

Способы математического описания и идентификации отпечатков пальцев

В. Ю. Гудков

В работе приводятся способы описания изображений отпечатков пальцев, достоинства и недостатки способов, концептуальные математические модели отпечатков пальцев. Выделяются ключевые проблемы описания. Приводятся методы идентификации по математическим моделям.

Введение

Способ описания дактилоскопического изображения (ДИ) в современных технологиях необходим для построения математической модели, адекватной исходному объекту в определенном смысле и обеспечивающей требуемые технические характеристики биометрической системы [28].

Изображения отпечатков пальцев в электронно-цифровом виде [1] формируются в результате сканирования полицейских дактилокарт с помощью планшетного сканера [11], ввода пальцев с «живого сканера» [30], фотографирования цифровым фотоаппаратом следов пальцев с фотопленки или другого твердого носителя [29, 30, 33]. Изображения состоят из линий, обычно темного цвета, являющихся отображением папиллярных линий и имеющих разнообразную форму, между которыми на некотором расстоянии друг от друга расположены отверстия потовых канальцев. Линии контрастно отделяются друг от друга бороздками. Почти параллельные между собой, папиллярные линии образуют на поверхности кожи узорчатые потоки — *общие признаки* — рисунки в виде петель, дельт, завитков и карманов [14, 15, 37]. Крупные две дельты и две петли хорошо видны на рис. 1. Сочетание общих признаков, как правило, определяет классификацию отпечатка по типам узоров [37], которых может быть

более десятка, как в системе Генри. Однако наиболее популярны дуговой, шатровый, правопетлевой, левопетлевой, завитковый, сложнзавитковый и неопределенный типы узоров [14, 30, 37]. Частично сформированные в процессе роста организма общие признаки узора называют ложными петлями, ложными дельтами или ложными завитками [14, 25]. Следует отметить сложность и неоднозначность критериев отличия общих признаков от их ложных собратьев [25, 37].

Папиллярные линии оканчиваются или начинаются, соединяются или расщепляются. Так образуются *частные признаки или особенности*: окончания и начала линий, соединения и разветвления линий. Такое разделение признаков условно [11]. Известны работы, в которых выделяется до 13 особенностей: окончание линии, расщепление линии, фрагмент, островок, точка, примыкание, мостик, крючок, дельта, пересечение, утроение линии, прерывание линии, другие признаки [2, 7]. Фактически это составные признаки, которые могут быть синтезированы комбинацией расщеплений и окончаний. Поэтому обычно для методов автоматического кодирования изображений выделяют два типа особенностей: *окончание и разветвление линии* [10, 30, 37], которые хорошо видны на рис. 2. Окончание и разветвление могут переходить одно в другое (мутировать) в зависимости от условий следообразования, состояния кожи и свойств следообразующего материала [30]. Количество особенностей сильно варьирует на различных ДИ.

Особенности ДИ могут быть распознаны непосредственно по исходному изображению (см. рис. 1) [30], однако простых методов, например морфологических преобразований [1], для этого явно недостаточно. По-



Рис. 1. Исходное изображение



Рис. 2. Бинарное изображение



Рис. 3. Скелет изображения



Рис. 4. Особенности узора

этому применяют следующие известные шаги [5, 9, 12, 13, 22, 24, 29, 30, 33, 34]:

- улучшение изображения,
- фильтрация улучшенного изображения,
- бинаризация фильтрованного изображения (см. рис. 2),
- скелетизация бинарного изображения (рис. 3),
- считывание особенностей со скелета изображения (рис. 4).

Дополнительной процедурой может быть измерение гребневого счета по бинарному изображению или по скелетному представлению узора [22, 30].

Сравнительная сложность указанных шагов объясняется требованиями к качеству математической модели ДИ [2, 28]. Сами эти требования возникают из-за всегда присутствующих следующих дефектов [12–14]: микронеровностей на продольных границах линий [15]; межпапиллярных линий; хаотично расположенных случайных микродеталей, возникающих из-за неоднородностей красителя и следовоспринимающего материала; потового покрытия и шелушения кожи; микроразрывов, возникающих из-за неровностей линий; кожных разрушений [25]; других.

Самое важное свойство отпечатков и следов пальцев заключается в том, что они обладают постоянством и индивидуальностью [28, 30, 37]. Их постоянство обусловлено тем, что папиллярные линии остаются неизменными на протяжении всей жизни человека. После поверхностных травм (царапин, легких ожогов, истертостей) линии восстанавливаются в прежнем виде со всеми своими характерными особенностями. Их индивидуальность основана на многообразии форм и взаимного расположения

мелких деталей папиллярных узоров [2, 14, 15, 30]. В мире одинаковых отпечатков пальцев не обнаружено, даже у однойцовых близнецов [28, 30]. Для установления тождества отпечатков пальцев и их следов в разных странах устанавливается минимально-допустимое число частных признаков (от 8 в Болгарии до 16 в Италии) [28]. Этот минимум определяется оценками надежности идентификации, которые в открытых публикациях, однако, сильно расходятся. В России тождество отпечатков пальцев считается доказуемым, если количество частных признаков равно или превышает число 12.

В настоящее время разработано множество математических моделей для доказательства индивидуальности узоров [31–36]. Большинство моделей устанавливают уникальность каждого отдельного узора [28]. Каждая из таких моделей нацелена на повышение эффективности идентификации человека, однако неизвестно ни одной лучшей и свободной от недостатков модели [28, 30].

Ясно, что дефектные элементы ДИ в математической модели отпечатков пальцев и их следов не учитываются, поскольку в модели должны использоваться устойчивые к шуму, грязи, сухости кожи и ее эластичному растяжению данные об общих и частных признаках узора [10, 22, 28].

1. Сопоставление

Алгоритм сопоставления имеет дело не с реальными биометрическими образцами, а с цифровыми изображениями или их шаблонами. Решение о степени сходства двух ДИ A_1 и A_2 или их шаблонов $T_1 = f(A_1)$ и $T_2 = f(A_2)$ без потери общности лежит в диапазоне 0–1, где f — функция вычисления шаблона. Под шаблоном понимается математическая модель биометрического образца, например набор особенностей, представленных координатами и углом направления. Большинство алгоритмов оперирует с шаблонами T_1 и T_2 , и только некоторые из них — непосредственно с серыми изображениями A_1 и A_2 . На рис. 5 представлены варианты блока, который вычисляет степень сходства и который принято называть мэтчером.

Известно [30], что сопоставление пары ДИ крайне сложная задача, главным образом из-за бесчисленного множества вариаций отпечатков

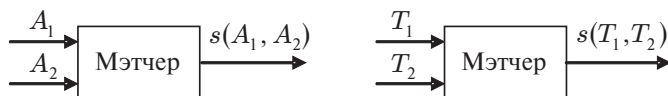


Рис. 5. Основные варианты мэтчеров

одного и того же пальца. Для сенсора эта проблема внутриклассовых различий обуславливается следующими причинами:

- один и тот же палец может располагаться в различных областях чувствительной поверхности сенсора;
- один и тот же палец может быть по-разному ориентирован на чувствительной поверхности сенсора;
- палец может частично выходить за пределы чувствительной поверхности сенсора, что критично для сенсоров с малой площадью воспринимающей поверхности;
- при соприкосновении пальца с воспринимающей поверхностью сенсора могут возникнуть эластичные деформации кожной поверхности пальца, что приводит к нелинейным деформациям ДИ;
- качество ДИ, поступающего на выход сенсора, сильно зависит от влажности и сухости кожи пальца, а также от силы прижатия пальца к чувствительной поверхности сенсора;
- на ДИ накладывается шум в виде жировых следов от предшествующих контактов пальцев с чувствительной поверхностью сенсора;
- несовершенство алгоритмов распознавания частных и общих признаков узора приводит к росту ошибок идентификации.

Проблема внутриклассовых различий иллюстрируется на рис. 6. Для полицейских дактилоскопических систем эта проблема еще многообразнее.

С другой стороны, ДИ или шаблоны различных пальцев могут быть сопоставлены с высокой степенью сходства. Эта уже проблема малых межклассовых различий. Особенно остро она проявляется при малом числе особенностей ДИ или их ограниченном описании: без гребневого счета между особенностями [30].



Рис. 6. Два изображения одного и того же пальца с одного сенсора

В последнее время предложено огромное количество алгоритмов сопоставления [2–5], [16–22], [30–36], большинство из которых успешно справляется с хорошими ДИ. Однако для реальных биометрических образцов задача сопоставления до сих пор является вызовом. Так в системах криминального назначения автоматическое кодирование следов отпечатков пальцев не представляется эффективным и требует вмешательства человека.

В целом все алгоритмы сопоставления ДИ или их шаблонов можно разбить на четыре большие группы:

- сопоставление изображений, основанное на различных модификациях корреляции многомерных сигналов;
- сопоставление шаблонов, основанное на характеристиках особенностей: координаты, угол направления, тип особенности (окончание и разветвление), вероятность наличия особенности, кривизна в окрестности особенности;
- сопоставление шаблонов, основанное как на характеристиках особенностей, так и на гребневом счете между особенностями;
- сопоставление шаблонов, основанное как на характеристиках особенностей, так и на топологических характеристиках особенностей.

Применение достоинств методов пороскопии для криминальных следов представляется малоэффективным. Использование общих признаков узора, как правило, ускоряет процедуру сопоставления, но только в частных случаях повышает точность идентификации.

2. Метод корреляции изображений

Для двух ДИ A_1 и A_2 , представленных 256-ю градациями серого цвета, степень сходства $s(A_1, A_2)$ может быть рассчитана на основе яркости пикселей ДИ с использованием операции транспонирования в виде

$$\begin{aligned} s(A_1, A_2) &= \|A_1 - A_2\|^2 = (A_1 - A_2)^T (A_1 - A_2) = \\ &= \|A_1\|^2 + \|A_2\|^2 - 2A_1^T A_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Если нормы $\|A_1\|$ и $\|A_2\|$ константы, различие между двумя ДИ минимизируется, когда кросс-корреляция

$$c(A_1, A_2) = A_1^T A_2 \quad (2)$$

максимизируется. Из-за смещений и вращений отпечатков пальцев степень сходства $s(A_1, A_2)$ оценить не просто.

Пусть $A_2^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}$ есть изображение, смещенное относительно A_2 на Δx и Δy точек и повернутое относительно центра A_2 на угол θ . Тогда на основе (рис. 1) усовершенствованная степень сходства

$$s'(A_1, A_2) = s(A_1, A_2^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}). \quad (3)$$

Прямое применение формулы (рис. 3) наталкивается на несколько серьезных проблем:

- нелинейные искажения одного и того же отпечатка пальца приводят к заметным различиям двух ДИ (см. рис. 6); даже локальные оценки степени сходства для фрагментов ДИ не позволяют уверенно оценить степень сходства двух ДИ в целом [30];
- состояние кожи, степень нажима пальца на чувствительную поверхность сенсора, различная толщина линий на различных ДИ одного и того же пальца не позволяют максимизировать кросс-корреляцию (рис. 2) для надежной идентификации;
- использование (рис. 3) приводит к недопустимо большим вычислительным затратам даже на средних изображениях размером 400×400 .

Существуют многочисленные попытки [23, 27, 30], пытающиеся устранить указанные недостатки. Это и предварительная фильтрация, и нормализация, и переход в частотную область на основе преобразования Фурье. Однако несмотря на это, метод корреляции изображений в настоящее время не рассматривается как самостоятельный метод сопоставления двух ДИ [9, 29, 30]. Таким образом, система признаков на основе серых точек ДИ в виде A_1 и A_2 в компьютерных технологиях находит узкое применение.

3. Сопоставление шаблонов особенностей

Это наиболее широко известный координатный метод сравнения [6], функционирующий по модели доказательства идентичности двух отпечатков пальцев в суде. Пусть каждому ДИ A_1 и A_2 функцией f вычисления шаблона поставлены в соответствие шаблоны $T_1 = f(A_1)$ и $T_2 = f(A_2)$ в виде

$$T_1 = \{m_i\}, \quad m_i = \{x_i, y_i, \theta_i\}, \quad i \in I = 1..m, \quad (4)$$

$$T_2 = \{m_j\}, \quad m_j = \{x_j, y_j, \theta_j\}, \quad j \in J = 1..n, \quad (5)$$

где m и n — количество особенностей на A_1 и A_2 соответственно; (x, y) — координаты особенности; θ — угол направления особенности. Фактически (рис. 4) и (рис. 5) есть способ простого и популярного описания ДИ [2, 3, 30].

Рассмотрим два комплекса, каждый из которых состоит из двух особенностей, в виде $m_i, m_k \in T_1$, $i \neq k$ и $m_j, m_g \in T_2$, $j \neq g$. Вычислим:

$$t(m_i, m_k) = \{d_{ik}, \beta_i, \beta_k, \beta_{ik}\}, \quad i, k \in 1..m, \quad (6)$$

$$t(m_j, m_g) = \{d_{jg}, \beta_j, \beta_g, \beta_{jg}\}, \quad j, g \in 1..n, \quad (7)$$

$$d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)(y_i - y_k)},$$

$$d_{jg} = \sqrt{(x_j - x_g)(y_j - y_g)},$$

$$\beta_i = \text{wize}(\alpha_{ki}, \theta_i),$$

$$\beta_k = \text{wize}(\alpha_{ik}, \theta_k),$$

$$\beta_j = \text{wize}(\alpha_{gj}, \theta_j),$$

$$\beta_g = \text{wize}(\alpha_{jg}, \theta_g),$$

$$\beta_{ik} = |\text{turn}(\beta_i, \beta_k)|,$$

$$\beta_{jg} = |\text{turn}(\beta_j, \beta_g)|,$$

$$\alpha_{ik} = \text{atan}(x_i - x_k, y_i - y_k),$$

$$\alpha_{ki} = \text{atan}(x_k - x_i, y_k - y_i),$$

$$\alpha_{jg} = \text{atan}(x_j - x_g, y_j - y_g),$$

$$\alpha_{gj} = \text{atan}(x_g - x_j, y_g - y_j),$$

где $t(.,.)$ — параметры комплекса; d_{ik} и d_{jg} — расстояния между особенностями в комплексах; $\beta_i, \beta_k, \beta_j, \beta_g$ — углы доворота направлений соответствующих особенностей до направления прямой, соединяющей эту особенность с другой особенностью комплекса; β_{ik} и β_{jg} — разности углов направлений особенностей в комплексах; $\alpha_{ik}, \alpha_{ki}, \alpha_{jg}, \alpha_{gj}$ — углы направлений из особенности m_k в m_i , m_i в m_k , m_g в m_j , m_j в m_g ; $\text{atan}(.,.)$ — функция вычисления угла в градусах. Здесь используется функция наименьшего угла поворота

$$\text{turn}(\alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha - \beta, & \text{если } |\alpha - \beta| \leq 180, \\ 360 \text{ sign}(\beta - \alpha) + \alpha - \beta, & \text{если } |\alpha - \beta| > 180, \end{cases} \quad (8)$$

функция поворота против часовой стрелки

$$\text{wize}(\alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha - \beta, & \text{если } \alpha - \beta \geq 0, \\ 360 + \alpha - \beta, & \text{если } \alpha - \beta < 0, \end{cases} \quad (9)$$

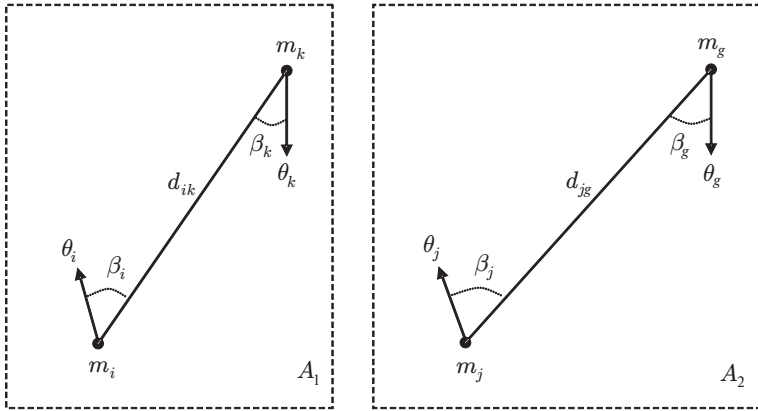


Рис. 7. Основные параметры двух пар особенностей из двух ДИ

где

$$\text{sign}(a) = \begin{cases} +1, & \text{если } a \geq 0, \\ -1, & \text{если } a < 0, \end{cases}$$

Комплексы из двух особенностей и их основные параметры показаны на рис. 7.

Обычно сопоставление шаблонов сводится к поиску наибольшего количества пар «родных» особенностей в группе $G_i \in G$, $G_i = \{(m_i, m_j)\}$, $i \in I$, $j \in J$. Предварительно $G_i = \emptyset \quad \forall i \in I$.

Сравним каждый комплекс особенностей из A_1 с каждым комплексом особенностей из A_2 . Вычислим:

$$\Delta t(m_i, m_k, m_j, m_g) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta d_q < \kappa_1 \wedge \Delta \beta_q < \kappa_2 \wedge \Delta \beta_{ij} < \kappa_3 \wedge \Delta \beta_{kg} < \kappa_4, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\Delta d_q = |d_{ik} - d_{jg}|,$$

$$\Delta \beta_q = |\text{turn}(\beta_{ik}, \beta_{jg})|,$$

$$\Delta \beta_{ij} = |\text{turn}(\beta_i, \beta_j)|,$$

$$\Delta \beta_{kg} = |\text{turn}(\beta_k, \beta_g)|,$$

где $q \in 1..mn$ — количество возможных пар комплексов; Δd_q — рассогласование расстояний между особенностями в комплексах; $\Delta \beta_q$ — рассогласование разностей углов направлений особенностей в комплексах; $\Delta \beta_{ij}$ — рассогласование углов направлений особенностей m_i и m_j в предположении, что эти особенности соответствуют друг другу; $\Delta \beta_{kg}$ —

рассогласование углов направлений особенностей m_k и m_g в предположении, что эти особенности соответствуют друг другу; $\text{tugn}(\dots)$ — по (рис. 8); $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$ — настраиваемые коэффициенты, определяющие, могут ли два комплекса быть признаны подобными. Это правило может быть реализовано любым другим способом, в том числе и линейным разделяющим правилом.

Если $\Delta t(m_i, m_k, m_j, m_g) \equiv 1$, то два комплекса особенностей могут быть признаны подобными и группа $G_i \in G$ пополняется по формулам:

$$\begin{aligned} \exists i \in I(m_i, m_j) \in G_i \wedge \exists i \in I(m_k, m_g) \in G_i &\rightarrow G_i = G_i \cup (m_i, m_j) \cup (m_k, m_g), \\ \exists i \in I(m_i, m_j) \in G_i \wedge \exists i \in I(m_k, m_g) \in G_i &\rightarrow G_i = G_i \cup (m_k, m_g), \\ \exists i \in I(m_i, m_j) \in G_i \wedge \exists i \in I(m_k, m_g) \in G_i &\rightarrow G_i = G_i \cup (m_i, m_j). \end{aligned}$$

Суть этой операции заключается в том, что означенные особенности из разных шаблонов объявляются соответствующими друг другу (см. рис. 7). В противном случае группы парами особенностей не пополняются, и проверяется другое условие в предположении, что комплексы могут соответствовать друг другу в перевернутом состоянии. Если $\Delta t(m_i, m_k, m_g, m_j) \equiv 1$, то два комплекса особенностей могут быть признаны подобными и группа $G_i \in G$ пополняется по модифицированным формулам:

$$\begin{aligned} \exists i \in I(m_i, m_g) \in G_i \wedge \exists i \in I(m_k, m_j) \in G_i &\rightarrow G_i = G_i \cup (m_i, m_g) \cup (m_k, m_j), \\ \exists i \in I(m_i, m_g) \in G_i \wedge \exists i \in I(m_k, m_j) \in G_i &\rightarrow G_i = G_i \cup (m_k, m_j), \\ \exists i \in I(m_i, m_g) \in G_i \wedge \exists i \in I(m_k, m_j) \in G_i &\rightarrow G_i = G_i \cup (m_i, m_g). \end{aligned}$$

После проведения mn таких операций группы G_i формируются разной мощности, величина которой зависит от того, какие комплексы первыми были объединены в группу. Степень сходства двух ДИ рассчитывается по формуле

$$s(A_1, A_2) = \frac{\max_{i \in I} |G_i|}{\kappa_5 n + \kappa_6 m}, \quad (10)$$

где $|G_i|$ — мощность группы; κ_5, κ_6 — настраиваемые коэффициенты. В целом вариантов расчета степени сходства двух ДИ на основе особенностей много [4, 29–31], в том числе и методы, основанные на смещении и повороте $A_2^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}$ по аналогии с (рис. 3). Поскольку оценка степени сходства производится по разностям координат и углов, повышается устойчивость оценки (рис. 10) к аффинным преобразованиям ДИ.

Следует отметить известные преимущества этого метода:

- нелинейные искажения одного и того же отпечатка пальца не приводят к фатальному изменению результата сопоставления;
- локальные изменения фрагментов ДИ, обусловленные состоянием кожи или степенью нажима пальца на чувствительную поверхность сенсора, не изменяют существенно оценку (рис. 10);
- результаты сопоставления значительно в меньшей степени зависят от смещений и поворотов ДИ;
- вычислительные затраты при сопоставлении двух ДИ существенно экономичнее метода корреляции изображений.

Основной критикой метода сопоставления шаблонов, содержащих только особенности, является недостаточно высокая надежность и избирательность идентификации шаблонов, что приводит к неоправданно высокому проценту пропуска истинных ДИ и появлению ложных ДИ в рекомендательном списке систем криминального назначения. В [28] представлены предельные теоретические оценки надежности идентификации по 12 особенностям ДИ, которые катастрофически ухудшаются при росте ошибок распознавания особенностей. Улучшить эти оценки на основе только геометрических данных в настоящее время не представляется возможным [2, 3, 7, 14, 28, 30, 36]. Заметим, что человек [8, 26] также не считает особенности единственной и основной опорной информацией при распознавании ДИ.

4. Сопоставление шаблонов особенностей и гребневого счета между особенностями

Это стандартное применение метрических характеристик ДИ, используемое для доказательства идентичности двух отпечатков пальцев. Пусть каждому ДИ A_1 и A_2 функцией f вычисления шаблона поставлены в соответствие шаблоны $T_1 = f(A_1)$ и $T_2 = f(A_2)$ в виде (рис. 4) и (рис. 5). Для каждой особенности выделяется некоторая окрестность, в которой до соседних особенностей измеряется гребневый счет $\{r_{ik}\}$ от особенности m_i до особенностей $\{m_k\}$ изображения A_1 как количество папиллярных линий, пересекаемых прямой, проводимой между двумя особенностями. В результате для особенности m_i строится гнездо N_i (рис. 8) как система признаков в виде

$$N_i = \{m_k, r_{ik}, \gamma_{ik}\}, \quad m_k = \{x_k, y_k, \theta_k\}, \quad i, k \in I = 1..m. \quad (11)$$



Рис. 8. Гребневый счет для одной особенности

Аналогично для особенности m_j изображения A_2 строится гнездо N_j в виде

$$N_j = \{m_g, r_{jg}, \gamma_{jg}\}, \quad m_g = \{x_g, y_g, \theta_g\}, \quad j, g \in J = 1..n. \quad (12)$$

Здесь γ_{ik} — угол доворота вектора направления особенности m_i до направления от этой особенности до особенности m_k ; γ_{jg} — угол доворота вектора направления особенности m_j до направления от этой особенности до особенности m_g .

Сопоставление двух шаблонов сводится к сравнению гнезд из различных шаблонов. При этом в области ясного отпечатка пальца регистрируют особенности с определением их координат, направления, типа и гребневого счета между особенностями, особенности сопоставляемых шаблонов сравнивают и формируют матрицу совместности пар особенностей, из которой вычлняют наилучшую однозначную комбинацию идентичных особенностей из сопоставляемых шаблонов. Здесь доступны все достоинства предшествующего метода сопоставления шаблонов на основе особенностей, но добавляется новая метрика — гребневый счет — которая не зависит от смещений, поворотов, линейных и нелинейных деформаций ДИ.

Так в [16] описывается способ кодирования отпечатка папиллярного узора, заключающийся в определении для каждой особенности вектора направления и координат, типа особенности, вектора и величины кривизны папиллярных линий в окрестности особенности, масштабной характеристики в окрестности особенности, расстояния и гребневого счета от особенности до остальных особенностей узора, встречающихся в порядке вращения условного вектора вокруг особенности, начиная с вектора направления самой особенности, и углов, которые образуются между

вектором направления особенности и условным вектором при встрече условного вектора с очередной особенностью. Подобные описания ДИ рассматриваются в [7, 29–31, 33, 34].

Основные достоинства этого метода:

- повышенная надежность и избирательность идентификации шаблонов, что приводит к снижению вероятности пропуска истинных ДИ и появления ложных ДИ в рекомендательном списке систем криминального назначения;
- гнездовое описание (рис. 11), (рис. 12) с применением гребневого счета повышает устойчивость идентификации ДИ при частичном совмещении рисунка узоров;
- локальные дефекты поверхности кожи пальца слабо влияют на результаты сопоставления шаблонов;
- результаты сопоставления шаблонов практически не зависят от смещений и поворотов ДИ;
- вычислительные затраты при сопоставлении двух шаблонов экономичнее сопоставления шаблонов, содержащих только особенности.

Главными недостатками этого способа являются [17, 19, 21]:

- низкая точность измерения гребневого счета в области петель, дельт и завитков;
- невозможность измерения гребневого счета вдоль линий при расположении особенностей на одной или соседних линиях;
- невозможность точного измерения гребневого счета в области кручения линий.

5. Сопоставление шаблонов особенностей и топологических векторов особенностей

Это развитие методов описания ДИ на основе гребневого счета с целью повышения качества и скорости сопоставления шаблонов. На узоре в информативной области выделяют линии и образованные ими особенности типа окончаний и разветвлений. Особенности нумеруют и для каждой особенности определяют угол направления и координаты. В результате каждому ДИ A_1 и A_2 функцией f вычисления шаблона ставятся в соответствие шаблоны $T_1 = f(A_1)$ и $T_2 = f(A_2)$ в виде (рис. 4) и (рис. 5).

Рассмотрим формирование топологических векторов [17, 19].

От каждой особенности проводят проекции (пунктиром) вправо и влево перпендикулярно углу направления особенности на соседние линии (рис. 9). Затем выбирается одна особенность и от нее проводится

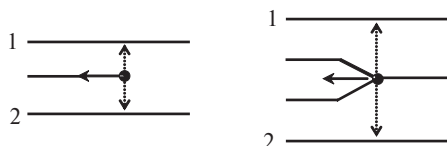


Рис. 9. Вектора направлений и проекции от окончания и разветвления

вправо и влево сечение на глубину q линий перпендикулярно касательной к каждой пересекаемой линии. Каждая линия сечением разрезается на две части, которые называются связями. Нумеруют полученные в сечении связи по часовой стрелке (рис. 10 и рис. 11). Для q равным четырем окончание имеет семнадцать связей, а разветвление имеет девятнадцать связей. Обычно величина q выбирается в диапазоне 2–8. Способ нумерации связей позволяет сохранить монотонность роста номеров связей при произвольном изменении глубины сечения q .

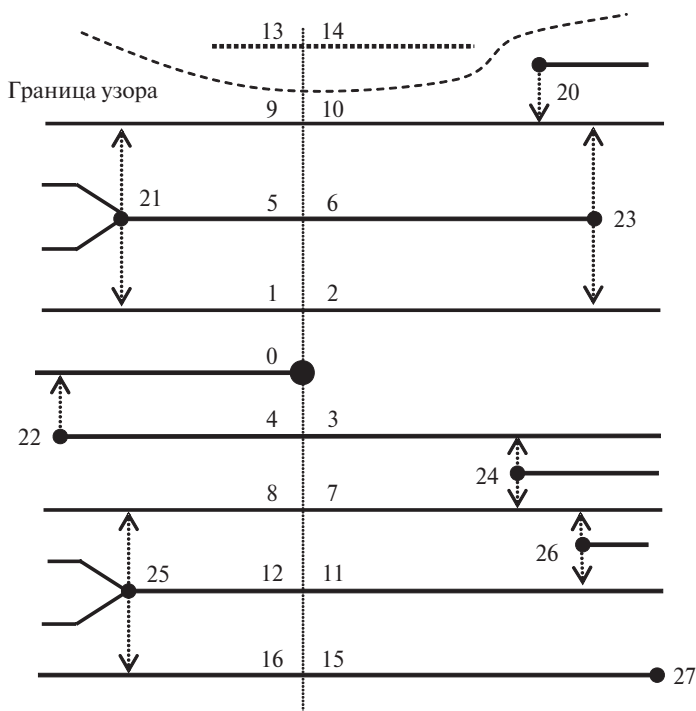


Рис. 10. Сечение для окончания

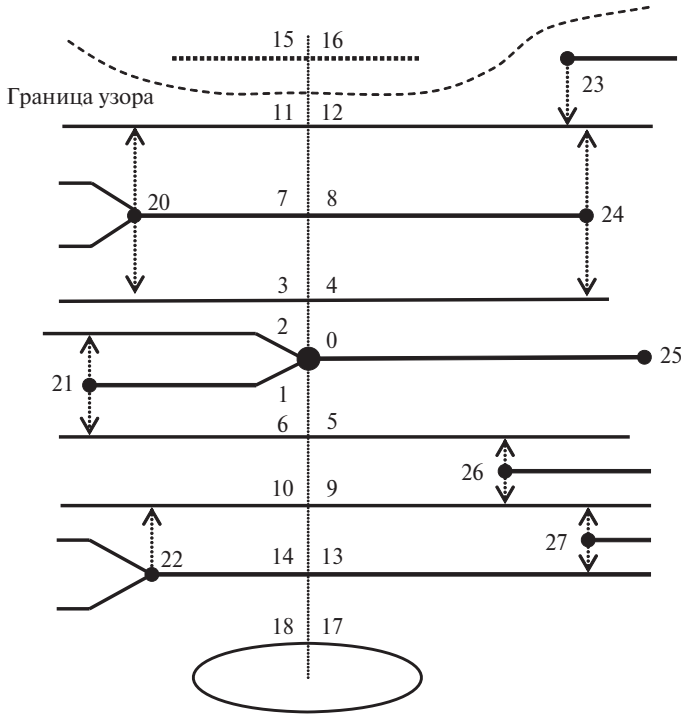


Рис. 11. Сечение для разветвления

После нумерации связей в сечении особенности строят топологический вектор. Для этого поочередно по каждой связи прослеживают ход связи, не сходя со связи и двигаясь от сечения линии до встречи с другой особенностью, расположенной на линии, или с проекцией от другой особенности, зафиксированной на соседней линии справа или слева от связи, и запоминают номер этой особенности. За границей узора нет особенностей, что отмечается специальным кодом события. В двоичном коде определим следующие события:

0000 — особенность или проекция от особенности на связи не обнаружены из-за отсутствия линии в области неинформативного узора;

1101 — на связи обнаружена проекция от окончания, расположенного справа от связи по ходу прослеживания связи, вектор направления окончания ориентирован навстречу ходу по связи;

1001 — на связи обнаружена проекция от окончания, расположенного справа от связи по ходу прослеживания связи, угол направления окончания ориентирован по ходу по связи;

1110 — на связи обнаружена проекция от окончания, расположенного слева от связи по ходу прослеживания связи, угол направления окончания ориентирован навстречу ходу по связи;

1010 — на связи обнаружена проекция от окончания, расположенного слева от связи по ходу прослеживания связи, угол направления окончания ориентирован по ходу по связи;

0101 — на связи обнаружена проекция от разветвления, расположенного справа от связи по ходу прослеживания связи, угол направления разветвления ориентирован навстречу ходу по связи;

0001 — на связи обнаружена проекция от разветвления, расположенного справа от связи по ходу прослеживания связи, угол направления разветвления ориентирован по ходу по связи;

0110 — на связи обнаружена проекция от разветвления, расположенного слева от связи по ходу прослеживания связи, угол направления разветвления ориентирован навстречу ходу по связи;

0010 — на связи обнаружена проекция от разветвления, расположенного слева от связи по ходу прослеживания связи, угол направления разветвления ориентирован по ходу по связи;

1111 — окончание обнаружено на связи, угол направления окончания ориентирован навстречу ходу по связи;

0011 — разветвление обнаружено на связи, угол направления разветвления ориентирован по ходу по связи;

0111 — разветвление обнаружено на связи, образованной линией, касательная к которой образует минимальный угол при повороте угол направления разветвления на связи против часовой стрелки;

1011 — разветвление обнаружено на связи, образованной линией, касательная к которой образует минимальный угол при повороте угол направления разветвления на связи по часовой стрелке;

1100 — особенность или проекция от особенности не обнаружена, а связь по линии замыкается (кольцо на рис. 11).

Опишем топологический вектор отдельной особенности. С каждым событием ассоциируется номер особенности, а с событием 0000 и 1100 ничего не ассоциируется. Если особенность имеет укороченное сечение (край узора), то события, упорядоченные по связям, не отличаются от событий для топологического вектора с полностью определенным сечением, но на отсутствующих связях событиям присваивают код 0000 и с ними не ассоциируют номера особенностей. Связанные воедино событие и номер особенности образуют пару. Для каждой связи, таким образом, существует пара. Упорядоченные в сечении по номерам связей пары представляют топологический вектор.

Таблица 1

Номер связи	Событие	Номер особенности
0	1111	25
1	1111	21
2	1110	21
3	0001	20
4	1110	24
5	1001	26
6	1101	21
7	0011	20
8	1111	24
9	1010	26
10	0010	22
11	0010	20
12	1010	23
13	1010	27
14	0011	22
15	0000	–
16	0000	–
17	1100	–
18	1100	–

Для окончания на рис. 10 топологический вектор представлен в табл. 1.

Для разветвления на рис. 11 топологический вектор представлен в табл. 2.

Действия по построению топологического вектора выполняются для всех особенностей узора. Несколько более упрощенное построение топологического вектора без проекций от особенностей и без искривления сечения в соответствии с изменением направления линий представлено в [32, 35, 36]. Более развитое построение топологического вектора, опи-

Таблица 2

Номер связи	Событие	Номер особенности
0	1110	22
1	0001	21
2	1110	23
3	1001	24
4	1111	22
5	0011	21
6	1111	23
7	1010	24
8	0010	25
9	0010	21
10	1010	20
11	1010	26
12	0011	25
13	0000	–
14	0000	–
15	1111	27
16	0001	25

сывающего не только особенности, но и линии между особенностями, представлено в [21]. Нечто подобное оценивает и человек [26].

Таким образом, шаблоны T_1 и T_2 дополняются топологическими векторами вида

$$V_i = \{(n_k, e_k)\}, \quad m_k = \{x_k, y_k, \theta_k, t_k\}, \quad i, k \in I = 1..m, \quad (13)$$

$$V_j = \{(n_g, e_g)\}, \quad m_g = \{x_g, y_g, \theta_g, t_g\}, \quad j, g \in J = 1..n, \quad (14)$$

где m_k и m_g — особенности с типами t_k и t_g из шаблонов T_1 и T_2 ; n_k и n_g — номера особенностей m_k и m_g ; e_k и e_g — события для особенностей m_k и m_g .

Сопоставление шаблонов производится [18, 20] сравнением топологических векторов из шаблонов, построением списка пар подобных

топологических векторов, параллельном развитии фрагментов на узорах от каждой пары подобных топологических векторов из списка методом перехода от одной пары подобных топологических векторов к другой по пути наилучшего сравнения топологических векторов, выбором лучшей оценки развития фрагментов узоров

Отметим преимущества этого способа кодирования ДИ:

- классический гребневый счет здесь определяется по номеру связи в топологическом векторе;
- события порождают дополнительную уникальную информацию, не получаемую из классического гребневого счета;
- топологический вектор за счет искривления сечения точно строится в области петель, делът и завитков;
- гребневый счет точно измеряется вдоль линий при расположении особенностей на одной или соседних линиях;
- топологический вектор точно строится в области кручения линий.

6. Заключение

В работе коротко рассмотрены основные методы математического описания отпечатков пальцев и возможные методы идентификации ДИ по самим изображениям или соответствующим шаблонам. Отмечены достоинства и недостатки рассмотренных математических моделей ДИ. Описание методов широко опирается на патентные материалы, что подчеркивает высокую изобретательскую активность производителей программного обеспечения.

Литература

1. *Абламейко С. В., Лагуновский Д. М.* Обработка изображений: технология, методы, применение: учебное пособие. Минск: Амалфея, 2000. 304 с.
2. А. с. 138095 СССР, МКИ G 06 K 9/00. Способ автоматического сравнительного исследования дактилоскопических отпечатков / Л. Г. Эджубов, С. А. Литинский. № 701272/31; заявл. 17.01.59; опубл. 18.09.61, Бюл. № 9. 9 с.
3. А. с. 251961 СССР, МКИ G 06 K 9/00. Устройство для кодирования дактилоскопических отпечатков / П. М. Чеголин, И. А. Чадович, С. А. Дюжева. № 1237900/18–24; заявл. 08.05.68; опубл. 13.01.70, Бюл. № 28. 8 с.
4. А. с. 271922 СССР, МКИ G 06 K 9/00. Устройство для автоматического опознавания пальцевых узоров / А. М. Кукинов, О. А. Оганов. № 1213420/18–24; заявл. 29.01.68; опубл. 26.05.70, Бюл. № 18. 8 с.
5. А. с. 1652984 СССР, МКИ G 06 K 9/00. Способ формирования признаков при распознавании изображений объектов / Г. Е. Баскин, В. И. Гордиенко, Л. С. Королюк, Б. П. Русын. № 4468868/24; заявл. 01.08.88; опубл. 30.05.91, Бюл. № 20. 9 с.

6. *Афанасьев А. Н.* Системы технического зрения для определения координат топологических элементов изделий РЭА: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск: Изд-во ИжГУ, 1993. 17 с.
7. *Эджубов Л. Г., Карпухина Е. С., Мяснянкина В. Н. и др.* Банк данных детального описания папиллярных узоров // Сб. науч. ст. под ред. Л. Г. Эджубова. М.: ИЦ МВД РФ, 2002. С. 304–311.
8. *Блум Ф.* Мозг, разум и поведение. М.: Мир, 1988. 248 с.
9. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
10. *Гудков В. Ю.* Автоматическое детектирование общих признаков дактилоскопических изображений // Информационно-аналитические аспекты в задачах управления: труды ИСА РАН / Под ред. член-корр. РАН В. Л. Арлазарова и д. т. н. проф. Н. Е. Емельянова. М.: Издательство ЛКИ/URSS. С. 338–355.
11. *Гудков В. Ю.* Методы первой обработки дактилоскопических изображений. Миасс: Геотур, 2008. 127 с.
12. *Гудков В. Ю.* Новая технология формирования скелетов дактилоскопических изображений // Методы, алгоритмы и программное обеспечение гибких информационных технологий для автоматизированных идентификационных систем: сб. науч. ст. / Под ред. акад. БАН А. Ф. Чернявского и д. т. н. В. В. Ревинского. Минск.: Изд-во БГУ, 1999. С. 71–82.
13. *Гудков В. Ю.* Способ распознавания дактилоскопических изображений // Труды XXIII Российской школы: сб. науч. ст. Миасс: МНУЦ, 2003. С. 92.
14. *Корноухов В. Е., Анциферов В. К., Морозов Г. П.* Дактилоскопическая экспертиза: современное состояние и перспективы развития / Под ред. Г. Л. Грановского. Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1990. 416 с.
15. *Мионов А. И.* Исследование микрорельефа папиллярных линий. М.: ВНИИ МВД СССР, 1970. 20 с.
16. Пат. 2054197 Российская Федерация, МПК G 06 K 9/46. Способ кодирования отпечатка папиллярного узора / В. Л. Шамаков. № 5061547/09; заявл. 03.09.1992; опубл. 10.02.1996. 9 с.
17. Пат. 2185660 Российская Федерация, МПК G 06 K 9/52. Способ кодирования отпечатка папиллярного узора / В. Ю. Гудков, А. С. Боков. № 2000118065/09; заявл. 07.07.2000; опубл. 20.07.2002; Бюль. № 20. 13 с.
18. Пат. 2185661 Российская Федерация, МПК G 06 K 9/62. Способ сравнения папиллярных узоров пальцев / В. Ю. Гудков, А. С. Боков. № 2000121735/09; заявл. 14.08.2000; опубл. 20.07.2002; Бюль. № 20. 11 с.
19. Пат. 2298828 Российская Федерация, МПК G 06 K 9/52. Способ кодирования отпечатка папиллярного узора / В. Ю. Гудков, А. С. Боков. № 2005132146/09; заявл. 17.10.2005; опубл. 10.05.2007; Бюль. № 13. 10 с.
20. Пат. 2305317 Российская Федерация, МПК G 06 K 9/62. Способ сравнения папиллярных узоров / В. Ю. Гудков, А. С. Боков. № 2005132145/09; заявл. 17.10.2005; опубл. 27.04.2007; Бюль. № 24. 12 с.
21. Пат. 2321057 Российская Федерация, МПК G 06 K 9/52, A 61 B 5/117. Способ кодирования отпечатка папиллярного узора / В. Ю. Гудков. № 2006142831/09; заявл. 04.12.2006; опубл. 27.03.2008; Бюль. № 9. 13 с.
22. *Полевой Н. С.* Криминалистическая кибернетика. М.: Изд-во МГУ, 1989. 328 с.
23. *Прикладная статистика: классификация и снижение размерности: справ. изд. / Под ред. С. А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.*
24. *Садыхов С. С.* Скелетизация бинарных изображений // Зарубежная радиоэлектроника. 1985. № 10. С. 30–37.

25. *Самищенко С. С.* Атлас необычных папиллярных узоров. М.: Юриспруденция, 2001. 320 с.
26. *Хьюбел Д.* Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 237 с.
27. *Чукин Ю. В.* Структуры данных для представления изображений // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 8. С. 35–47.
28. *Bolle R. M.* Guide to biometrics / R. M. Bolle, J. Y. Connel, S. Pankanti, N. K. Ratha. New York: Springer-Verlag, 2004. 368 p.
29. Fingerprint identification system / Ko Asai, Yukio Hoshino, Naoki Yamashita, Seiichi Hiratsuka // Second USA—JAPAN computer conference. Tokio, 1975. P. 30–33.
30. *Maltoni D.* Handbook of fingerprint recognition / Davide Maltoni, Dario Maio, Anil K. Jain. New York: Springer-Verlag, 2003. 348 p.
31. Pat. 4646352 USA, Int. Cl. G 06 K 9/68. Method and device for matching fingerprints with precise minutia pairs selected from coarse pairs / K. Asai, H. Izumisawa, K. Owada, S. Kinoshita (Japan); NEC Corporation. Field: Jun. 28, 1983; Date of patent: Feb. 24, 1987; U.S. Cl. 382/5. 44 p.
32. Pat. 4817183 USA, Int. Cl. G 06 K 9/00. Fingerprint recognition and retrieval system / Malcolm K. Sparrow (Winchester). Field: Apr. 1, 1987; Date of patent: Mar. 28, 1989; U.S. Cl. 382/4. 50 p.
33. Pat. 4947443 USA, Int. Cl. G 06 K 9/00. Method and apparatus for verifying identity / Brendan D. Costello (England). Field: Oct. 28, 1988; Date of patent: Aug. 7, 1990; U.S. Cl. 382/125. 13 p.
34. Pat. 5321765 USA, Int. Cl. G 06 K 9/00. Method and apparatus for verifying identity / Brendan D. Costello (England). Field: Jan. 21, 1992; Date of patent: Jun. 14, 1994; U.S. Cl. 382/4. 14 p.
35. Pat. 5631971 USA, Int. Cl. G 06 K 9/00. Vector based topological fingerprint matching / Malcolm K. Sparrow (Winchester). Field: Jul. 15, 1994; Date of patent: May. 20, 1997; U.S. Cl. 382/125. 17 p.
36. *Sparrow M. K.* A topological approach to the matching of single fingerprints: development of algorithms for use on latent finger marks // US dep. comer. nat. bur. stand. spec. pub. 1985. № 500–126. 61 p.
37. The science of fingerprint: classification and uses. Washington: U. S. Government Printing Office, 1984. 211 p.