

Фильтрация Цифровых Дактилоскопических Изображений

Гудков Владимир Юльевич

Челябинский Государственный Университет, Челябинск, Россия

Diana@Sonda.ru

Аннотация

В работе предлагается новый метод фильтрации дактилоскопических изображений, устойчивый к изменению ширины линий и просветов, рыхлости линий и другим дефектам изображения. Результатом фильтрации является бинарное изображение, по скелету которого определяют шаблон, используемый при идентификации личности.

Ключевые слова: Отпечаток пальца, килевидый фильтр, дактилоскопическое изображение.

1. ВВЕДЕНИЕ

В компьютеризированных системах (КС) идентификация изображений обычно выполняется после их обработки [1, 2]. Хотя преобразование Фурье является основой методов обработки изображений в частотной области, применение рядов Фурье для функций с локальными особенностями неэффективно [3, 4]. Связано это с тем, что базисная функция рядов Фурье – синусоида – является по природе гладкой и строго периодической функцией, определенной на бесконечности. Она фактически не в состоянии описывать произвольные сигналы. Вследствие этого возникла потребность в функциях, называемых вейвлетами [2, 4, 5]. Однако для фильтрации дактилоскопических изображений (ДИ) обычно применяют фильтр Габора [6]. К сожалению, он имеет недостатки, определяемые особенностями ДИ: изменяющийся период смежных линий, изменяющаяся ширина просветов между линиями и кривизна линий приводят к ошибкам фильтрации. На рис. 1 выделены окрестности общих признаков (завитка и дельты) и флексорной складки, в которых наблюдаются перечисленные особенности ДИ. Это приводит к увеличению ошибок идентификации личности [6] и вынуждает разработчиков КС применять новые методы фильтрации [7, 8].



Рис. 1 Изображение отпечатка пальца

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изображение как множество действительных чисел формируют в виде $F = \{f(x, y) | (x, y) \in X \times Y\}$ в прямоугольной области G мощностью $|G| = x_0 y_0$, где $X = 0..x_0 - 1$ и $Y = 0..y_0 - 1$. Структурно обработку изображения представляют в виде пирамиды \mathfrak{R} слоев из взаимосвязанных иерархий [5]. Сегментация l -го слоя k -й иерархии $F_k^{(l)}$ разбивает слой на $x_h y_h$ непересекающихся квадратных сегментов $S_{hk}^{(l)}(x, y)$ с длиной стороны 2^{h-k} и вершинами $(x, y) \in X_h \times Y_h$, где $k < h$ и h – номер иерархии; $X_h = 0..x_h - 1$ и $Y_h = 0..y_h - 1$. Доступ к каждой точке сегмента $S_{hk}(x, y)$ записывают в координатах $(u, v) \in \bar{X}_{hk} \times \bar{Y}_{hk}$:

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

Размер области h -й иерархии: $x_h = \left\lceil \frac{x_0}{2^h} \right\rceil$ и $y_h = \left\lceil \frac{y_0}{2^h} \right\rceil$, где

$\lceil a \rceil$ – наименьшее целое число, превышающее вещественную величину a . Для формализации методов классификационного анализа (КА) применяют аппарат апертур. Прямолинейные щелевые $A_h(x, y, \alpha, w)$ и $A_h^-(x, y, \alpha, w)$ апертуры как множества точек и углов в виде элементов упорядоченных троек (u, v, β) определяют по формулам:

$$\begin{cases} A_h(x, y, \alpha, w) = \{(u, v, \beta) = (x +]w_x[, y +]w_y[, \beta) | w \in Z_w\}, \\ A_h^-(x, y, \alpha, w) = \{(u, v, \beta) = (x +]w_x[, y +]w_y[, \beta) | w \in Z_w^-\}, \end{cases} \quad (2)$$

где $w_x = w \cos(\alpha)$ и $w_y = w \sin(\alpha)$; $(x, y) \in X_h \times Y_h$ – центр апертуры; $(u, v) \in X_h \times Y_h$ – точка апертуры; w – размер апертуры; множества $Z_w = 1..w$ и $Z_w^- = -w..-1 \cup 1..w$; α – угол направления апертуры; $\lceil a \rceil$ – ближайшая целая часть вещественного числа a . Угол, определяющий направление из центра (x, y) в точку (u, v) апертуры, находят в виде

$$\beta = \arctg\left(\frac{v - y}{u - x}\right) + \pi \text{ при } n \in 0..1.$$

Задача фильтрации опирается на специальные слои признаков, вычисленные на предшествующих стадиях обработки ДИ: качества $Q_h = [q_h(x, y)]$, меток сегментации $C_h = [c_h(x, y)]$, периодов линий $T_h = [t_h(x, y)]$, направлений $\Theta_h = [\theta_h(x, y)]$ и величин $V_h = [v_h(x, y)]$ кривизны линий. Иерархия h пирамиды \mathfrak{R} определяется алгоритмом сегментации.

3. ФИЛЬТРАЦИЯ

Изображение итерационно дифференцируют, сглаживают, а в финале бинаризуют. Для точек одного сегмента значения признаков, считываемых с вершины сегмента, рассматривают как константы. Обработку изображения в окрестности петель, дельт и завитков специализируют. Инициализация: $F_0^{(p)} = \{f_0^{(p)}(x, y)\} = F$, $F_0^{(b)} = \{f_0^{(b)}(x, y)\} = [0]$, где $F_0^{(p)}$ – слой фильтрованного ДИ; $F_0^{(b)}$ – слой бинарного ДИ. Номер итерации $j=1$.

3.1 Дифференцирование

Дифференцирование заключается в вычислении одномерной свертки, ориентированной по направлению кривизны линий, в точках оснований сегментов $\{S_h\}$. Введем набор углов дезориентации

$$A = \{\alpha, \alpha + \beta, \alpha - \beta\} \quad (3)$$

с опорным углом $\alpha = \theta_h(x, y)$, где $\theta_h(x, y)$ – направление кривизны линий, и углом отклонения в виде

$$\beta = \begin{cases} \beta_{\max} \frac{\varepsilon - d}{\varepsilon}, & \text{если } d \leq \varepsilon, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Здесь $d = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}$ – расстояние от отсчета $(x, y) \in X \times Y$ до ближайшего общего признака с координатами $(a, b) \in X \times Y$; ε – заданная окрестность общего признака; β_{\max} – наибольший угол отклонения апертур (до 60°). Вне окрестностей общих признаков $\beta = 0$.

Дифференцирование информативных сегментов с метками $c_h(x, y) \in \{1\}$ и качеством $q_h(x, y) \leq lev(j, q_{\max})$ сводится к расчету по формуле

$$f_0^{(b)}(x, y) = \begin{cases} f\left(\max_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y)\right), & \text{если } \min_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y) > 0, \\ f\left(\min_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y)\right), & \text{если } \max_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y) < 0, \\ f\left(\text{med}_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y)\right), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где $f^\alpha(x, y)$ – свертка в направлении $\alpha \in A$ по (3) в виде

$$f^\alpha(x, y) = \sum_{i=-w}^w h(i) \xi^\alpha(i);$$

элементы набора $\{\xi^\alpha(i)\}$ формируют перечислением величин, последовательно собираемых в отсчетах (u, v) прямолинейной целевой апертуры по (2) в виде

$$\{\xi^\alpha(i)\} = \{f_0^{(p)}(u, v) \mid (u, v) \in A_0^\alpha(x, y, \alpha, w) \vee (x, y)\}; \quad (5)$$

размер апертуры $w = \lceil k_1 t_h(x, y) \rceil$ ($k_1 = 0,7$ в реализации); $(x, y) \in F_0^{(p)}$ – центр апертуры; $lev(\dots)$ – функция уровня качества (рис. 2), зависящая от номера итерации j и лучшей оценки качества $q_{\max} = \max_{(x, y) \in X_h \times Y_h} q_h(x, y)$.

Ядро свертки для значений $t = \lceil k_2 t_h(x, y) \rceil$ ($k_2 = 0,5$ в реализации), показанное на рис. 3, вычисляют по формуле

$$\mathbf{H} = [h(i)] = [J_1^{-1}(i, m) - J_2^{-1}(i, n)], \quad (6)$$

где $-w \leq i \leq w$ – индекс элемента ядра свертки; m, n – обучаемые параметры обратных функционалов; функционалы

$$J_1(i, m) = \begin{cases} \left\{ k_3 \cos^m \left(90 \frac{i}{t} \right) - \bar{h} \right\}, & \text{если } -t \leq i \leq t, \rightarrow \{m\} \\ \{0\}, & \text{иначе} \end{cases}$$

и

$$J_2(i, n) = \begin{cases} \left\{ k_4 \cos^n \left(90 \frac{|i-t|}{t} \right) - \bar{h} \right\}, & \text{если } -t \leq i \leq t, \\ \left\{ k_5 \cos^n \left(90 \frac{|i-t|}{t} \right) - \bar{h} \right\}, & \text{иначе} \end{cases} \rightarrow \{n\};$$

коэффициенты $k_3 > k_4 > k_5$. Коэффициенты ядра свертки (6) рассматривают как центрированную случайную величину, получаемую вычитанием средней арифметической

$$\bar{h} = \frac{1}{2w+1} \sum_{i=-w}^w h(i).$$

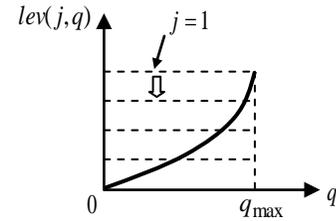


Рис. 2. Функция уровня качества

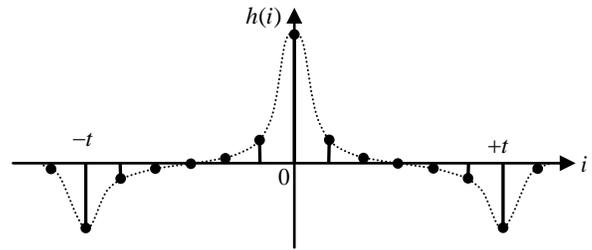


Рис. 3. Маска дифференциального фильтра

Функция уровня качества (см. рис. 2) в первой итерации разрешает фильтрацию всех информативных сегментов (верхняя пунктирная линия). С ростом номера j итерации ее значение уменьшается, а фильтрацию повторяют только для сегментов с качеством $q_h(x, y) \leq lev(j, q_{\max})$ (пунктирные линии смещают вниз). При этом маска фильтра цепляется за структуру изображения в соседних сегментах, что помогает лучше фильтровать дефектные сегменты [6].

Дифференциальный фильтр (см. рис. 3) детектирует фазу сигнала, а амплитуда отклика пропорциональна локальной контрастности ДИ. Маска фильтра обеспечивает вычитание взвешенных значений боковых отсчетов из взвешенных значений центральных отсчетов. Коэффициенты ядра свертки резко возрастают в центре апертуры и на расстоянии в половину периода от центра. Отклик фильтра усиливается для малых и ослабляется для больших значений сигнала. Это

приводит к уменьшению зависимости величины отклика фильтра от величины локального контраста изображения. Она еще более уменьшается в схеме итерационной фильтрации. На темных линиях отклик фильтра отрицателен, на просветах – положителен, а на ровном фоне – равен нулю. За счет килевидной формы маски фильтр корректно обрабатывает узоры с изменяющейся шириной линий и просветов, с размытыми краями линий, с рыхлыми линиями. Амплитуда отклика фильтра, в отличие от фильтра Габора [4, 7], устойчива.

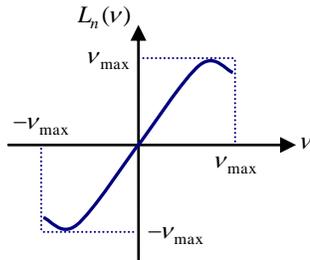


Рис. 4. Функция усиления откликов

На рис. 4 показана функция усиления $f(\cdot)$, используемая в формуле (4). Ее находят как интерполяционный многочлен L_n степени n при $L_n(0) \equiv 0$, который масштабируют наибольшим откликом фильтра

$$V_{\max} = \max_{(x,y) \in X \times Y} \sum_{i=-w}^w h(i) \xi^\alpha(i)$$

при $\alpha = \theta_h(x, y)$ и $\{\xi^\alpha(i)\}$ по (5). Усиление слабых и ослабление сильных сигналов позволяет аккумулировать отклики фильтра вблизи «горочки», отодвигая их от зоны насыщения. Так как края апертуры цепляются за соседние более хорошие сегменты, а величины откликов фильтра $f(\cdot)$ для различных сегментов соизмеримы, линии прогнозируют, а не копируют по подобию соседних сегментов (как при забеливании линии). Чем больше номер итерации j , тем сильнее эффект прогнозирования перпендикулярно линиям. Фактически фильтр меняет размерность, а в каждом блоке такого составного фильтра применяют уникальный период $t_h(x, y)$ (посегментно). Интерполяционный многочлен L_n обучают по качеству распознавания частных признаков.

На рис. 5 показаны апертуры для различных углов дезориентации из набора A по (3). Для отсчетов, попадающих в окрестность ε общих признаков, углы из набора A расходятся. Вблизи центра окрестности щелевые апертуры распределяются по окружности и понятие ориентации линий фактически исчезает. Эксперименты показали, что такой подход себя оправдывает. Вне окрестности ε равенство углов из A используют для ускорения процедуры.

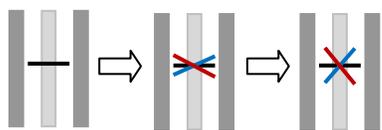


Рис. 5. Дезориентация щелевых апертур

Дифференциальный фильтр рассчитывают как составной блочный фильтр с переменными параметрами: коэффициентом усиления, величиной периода, кривизной и механизмом, компенсирующим изменение скажкости сигнала. Это сильно отличает дифференциальный фильтр от фильтра Габора [6] и Гаусса-Эрмита [3].

3.2 Сглаживание

Сглаживание в основаниях информативных сегментов с метками $c_h(x, y) \in \{1\}$ и качеством $q_h(x, y) \leq lev(j, q_{\max})$ (см. рис. 2) сводится к применению сглаживающего фильтра по формуле

$$f_0^{(p)}(x, y) = \begin{cases} \max_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y), & \text{если } \text{med}_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y) > 0, \\ \min_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y), & \text{если } \text{med}_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y) < 0, \\ f^\alpha(x, y), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (7)$$

где $f^\alpha(x, y)$ – одномерная свертка для направления $\alpha \in A$ по (3) или $\alpha = \theta_h(x, y)$ в виде

$$f^\alpha(x, y) = \mathbf{H} * \Xi_0^{(\alpha)}(x, y)$$

с ядром свертки \mathbf{H} и нормой $\|\mathbf{H}\|$ как суммой ее элементов; набор для отсчета (x, y) состоит из элементов вида

$$\Xi_0^{(\alpha)}(x, y) = \{\xi_0^{(\alpha)}(u, v)\}.$$

Элементы набора $\Xi_0^{(\alpha)}(x, y)$ считают из слоя $F_0^{(b)}$ прямолинейной щелевой апертурой по (2) в виде

$$\{\xi_0^{(\alpha)}(u, v)\} = \{f_0^{(b)}(u, v)\},$$

где $(u, v) \in A_0(x, y, \alpha_0, w) \vee A_0(x, y, \alpha_1, w) \vee (x, y)$; направления апертур для угла $\alpha \in A$ по (3) определяются направлением и величиной кривизны в виде

$$\alpha_0 = \alpha + 90 - \frac{1}{\kappa} v_h(x, y) \quad \text{и} \quad \alpha_1 = \alpha - 90 + \frac{1}{\kappa} v_h(x, y);$$

$v_h(x, y)$ – величина кривизны; κ – масштабный коэффициент кривизны (3–5 в реализации). Размер апертуры

$$w = \lceil k_6 t_h(x, y) \rceil$$

определяется периодом $t_h(x, y)$ и коэффициентом k_6 , причем $2w + 1 \leq t_h(x, y)$.

Элементы для набора $\Xi_0^{(\alpha)}(x, y)$ выбираются вдоль ломаной линии длиной $2w + 1$, ориентация и угол излома которой определяются направлением и величиной кривизны. В ядре свертки используется число элементов, не превышающее значение периода. Вектор \mathbf{H} может состоять из единиц или подчеркивать центральные элементы апертуры по экспоненциальному закону. Сортировка элементов здесь не применяется.

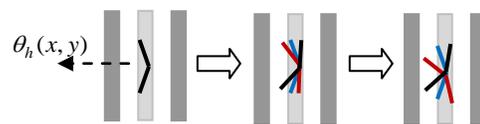


Рис. 6. Расхождение щелевых апертур

На рис. 6 показано расхождение углов ориентации щелевых апертур при движении к центру окрестности ε общих признаков, внутри которой углы из набора A по (3) расходятся. В центре окрестности понятие ориентации линий фактически исчезает. Вне окрестности ε равенство углов из A используют для ускорения процедуры.

В первой итерации в слой $F_0^{(p)}$ фильтруют все величины отсчетов из слоя $F_0^{(b)}$. На последующих итерациях края апертуры цепляются за соседние более хорошие сегменты. Происходит сглаживание вдоль линий и их прогноз. Чем больше номер итерации j , тем дальше прогнозируются линии по их длине с учетом их кривизны. Фактически фильтр меняет размерность, а в каждом блоке такого составного фильтра применяют период $t_h(x, y)$ (посегментно). Коэффициенты и ядро свертки \mathbf{H} фильтра обучают по качеству распознавания частных признаков.

Номер итерации инкрементируют, дифференцирование по (4) и сглаживание по (7) повторяют, пока $j \leq j_{\max}$.

3.3 Бинаризация

Бинаризация в основаниях всех информативных сегментов с метками $c_h(x, y) \in \{1\}$ сводится к применению дифференциального фильтра в модифицированном виде

$$f_0^{(b)}(x, y) = \begin{cases} b, & \text{если } \sum_{\alpha \in A} f^\alpha(x, y) \geq 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (8)$$

где $f^\alpha(x, y)$ – одномерная свертка для направления $\alpha \in A$ по (3) в виде

$$f^\alpha(x, y) = \sum_{i=-w}^w h(i) \xi^\alpha(i);$$

элементы набора $\{\xi^\alpha(i)\}$ формируют перечислением величин, собираемых последовательно в отсчетах (u, v) прямолинейной щелевой апертуры размером w по (5); множество $\{b, 0\}$ задает величину яркости просветов и линий; ядро свертки \mathbf{H} определяют по (6) (см. рис. 3).

На этом фильтрация ДИ заканчивается.

Итак, фильтрация выполняется на основе разделимой импульсной характеристики последовательным применением дифференциального и сглаживающего фильтров. Разнесение составных частей импульсной характеристики по этапам процедуры уменьшает количество отсчетов, задействованных в свертке, и в среднем не превышает числа 40 (для сравнения фильтр Габора размерностью 33×33 считывает 1089 точек [4, 6]). Временные характеристики фильтрации существенно улучшаются. В целом две части фильтра образуют составной блочный фильтр с параметрами: коэффициентом усиления, величиной периода, размером апертуры, направлением и величиной кривизны, механизмом, компенсирующим изменение скважности сигнала в локальном профиле изображения [1]. В окрестности общих признаков фильтр специализируют. Это дает преимущества КА в скорости, качестве и помехоустойчивости, недостижимые при использовании фильтра Габора. Первое дифференцирование ДИ и бинарное ДИ показаны на рис. 7.

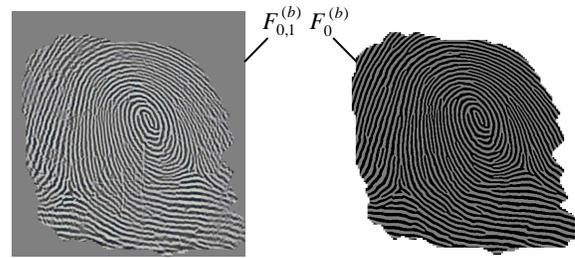


Рис. 7. Первое дифференцирование и бинарный слой

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен итерационный метод килевидной фильтрации ДИ, который в каждом сегменте опирается на оценку качества, период линий, направление и величину кривизны линий. Фильтрация развивается от «хороших» сегментов к «плохим», многократно на них повторяясь, а в окрестности общих признаков она специализируется. При синтезе разделимого импульсного отклика фильтра использованы следующие новые решения: 1) дифференциальный фильтр с килевидной характеристикой по уравнениям (3-6); 2) сглаживающий фильтр по уравнению (7); 3) фильтр бинаризации по (8), учитывающий только знак отклика дифференциального фильтра с килевидной характеристикой.

В дальнейшем планируется исследование задачи синтеза фильтра с маской, изогнутой по кривой 3 порядка.

5. ССЫЛКИ

1. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / Ю.В. Визильтер, С.Ю.Желтов, А.В.Бондаренко и др. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ.; под ред. П.А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
3. Крылов А.С. Метод моментов Гаусса-Эрмита для анализа изображений отпечатков пальцев / А.С. Крылов, Е.В. Лазарева, О.С. Ушмаев // Графикон: тр. конф. – М.: МГУ, 2008. – с. 31.
4. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, А.А. Пахомов, С.А. Никитин, Ю.В. Гуляев. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
5. Яне, Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне; пер. с англ. А.М. Измайловой. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
6. Maltoni D. Handbook of fingerprint recognition / D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar. – London: Springer-Verlag, 2009. – 496 p
7. Pat. 7194115 USA, Int. Cl. G06K 9/00, G05B 19/00. Fingerprint identification method and apparatus / U. Kaoru (Japan); NEC corporation. – Field: July. 26, 2001; Date of patent: Mar. 20, 2007; U.S.Cl. 382/124. – 26 p.
8. Pat. 7194393 USA, Int. Cl. G06F 17/10. Numerical model for image feature extraction / W. Xiangshu (Calif.), H. Ming (Calif.); Cogent Systems (Calif.). – Field: Jan. 19, 2006; Date of patent: Mar. 20, 2007; U.S.Cl. 703/2. – 16 p.

Об авторах

Гудков Владимир Юльевич – доцент Челябинского государственного университета. Его адрес: Diana@Sonda.ru.