поля направлений потока папиллярных линий ДИ

Пусть задано входное ДИ  $F = \{f(i, j)\} (i, j) \in I \times J$ ,  $f(i, j) \in \{0, 1, \dots, 2^b - 1\}$ , где  $I = \{0, 1, \dots, N - 1\}$ ,  $J = \{0, 1, \dots, M - 1\}$ ;  $b$  – разрядность интенсивности (отсчетов сигнала сканера);  $N$  и  $M$  – параметры размерности  $N \times M$  изображения. Индекс  $i$  увеличивается сверху вниз (строка изображения), индекс  $j$  – слева направо (столбец изображения). Таким образом, точка ДИ  $f(0, 0)$  соответствует левому верхнему углу отпечатка.

На начальном шаге отделения фона выполняется сглаживание входного ДИ  $F$  с последующим линейным растяжением по яркости. Данная процедура осуществляется с помощью идеального кругового фильтра, реализующего алгоритм так называемого скользящего среднего, с дальнейшим повышением качества изображения на основе выравнивания его гистограммы. Получаемое в результате ДИ, как правило, обладает более высокой контрастностью, что позволяет с большей степенью гибкости и достоверности отделить неинформативную часть отпечатка [4, 5]. Как альтернатива скользящему среднему может использоваться скользящая медиана. Ее преимущество для сглаживания ДИ заключается в сохранении перепадов яркости и четких границ папиллярных линий.

Основу предлагаемого метода выделения информативной части ДИ составляют поточечные поля (массивы) градиентов  $G = \{g(i, j)\}_{(i, j) \in I \times J}$  и направлений  $D = \{d(i, j)\}_{(i, j) \in I \times J}$ , где  $g(i, j)$  – модуль градиента, а  $d(i, j)$  – локальное направление потока папиллярных линий в точке изображения  $(i, j)$ :

$$g(i, j) = \sqrt{\Delta_i^2 + \Delta_j^2};$$

$$\Delta_i = f(i+1, j) - f(i-1, j); \quad \Delta_j = f(i, j+1) - f(i, j-1).$$

Для представления направлений  $d(i, j) \in \{0, 1, \dots, v-1\}$  используются  $v$  одинаковых интервалов диапазона углов  $[0; \pi)$ ,  $\pi/v$  – выбираемый шаг дискретизации. Если в точке  $(i, j)$  направление оказывается неопределенным ( $g(i, j) = 0$ ) или же модуль градиента меньше некоторого выбранного порога, т. е.  $g(i, j) < T_g$ , то оно полагается равным  $v$ .

Таким образом,  $d(i, j) = \left\lfloor \frac{\alpha v}{\pi} \right\rfloor$ , где  $\alpha = \arctg \frac{\Delta_j}{\Delta_i} + \pi S(\arctg \frac{\Delta_j}{\Delta_i})$ , через  $\lfloor x \rfloor$  обозначается целая часть вещественного числа  $x$ ,  $S(x)$  – знаковая функция вида

$$S(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \geq 0; \\ 1, & \text{если } x < 0. \end{cases}$$

Ключевым элементом фоноотделяющей процедуры является сегментация кадра ДИ  $F$  на  $n \times m$  квадратных неперекрываемых фрагментов (участков) с длиной стороны  $l > 1$  точек, где  $n = \lceil N/l \rceil$ ,  $m = \lceil M/l \rceil$ , через  $\lceil x \rceil$  обозначается наименьшее целое число, не меньшее вещественной величины  $x$ . Сформированные поточечные массивы модуля градиента  $G$  и локальных направлений  $D$  служат основой для получения посегментных информационных слоев, обозначаемых соответственно через  $G_s = \{g_s(i_s, j_s)\}_{(i_s, j_s) \in I_s \times J_s}$  и  $D_s = \{d_s(i_s, j_s)\}_{(i_s, j_s) \in I_s \times J_s}$ , где  $I_s = \{0, 1, \dots, n-1\}$ ,  $J_s = \{0, 1, \dots, m-1\}$ . При этом каждый элемент массива  $G_s$  представляет собой размах (диапазон) значений модуля градиента в некоторой выбираемой окрестности сегмента, а массив  $D_s$  – посегментное поле направлений потока папиллярных линий.

Для формирования массива  $G_s$  используется квадратная апертура  $A(i_s^c, j_s^c; h_g \times h_g)$  с длиной стороны  $h_g$  точек и центром  $(i_s^c, j_s^c)$ , являющимся центральной точкой соответствующего сегмента:  $A(\alpha, \beta; h \times h) = \{x, y \mid -h/2 \leq x - \alpha \leq h/2, -h/2 \leq y - \beta \leq h/2\}$ . Тогда каждому сегменту соответствует число, равное разности максимального и минимального значений градиента в выбранной апертуре, т. е.  $g_s(i_s, j_s) = g_{\max} - g_{\min} + 1$ , где  $g_{\min} = \min_{A(i_s^c, j_s^c; h_g \times h_g)} (g(x, y))$ ,  $g_{\max} = \max_{A(i_s^c, j_s^c; h_g \times h_g)} (g(x, y))$ . Полученная матрица  $G_s$  подвергается сглаживанию, после чего осуществляется эквализация гистограммы и линейное растяжение значений  $g_s(i_s, j_s)$ ,  $(i_s, j_s) \in I_s \times J_s$ .

Для получения посегментного поля направлений  $D_s$  строится гистограмма  $Hist(d(i, j))$  распределения направлений с учетом величины градиента  $g(i, j)$ :

$$\text{Hist}(d(i, j)) = \sum_{(i, j)} \xi(i, j) g(i, j), \quad (i, j) \in A(i_s^c, j_s^c; h_d \times h_d),$$

где  $\xi(i, j) \in \{0, 1\}$  – двузначный признак, принимающий единичное значение, если направление в точке ДИ  $(i, j)$  совпадает с  $d(i, j)$ .

Оценочное направление  $d_s(i_s, j_s)$  определяется по максимальной сумме значений взвешенной гистограммы в  $(2l+1)$  соседних разрядах (центральному разряду соответствует анализируемое направление,  $l = 1, 2, \dots, \lfloor v/8 \rfloor$ ). Таким образом, выбранному сегменту присваивается

направление  $d_s(i_s, j_s) = \delta_s \in \{0, 1, \dots, v-1\}$ , для которого сумма  $Q = \sum_{\delta=|\delta_s-l|}^{|\delta_s+l|} \text{Hist}(\delta)$  максималь-

на, через  $|x|_p$  обозначается наименьший неотрицательный вычет по модулю  $p$ . Операция взятия вычета по модулю  $p$  при суммировании значений гистограммы необходима, так как индекс  $\delta \in \{0, 1, \dots, v-1\}$  закольцован, т. е. направление  $\delta_s - l < 0$  идентично направлению  $v + (\delta_s - l)$ , а направление  $(\delta_s + l) > v$  идентично направлению  $(\delta_s + l) - v$ .

Учет величины градиента позволяет исключить влияние той части изображения, которая не относится к границам папиллярных линий и не содержит достоверной информации о направлении потока линий в рассматриваемой окрестности. Средняя толщина линий (или впадин) на изображении ОП составляет приблизительно семь–девять точек при разрешающей способности сканера 500 точек на дюйм. Поэтому в квадратную апертуру с длиной стороны  $h_d = 15$  будет попадать, по крайней мере, одна линия (впадина). Это позволяет достоверно определить направление потока папиллярных линий на рассматриваемом сегменте. Точность детектирования направлений оказывает решающее влияние на ключевые качественные характеристики процедуры сегментации и всего процесса обработки ДИ [6–10].

## 2. Процедура оптимизации поля направлений

Полученная матрица направлений для уменьшения влияния шумов, обусловленных дефектами исходного ДИ различного характера, подвергается рекурсивному корректирующему преобразованию. При этом направление потока в каждом сегменте заменяется значением, подсчитанным с учетом значений направлений соседних сегментов в апертуре  $A(i_s, j_s; 5 \times 5)$ . Для этого строится матрица весовых коэффициентов

$$W_s = \{w_s(i_s, j_s)\}_{(i_s, j_s) \in I_s \times J_s},$$

$$\text{где } w_s(i_s, j_s) = \lfloor \frac{v}{2} - \frac{1}{24} \sum_{h_i, h_j=-2}^2 \left| \left| d_s(i_s, j_s) - d_s(i_s + h_i, j_s + h_j) \right|_v \right| \rfloor;$$

$|x|_p$  – абсолютно наименьший вычет, сравнимый с величиной  $x$  по модулю  $p$ ;

$\lfloor x \rfloor$  – приближенное значение величины  $x$ , формируемое по правилу

$$\lfloor x \rfloor = \begin{cases} \lfloor x \rfloor, & \text{если } x < \lfloor x \rfloor + 0,5; \\ \lceil x \rceil, & \text{если } x \geq \lfloor x \rfloor + 0,5. \end{cases}$$

Полученные значения весов усредняются по соседним элементам в апертуре  $A(i_s, j_s; 3 \times 3)$ :

$$\tilde{w}_s(i_s, j_s) = \left\lfloor \frac{1}{9} \sum_{h_i, h_j=-1}^1 w_s(i_s + h_i, j_s + h_j) \right\rfloor.$$

Коррекция посегментных направлений  $d_s(i_s, j_s)$ ,  $(i_s, j_s) \in I_s \times J_s$  заключается в вычислении нового направления, для которого сумма квадратов абсолютно наименьших отклонений от направлений соседних сегментов с учетом их весовых коэффициентов, т. е.

$$\sum_{h_i, h_j=-1}^1 w_s(i_s + h_i, j_s + h_j) \left( \left| d_s(i_s + h_i, j_s + h_j) - d_s(i_s, j_s) \right|_v \right)^2,$$

была бы минимальна. Скорректированное направление принимает значение

$$\hat{d}_s(i_s, j_s) = \left| d_s(i_s, j_s) + \delta_s(i_s, j_s) \right|_v,$$

где поправка  $\delta_s(i_s, j_s)$  вычисляется по формуле

$$\delta_s(i_s, j_s) = \frac{\sum_{h_i, h_j=-1}^1 w_s(i_s + h_i, j_s + h_j) \left| d_s(i_s + h_i, j_s + h_j) - d_s(i_s, j_s) \right|_v}{\sum_{h_i, h_j=-1}^1 w_s(i_s + h_i, j_s + h_j)}.$$

Данная процедура коррекции поля направлений относится к классу так называемых релаксационных процедур и позволяет значительно уменьшить влияние шумов [3, 11, 12]. При этом, благодаря высокой скорости сходимости, количество требуемых итераций чаще всего не превышает трех. Получаемое посегментное поле направлений  $D_s$  представляет собой матрицу сглаженных локальных ориентаций потока папиллярных линий ДИ.

### 3. Композиционный метод сегментации ДИ

Обозначим через  $B_s = \{b_s(i_s, j_s)\}_{(i_s, j_s) \in I_s \times J_s}$  и  $C_s = \{c_s(i_s, j_s)\}_{(i_s, j_s) \in I_s \times J_s}$  массивы, соответствующие сегментации исходного изображения по критериям, вытекающим из анализа полученных полей  $G_s$  и  $D_s$ . Процедура отделения фоновых участков с помощью массива  $G_s$  базируется на вычислении в апертуре  $A(i_s, j_s; 3 \times 3)$  максимального значения  $g_{\max} = \max_{A(i_s, j_s; 3 \times 3)} (g(x, y))$  и последующего его сравнения с задаваемым порогом информативности  $T_g$ , который подбирается экспериментальным путем. Таким образом, сегмент  $b(i_s, j_s) = \xi_s \in \{0, 1\}$  квалифицируется как кандидат в неинформационные сегменты, если двузначный признак  $\xi_s = 1 - S(g_{\max} - T_g)$  принимает нулевое значение.

Метод сегментации на основе анализа градиентных характеристик в задаваемой окрестности позволяет отделить на изображении области равномерной засветки, не содержащие потока папиллярных линий. В этом случае интервал значений модуля градиента очень мал (равен нулю в идеальном случае) и такие зоны на изображении легко отделяются с помощью пороговых методов. Вместе с тем градиентный метод нечувствителен к нарушениям потока папиллярных линий, так как модуль градиента имеет большие значения на их границах, и не позволяет локализовать на ДИ зашумленные зоны. Кроме того, данный метод плохо работает на низкоконтрастных и восстановленных изображениях.

Для преодоления отмеченных недостатков градиентного метода сегментации предлагается композиционный метод разделения фоновой и информативной частей ДИ. Ключевым эле-

ментом предлагаемого способа сегментации является анализ локальной гистограммы распределения направлений потока папиллярных линий в окрестности, размер которой соизмерим со средним межгребневым расстоянием ДИ. Резко выраженный пик на гистограмме направлений говорит о том, что рассматриваемый сегмент изображения попадает на равномерный поток папиллярных линий и однозначно может быть отнесен к информативной области отпечатка. Для сегментов ДИ, попадающих в сингулярные области (области интегральных признаков) и зоны с нарушением потока линий, характерен не столь ярко выраженный максимум или даже несколько всплесков на гистограмме. В этих случаях необходим дополнительный анализ гистограммных признаков, например таких, как энергия и дисперсия.

В соответствии с вышесказанным для сегментации ДИ на основе матрицы направлений  $D_s$  и классификации сегментов по принципу информативности предлагается следующая процедура.

На первом этапе поле направлений  $D_s$  преобразуется в поле  $\hat{D}_s$ , причем  $\hat{d}_s(i_s, j_s) = \left\lfloor \frac{d_s(i_s, j_s)}{k} \right\rfloor$ ,  $k \in \{3, 4\}$ . Это позволяет уменьшить количество базовых направлений потока папиллярных линий и более точно выделить приоритетное направление.

Строится гистограмма  $Hist(\hat{d}_s(i_s, j_s))$  в апертуре  $A(i_s, j_s; h_d \times h_d)$ , где  $h_d$  – параметр системы, отвечающий среднему межгребневому расстоянию. Анализ гистограммы для выделения информативных и фоновых сегментов базируется на последовательной проверке выполнения следующих условий:

1. Если максимум гистограммы превышает некоторый порог  $T_1$ , то сегмент относится к информативным,  $c_s(i_s, j_s) = 1$ .

2. Если разница между максимальным и минимальным значениями гистограммы меньше порога  $T_2$ , то сегмент считается фоновым,  $c_s(i_s, j_s) = 0$ .

3. Если сумма квадратов значений гистограммы больше порога  $T_3$ , то сегмент считается информативным,  $c_s(i_s, j_s) = 1$ ; в противном случае он относится к фоновым,  $c_s(i_s, j_s) = 0$ .

Пороги  $T_1, T_2, T_3$  определяются экспериментальным путем, параметр  $h_d$  апертуры обычно принимает значение из множества  $\{13, 15, 17\}$  для ДИ с разрешением 500 точек на дюйм.

Первый способ сегментации на основе анализа поля градиентных характеристик  $G_s$  дает хорошие результаты на контрастных изображениях высокого качества и плохо подходит для мало-контрастных ДИ или изображений, подвергшихся предварительной обработке. Вместе с тем второй способ сегментации не зависит от контрастности, так как опирается только на поле направлений  $D_s$ , однако имеет свои ограничения как в областях с близкими уровнями яркости, так и в областях, где лежат особые точки папиллярного узора. Эти зоны (зоны сингулярности) характеризуются тем, что в них происходит резкое изменение потока линий, т. е. при обходе особой точки по замкнутому контуру происходит разворот касательной к потоку. Совместное же применение двух способов сегментации позволяет преодолеть их недостатки при независимом использовании. Это позволяет отделить фоновую часть, а также локализовать на ДИ зашумленные участки с нарушением потока линий (шрамы, ожоги, смазы и т. п.) и исключить их из дальнейшей обработки, а также выделить на отпечатке сингулярные области для последующего определения типа папиллярного узора.

Композиционный метод сегментации на первом этапе предполагает использование градиентного метода. Затем сегменты, отнесенные к информативной части, анализируются с помощью гистограммы направлений. Таким образом, для сегментов результирующей матрицы информативности  $Q_s = \{q_s(i_s, j_s)\}_{(i_s, j_s) \in I_s \times J_s}$  выполняется условие: если  $b_s(i_s, j_s) = 0$ , то  $q_s(i_s, j_s) = b_s(i_s, j_s)$ , в противном случае  $q_s(i_s, j_s) = c_s(i_s, j_s)$ . Для достижения большей достоверности операции отделения фона над матрицей признаков  $Q_s$  классифицированных сегментов выполняется двухшаговая элементная пороговая обработка в апертуре  $A(i_s, j_s; 3 \times 3)$  по мажоритарному признаку. На первом шаге для сегментов  $q_s(i_s, j_s) = 1$  вычисляется новый признак информативности  $\xi_s = S(4 -$

$\sum_{A(i_s, j_s; 3 \times 3)} q_s(i_s, j_s)$ ). Сегмент  $q_s(i_s, j_s)$  будет отнесен к фоновым ( $\xi_s = 0$ ), если не менее четырех из окружающих сегментов являются кандидатами в неинформативные сегменты. На втором шаге рас-

считаются все сегменты  $q_s(i_s, j_s) = 0$ . Если не менее четырех из окружающих сегментов являются информативными, то и данный сегмент относится к информативной области изображения.

К полученной матрице признаков информативности  $Q_s$  применяется процедура регуляризации, состоящая в следующем. В множестве  $Q_s$  выделяется совокупность замкнутых контуров, содержащих единичные элементы и являющихся границами множеств, которые включают все единичные элементы матрицы  $Q_s$ . После этого все внутренние нулевые элементы наиболее мощного множества инвертируются, а элементы остальных выделенных множеств обнуляются. Кроме того, полученная информативная часть изображения наращивается на одноэлементный по толщине замкнутый контур.

На рис. 1, *а, в* показаны исходные изображения ОП, а на рис. 1, *б, г* – их информативные части соответственно.

*а)**б)**в)**г)*

Рис. 1. Изображения ОП и их информативные части

### Заключение

В статье предложен композиционный метод сегментации дактилоскопических изображений. Его главной составляющей является анализ локальной гистограммы распределения направлений потока папиллярных линий ОП в окрестности, размер которой соизмерим со средним межгребневым расстоянием на ДИ. Разработанный метод сегментации прошел детальную апробацию в автоматизированных дактилоскопических идентификационных системах на базах данных больших объемов (до 4 млн образцов ОП) и показал высокую продуктивность.

**Список литературы**

1. Хорн Б.К.П. Зрение роботов: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 487 с.
2. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / А.Н. Писаревский, А.Ф. Чернявский, Г.К. Афанасьев и др.; под общ. ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 424 с.
3. Методы, алгоритмы и программное обеспечение гибких информационных технологий для автоматизированных идентификационных систем: сб. науч. ст. / Отв. ред. А.Ф. Чернявский. – Мн.: БГУ, 1999. – 182 с.
4. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
5. Zhang W., Wang Y. Fingerprint image enhancement algorithm based on AM-FM model // 2 International Conference on «Image and Graphics». – Hefei, Aug. 16-18, 2002. – Pt 2. – P. 731–736.
6. Методы классификационного экспресс-анализа дактилоскопических изображений для верификационных систем / Н.А. Коляда, В.В. Ревинский, М.Ю. Селянинов, Ю.А. Чернявский // Электроника. – 2003. – № 4. – С. 38–40.
7. Ratha N., Chen S., Jain A. K. Adaptive flow orientation based feature extraction in fingerprint images // Pattern Recognition. – 1995. – Vol. 28. – № 11. – P. 1657–1672.
8. Trier O., Jain A. K. Goal-directed evaluation of binarization methods // IEEE Trans. Pattern Analys. and Machine Intell. – 1996. – Vol. 17. – № 12. – P. 1191–1201.
9. Градиентно-релаксационная технология формирования поля направлений для дактилоскопических изображений / В.И. Корзюк, А.А. Коляда, В.В. Ревинский и др. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2000. – № 1. – С. 117–122.
10. Градиентно-дисбалансная технология детектирования направлений для дактилоскопических изображений / А.А. Коляда, Н.А. Коляда, В.В. Ревинский, М.О. Тихоненко // Тез. докл. VII Междунар. конф. «Комплексная защита информации». – Раубичи, Беларусь, 25-27 фев., 2003. – Мн.: ОИПИ НАН Беларусі, 2003. – С. 104–106.
11. Kolyada A., Revinski V., Tikhonenko M. Direction field of fingerprint image and its optimization with the help of relaxation procedures // 16 Annales Academiae Pedagogicae Cracoviensis. Studia Mathematica III. – Krakow: Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej, 2003. – С. 101–105.
12. Коляда Н.А. Адаптивная процедура апостериорной волновой коррекции поля направлений для дактилоскопических идентификационных систем // Сб. мат. VIII Междунар. конф. «Комплексная защита информации». – Валдай, Россия, 23–26 марта, 2004. – Минск, 2004. – С. 101–103.

Поступила 17.01.05

*Научно-исследовательское учреждение  
«Институт прикладных физических проблем  
им. А.Н. Севченко» Белгосуниверситета,  
Минск, ул. Курчатова, 7  
e-mail: selyaninov@bsu.by*

**M.Yu. Selyaninov, Yu.A. Chernyavsky**

**SEGMENTATION OF DACTILOSCOPIC IMAGES  
IN AUTOMATIZED INFORMATION SYSTEMS**

A composite method of segmentation of fingerprint images is considered. The feature of a proposed method consists in the joint analysis of gradient characteristics and directional field of the papillary lines flow of input dactyloscopic image. The designed method of segmentation was tested for a large number of fingerprint images from different sources and has shown the high performance and stability.