

Тополого-Геометрическая Модель Изображения Отпечатка Пальца

Гудков Владимир Юльевич, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия
diana@sonda.ru

Ушмаев Олег Станиславович, Институт проблем информатики, Москва, Россия
oushmaev@ipiran.ru

Аннотация

В работе предлагается топологическая модель изображения отпечатка пальца, в состав которой входят геометрические и топологические характеристики окрестностей частных признаков. От известных модель отличается тем, что содержит длины отрезков папиллярных линий. Топологическая модель сохраняется в шаблоне изображения. Идентификация изображений выполняется по шаблону.

Ключевые слова: топологические векторы, события, длина связи, идентификация отпечатка пальца.

1. ВВЕДЕНИЕ

Обычно идентификация дактилоскопических изображений (ДИ) выполняется на основе шаблонов [2]. Их базис составляет описание частных признаков, которые могут быть детектированы по серому изображению, однако простых методов для этого явно недостаточно [3, 6, 7]. Поэтому при построении шаблона, как правило, опираются на скелет, показанный на рис. 1. При классическом подходе в шаблоне дополнительно сохраняют гребневый счет [6].



Рис. 1: Скелет и частные признаки

В настоящее время известны различные математические модели, используемые для доказательства индивидуальности узора [7]. Каждая из таких моделей нацелена на повышение точности идентификации, однако неизвестно ни одной лучшей, свободной от недостатков модели [6].

Математическая модель должна содержать необходимое и достаточное количество признаков для уверенного распознавания изображений [1, 3]. В дактилоскопии обычно выделяют общие признаки, частные признаки и гребневый счет между ними [6]. Однако гребневый счет, являясь морфологической метрикой, не выдерживает критики. Действительно, в силу предписанного правила измерять гребневый счет вдоль прямой от точки до точки, он не свободен от следующих недостатков [2, 8-10]:

- при мутации окончания в разветвление или разветвления в окончание гребневый счет может изменить значение;
- при измерении гребневого счета вдоль кривых линий его значение неопределенно;
- при смещении частных признаков вдоль линий гребневый счет может изменить значение;
- если прямая, вдоль которой измеряется гребневый счет, проходит вблизи другого частного признака, то значение гребневого счета неоднозначно;
- множество частных признаков, до которых измеряется гребневый счет для данного частного признака, или неопределенно или условно ограничено (радиус-вектор).

В условиях помех и операционной неопределенности это приводит к увеличению ошибок идентификации и снижению производительности биометрических систем [5].

Первая попытка преодоления указанных недостатков на основе перехода от морфологических характеристик к топологическим характеристикам ДИ изложена в [8-10]. В данной работе предлагается развитие топологического подхода на основе шаблона изображения в виде отображения

$$\Gamma: \{F_0^{(m)}\} \rightarrow \{L_m, L_s, L_v\}, \quad (1)$$

где $F_0^{(m)} = [f_0^{(m)}(x, y)]$ – скелет ДИ; L_m – список частных признаков; L_s – список общих признаков; L_v – список топологических векторов для частных признаков, снабженный длинами отрезков папиллярных линий.

2. ШАБЛОН ИЗОБРАЖЕНИЯ

В работе шаблон ДИ по (1) представляется множеством из трех списков данных. Рассмотрим эти списки по порядку.

2.1 Список частных признаков

Список окончаний и разветлений находят в виде

$$L_m = \{M_i = \{(x_i, y_i), \alpha_i, t_i, s_i, v_i, \theta_i, p_i, h_i\} | i \in 1..n_1\}, \quad (2)$$

где M_i – частный признак; $|L_m| = n_1$ – мощность списка; i – индекс частного признака; (x_i, y_i) , α_i , t_i , s_i , v_i , θ_i , p_i и h_i – координаты, направление, тип, метка сомнительности,

величина и направление кривизны, вероятность и плотность линий в окрестности частного признака. Частные признаки детектируют в информативной области изображения [2], которая на рис. 1 затемнена.

Координаты (x_i, y_i) частного признака M_i определяются координатами вершины скелета [6]. Направление α_i как угол определяется простой цепью вершин скелета для окончания и тремя простыми цепями для разветвления [2]. Тип $t_i \in \{0,1\}$ устанавливается валентностью вершины скелета как вершины графа [4], где 0 – разветвление и 1 – окончание. Координаты (x_i, y_i) , направление α_i и тип t_i являются основными параметрами M_i , используемыми для идентификации ДИ [1, 6, 7].

Метка сомнительности $s_i \in \{0,1\}$ определяется положением частного признака, близким к неинформативным областям (фону), причем 1 означает сомнительность. На границе неинформативных областей частные признаки не детектируют. Величину v_i и направление θ_i кривизны определяют по изменению направлений линий в окрестности ε частного признака [6]. Вероятность p_i рассчитывают как отношение средней величины оценок качества изображения в окрестности к наилучшей оценке качества в информативной области ДИ [2]. Плотность линий h_i рассчитывают как среднее количество линий, умещающихся в окрестности ε на прямой, проведенной перпендикулярно линиям [2]. Алгоритм обработки ДИ определяет размер окрестности ε .

2.2 Список общих признаков

Список петель, дельт и завитков L_s находят в виде

$$L_s = \{S_i = \{(x_i, y_i), \alpha_i, t_i, s_i, p_i, h_i\} | i \in 1..n_2\}, \quad (3)$$

где S_i – общий признак; $|L_s| = n_2$ – мощность списка; i – индекс общего признака; (x_i, y_i) , α_i , t_i , s_i , p_i , h_i – координаты, направление, тип, метка сомнительности, вероятность и плотность линий в окрестности общего признака. Величина и направление кривизны для общего признака теряют смысл и не используются. В целом список подобен списку L_m по (2).

Координаты (x_i, y_i) общего признака S_i определяются координатами центра фигур (завиток, петля и дельта), вписанных в соответствующую область изображения. Направление $\alpha_i \in S_i$ определяется прослеживанием хода линий, а тип $t_i \in \{s_w, s_l, s_d\}$ определяется по характеру изгиба линий, где s_w – завиток, s_l – петля, s_d – дельта [2]. Координаты (x_i, y_i) , направление α_i и тип t_i являются базовыми параметрами S_i , используемыми при идентификации ДИ по общим признакам и типу узора [6]. Метка сомнительности s_i определяется как вероятность p_i , меньшая заданной величины, причем 1 означает сомнительность. Вероятность p_i и плотность линий h_i рассчитываются аналогично (2), но окрестность выбирается значительно большего размера.

2.3 Список топологических векторов

Этот список L_v вычисляют на основе списка частных признаков M_i , слоя скелета $F_0^{(m)}$ и других матриц, элементы которых отображают локальные свойства ДИ.

Для каждого частного признака M_i синтезируют один топологический вектор V_i . Множество всех топологических векторов записывают в виде

$$L_v = \{V_i = \{e_j, l_j, n_j\} | i \in 1..n_1, j \in 1..m_i\}, \quad (4)$$

где V_i – топологический вектор для M_i ; $|L_v| = |L_m| = n_1$ – мощность списка; i – индекс топологического вектора, совпадающий с индексом частного признака; j – номер связи в топологическом векторе; e_j – событие, а l_j – длина связи, сформированная частным признаком с номером n_j ; m_i – количество связей, зависящее от типа частного признака M_i .

Опишем процедуру построения топологических векторов.

В области ясного ДИ выделяют линии и формируют стилизованное изображение в виде скелета. По скелету детектируют два типа частных признаков: окончания и разветвления [6]. На рис. 1 показаны направления частных признаков. Направление как угол указывает в область увеличения числа линий. Оно параллельно касательной к папиллярной линии в малой окрестности частного признака M_i . Каждый частный признак нумеруют и описывают координатами, направлением, типом, меткой сомнительности, величиной и направлением кривизны, вероятностью и плотностью линий в окрестности частного признака (2). Затем от каждого частного признака фиксируют две проекции: вправо и влево перпендикулярно направлению частного признака на смежные скелетные линии. На рис. 2 проекции показаны пунктиром, а две соответствующие вершины скелета на линиях 1 и 2 закрашиваются «цветом проекции».

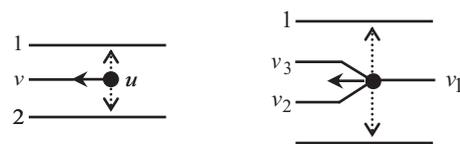


Рис. 2: Проекция от окончания и разветвления

Выберем один частный признак M_i и проведем через координаты (x_i, y_i) вправо и влево сечение на глубину нескольких линий m перпендикулярно касательным к пересекаемым линиям и пронумеруем по спирали, разворачивающейся по часовой стрелке, рассеченные линии, которые назовем связями. Сечение проходит, отслеживая направление кривизны линий [2]. Глубина сечения обычно варьируется от одной до восьми линий вправо и так же влево. Одна линия в сечении образует две связи. Количество связей в топологическом векторе рассчитывается по формуле

$$m_t = \begin{cases} 4m + 1, & \text{если } t_i \in \{1\} \text{ – окончание} \\ 4m + 3, & \text{если } t_i \in \{0\} \text{ – разветвление.} \end{cases} \quad (5)$$

Топологический вектор определяют по сечению методом слежения за ходом каждой связи от сечения до встречи с другим частным признаком, расположенным на связи, или с проекцией от него на связь. При этом на связях детектируются следующие возможные события, показанные на рис. 3 и представленные в двоичном коде:

0000 – на связи нет ни частного признака, ни проекции от него (линия обрывается на краю отпечатка);

1101 – на связи проекция от окончания, расположенного справа по ходу связи, направление окончания ориентировано навстречу ходу связи;

1001 – на связи проекция от окончания, расположенного справа по ходу связи, направление окончания ориентировано по ходу связи;

1110 – на связи проекция от окончания, расположенного слева по ходу связи, направление окончания ориентировано навстречу ходу связи;

1010 – на связи проекция от окончания, расположенного слева по ходу связи, направление окончания ориентировано по ходу связи;

0101 – на связи проекция от разветвления, расположенного справа по ходу связи, направление разветвления ориентировано навстречу ходу связи;

0001 – на связи проекция от разветвления, расположенного справа по ходу связи, направление разветвления ориентировано по ходу связи;

0110 – на связи проекция от разветвления, расположенного слева по ходу связи, направление разветвления ориентировано навстречу ходу связи;

0010 – на связи проекция от разветвления, расположенного слева по ходу связи, направление разветвления ориентировано по ходу связи;

0011 – разветвление на связи, направление которого ориентировано по ходу связи;

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

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

1111 – окончание на связи, направление которого ориентировано навстречу ходу связи;

1100 – связь по линии замыкается, какой-либо частный признак или проекция от него отсутствует.

С событием как двоичным числом, детектированным на связи, ассоциируют номер частного признака, инициирующего это событие. Событие привязано к номеру связи. Для событий 0000 и 1100 номера частных признаков отсутствуют. Нумерованный набор связей с заданными событиями и номерами частных признаков есть *базовый топологический вектор* (экономный). Событие и номер частного признака образуют упорядоченную пару. Событие может быть дополнено длиной связи от сечения до позиции, в которой детектируется это событие. Так формируется *расширенный топологический вектор*. Событие, номер частного признака и длина связи образуют упорядоченную тройку. Для событий 0000 и 1100 длины связей описывают информативные области, свободные от частных признаков. При этом длины связей, обрывающихся на краю отпечатка, устойчивы в том смысле, что не укорачиваются при полной прокатке пальца.

Местоположение бита в двоичном числе определяет тип частного признака, его направление по отношению к направлению хода связи, его местоположение по отношению к связи и др. (см. рис. 3). События позволяют оперативно сопоставить (простыми компьютерными операциями) важную детальную информацию, необходимую для скоростной и надежной идентификации узора.

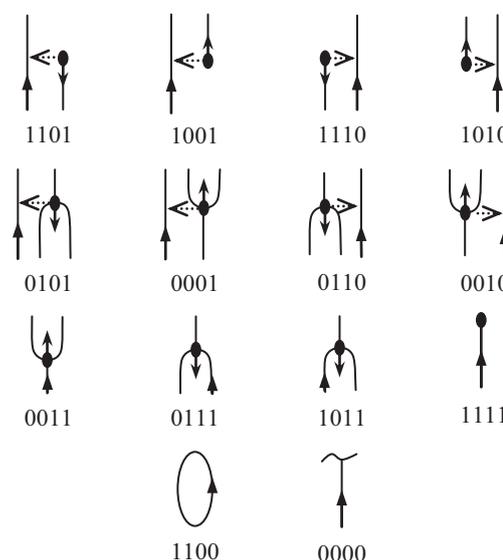


Рис. 3: События, детектируемые на связи

Сечение разрезает линии на связи, пронумерованные по спирали, разворачивающейся по часовой стрелке. На рис. 4 и рис. 5 сечения показаны пунктиром. Длины связей, соответствующие сечениям, представлены в табл. 1 и табл. 2 символами.

При *мутациях* частного признака окончание замыкается в разветвление, а разветвление разрывается в окончание. Вследствие *мутаций* связи перенумеровываются, но их содержание сохраняется. Так окончание на рис. 4 после мутации в разветвление приобретает топологическую структуру, показанную на рис. 5. Несложно синтезировать закон перенумерации связей для соответствующей мутации частного признака. Так в табл. 1, 2 видно, что третья связь для окончания перенумерована в нулевую связь для разветвления без изменения содержания, нулевая – во вторую и т.д.

Синтез топологического вектора выполняют для каждого частного признака, а последовательность действий – в информативной области, где прослеживается ход связи. Поэтому необходима сегментация узора на информативные и неинформативные области.

На этом синтез списка топологических векторов завершают. Базовый топологический вектор инвариантен к повороту и переносу ДИ, масштабному преобразованию ДИ, линейным и нелинейным деформациям ДИ [2, 10]. Расширенный топологический вектор отражает морфологические свойства узора и теряет «топологическую чистоту». Если не учитывать несовершенство методов распознавания, то изменить содержание базового топологического вектора могут только дефекты изображения. Так как не известны методы, идеально обрабатывающие произвольные искажения узора [6], то при прочих равных условиях такой топологический вектор оптимален.

Таблица 1. Топологический вектор для окончания

Номер связи	Событие	Индекс	Длина связи
0	1110	22	l_0
1	0001	21	l_1
2	1110	23	l_2
3	1001	24	l_3
4	1111	22	l_4
5	0011	21	l_5
6	1111	23	l_6
7	1010	24	l_7
8	0010	25	l_8
9	0010	21	l_9
10	1010	20	l_{10}
11	1010	26	l_{11}
12	0011	25	l_{12}
13	0000	–	–
14	1001	20	l_{14}
15	1111	27	l_{15}
16	0001	25	l_{16}

Таблица 2. Топологический вектор для разветвления

Номер связи	Событие	Индекс	Длина связи
0	1001	24	l_0
1	1111	22	l_1
2	1110	22	l_2
3	0001	21	l_3
4	1110	23	l_4
5	1010	24	l_5
6	0010	25	l_6
7	0011	21	l_7
8	1111	23	l_8
9	1010	26	l_9
10	0011	25	l_{10}
11	0010	21	l_{11}
12	1010	20	l_{12}
13	1111	27	l_{13}
14	0001	25	l_{14}
15	0000	–	–
16	1001	20	l_{16}
17	1100	–	–
18	1100	–	–

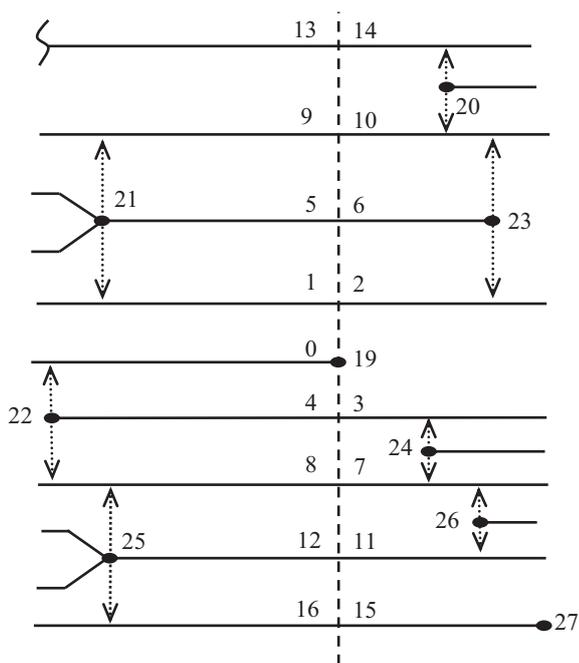


Рис. 4: Сечение для окончания

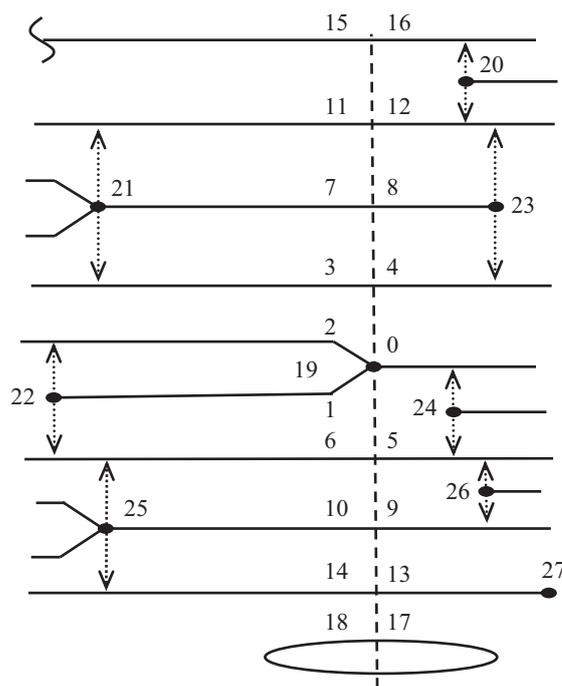


Рис. 5: Сечение для разветвления

На рис. 4 в сечении для окончания 19 пронумерованы связи 0–16, а соответствующий топологический вектор представлен в табл. 1. Нумерация связей начинается с линии, на которой лежит окончание (связь №0 на рис. 4). При глубине сечения $m=4$ для окончания формируется семнадцать связей $m_t = 17$ по (5).

На рис. 5 в сечении для разветвления 19 пронумерованы связи 0–18, а соответствующий топологический вектор представлен в табл. 2. Нумерация связей начинается с линии, которая расщепляется на две другие линии (связь №0 на рис. 5). При глубине сечения $m=4$ для разветвления формируется девятнадцать связей $m_t = 19$ согласно (5).

Предлагаемый базовый топологический вектор развивает работу американского изобретателя Sparrow [8-10], первым наметившего указанный подход. Простое сопоставление публикаций Sparrow с предлагаемой моделью выявляет следующие преимущества топологических векторов по (4):

- спиралевидный способ нумерации позволяет сохранить монотонность роста номеров связей при произвольном изменении глубины сечения m ;
- внутренние связи с номером $j \in 0..4$ участвуют в формировании топологического вектора, что позволяет синтезировать однозначные правила перенумерации связей при различных мутациях частных признаков;
- сечение отслеживает направления кривизны узора, что повышает устойчивость топологического вектора при нелинейных деформациях узора;
- события представлены наиболее полно за счет использования проекций;
- полнота событий позволяет однозначно определить состав множества частных признаков, отраженных в топологическом векторе и определяемых структурой изображения, а не условными геометрическими характеристиками;
- числовая характеристика события не зависит от деформаций изображения, так как сечение отслеживает направление кривизны линий;
- длины связей дополняют топологические векторы новыми данными, которые невозможно рассчитать на основе геометрических характеристик частных признаков, так как учитывают искривленность линий.

Топологический вектор несет информацию не только о величине гребневого счета в виде номера связи, но и новые данные, недоступные при использовании гребневого счета. Так из гребневого счета в общем случае невозможно определить, навстречу или по ходу связи ориентирован частный признак, а также справа или слева от связи он находится. Действительно, при анализе частных признаков, расположенных по разные стороны петли или завитка (линии закручиваются), геометрические характеристики не позволяют однозначно рассчитать событие, получаемое при прослеживании связи. Гребневый счет здесь не работает. Новые данные в виде событий обеспечивают более полную информацию о фрагменте узора, чем гребневый счет: события, дополненные частными признаками, позволяют реконструировать скелет ДИ в виде ломаных линий [10].

Номер одного частного признака присутствует в различных топологических векторах. Образуется сильно связанный граф, по которому можно переходить от одного топологического вектора к другому. Это обеспечивает целостность и устойчивость описания узора. Количество связей m_i по (5) играет важную роль. Их количество влияет на вероятность того, что граф с вершинами V_i связанный.

Топологические векторы позволяют описать структуру изображения на различном уровне. По сути, они формируют банк данных детального описания папиллярных узоров. Действительно, крючок образуется разветвлением, для которого событие 1111 находится на первой или второй связи, а длина связи мала. Фрагмент линии образуется двумя окончаниями, замыкающимися друг на друга нулевыми связями с малой длиной. Глазок образуется двумя разветвлениями, первая и вторая связи которых замыкаются на эти разветвления с событиями 0111 и 1011 и имеют малую длину. Мостик образуется двумя разветвлениями, для

которых первая или вторая связь является общей, а длина связи мала. Эти часто встречаемые фрагменты узора представлены на рис. 6. Под малой длиной связи понимается величина, соизмеримая с локально усредненным периодом линий.

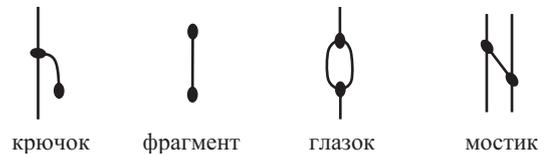


Рис. 6: Детальное описание фрагментов узора

Очевидно, что банк данных детального описания папиллярных узоров улучшает информативность признаков и точность идентификации [6, 7]. Но это не единственное преимущество модели. Расположенные в определенных областях ДИ, эти информативные признаки могут порождать сигнатуры, позволяющие ускорить идентификацию ДИ в десятки раз.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По результатам исследований в компании Sonda Technologies разработано программное обеспечение для распознавания изображений отпечатков пальцев и их следов, содержащее функцию обработки изображения и функцию идентификации изображений по шаблонам. Функция обработки генерирует шаблоны, снабженные топологическими векторами для частных признаков, а функция идентификации вычисляет степень подобия шаблонов. Оценка качества работы этих функций без вычисления длин связей выполнена на тесте FVC 2004 [11], на котором 43 разработчика программ представили 67 алгоритмов распознавания ДИ. Результаты оценок в виде DET-кривых показаны на рис. 7.

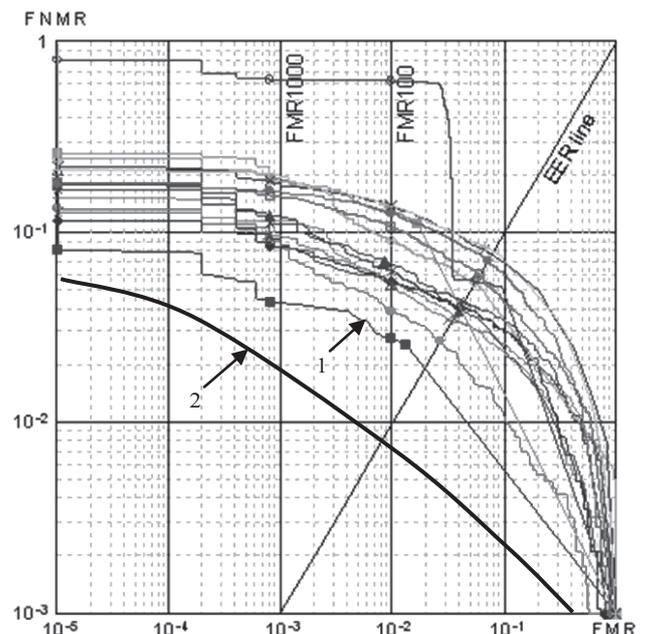


Рис. 7: Результаты экспериментов

На рис. 7 кривая, отмеченная символом 1, рассчитана на основе топологических векторов, не содержащих длины связей. Она построена на тесте FVC 2004 по базе изображений отпечатков пальцев DB1, снятых с оптического сенсора V300 фирмы CrossMatch. Видно, что алгоритм, использующий топологические векторы, допускает минимальные ошибки распознавания ДИ даже без учета длин связей. Кривая, отмеченная символом 2, получена на той же базе изображений DB1, но с учетом длин связей в составе топологических векторов. Эта кривая получена в лабораторных условиях. Величины ошибок идентификации существенно уменьшились.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена топологическая модель, для построения которой требуется выполнение сравнительно непростых методов обработки ДИ [1-3]. Эта модель сохраняется в шаблоне изображения. Граф каждой модели сильно связан и обладает высокой степенью избыточности, а ребра графа помечены длиной связи.

В тополого-геометрической модели используются новые способы представления шаблона ДИ. Объемом шаблона ДИ можно управлять выбором базового или расширенного топологического вектора. Для некоторых режимов идентификации достаточно одного списка частных признаков.

Экспериментально доказано, что идентификация ДИ на основе шаблонов, в состав которых входят тополого-геометрические векторы с длинами связей, может быть выполнена с повышенной точностью и надежностью. Преимущества новой модели по сравнению с ранее использованной показаны на примере теста FVC 2004.

Дальнейшее развитие работ планируется в направлении тополого-геометрического подхода для описания отрезков линий, а не точек.

5. ССЫЛКИ

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ.; под ред. П.А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Гудков, В.Ю. Топологические модели и обработка изображений отпечатков пальцев: монография / В.Ю. Гудков. – Saarbrücken: LAP, 2011. – 304 с. – ISBN: 978-3-8465-4568-3 (Germany).
3. Ковалевский, В.А. Методы оптимальных решений в распознавании изображений / В.А. Ковалевский. – М.: Наука, 1976. – 328 с.
4. Новиков, Ф.А. Дискретная математика для программистов: учебник / Ф.А. Новиков. – СПб.: Питер, 2001. – 304 с.
5. Ушмаев, О.С. Адаптация биометрической системы к искажающим факторам на примере дактилоскопической идентификации / О.С. Ушмаев // Информатика и ее применение. – 2009. – Т. 3, Вып. 2. – С. 25–33.
6. Handbook of fingerprint recognition / D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar. – London: Springer-Verlag, 2009. – 496 p.
7. Komarinski P. Automated fingerprint identification systems / P. Komarinski. – New York: Academic Press, 2005. – 295 p.

8. Pat. 4817183 USA, Int. Cl. G06K 9/00. Fingerprint recognition and retrieval system / M.K. Sparrow (Winchester). – Field: Apr. 1, 1987; Date of patent: Mar. 28, 1989; U.S.Cl. 382/4. – 50 p.
9. Pat. 5631971 USA, Int. Cl. G06K 9/00. Vector based topological fingerprint matching / M.K. Sparrow (Winchester). – Field: Jul. 15, 1994; Date of patent: May. 20, 1997; U.S.Cl. 382/125. – 17 p.
10. Sparrow, M.K. A topological approach to the matching of single fingerprints: development of algorithms for use on latent finger marks / M.K. Sparrow, P.J. Sparrow // US dep. comer. nat. bur. stand. spec. pub. – 1985. – № 500–126. – 61 p.
11. <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/results.asp>.

Об авторах

Гудков Владимир Юльевич – кандидат технических наук, доцент Челябинского государственного университета. Его адрес: diana@sonda.ru.

Область научных интересов: обработка изображений, распознавание образов, дактилоскопические технологии, комплексы программ.

Ушмаев Олег Станиславович – доктор технических наук, доцент Института проблем информатики РАН. Его адрес: oushmaev@ipiran.ru.

Область научных интересов: мультибиометрические системы идентификации, обработка изображений, криптография, комплексы программ.