

В.М. Кийко, В.В. Мацелло

## Сравнение изображений отпечатков пальцев на основе поиска соответствия особых точек

Предложен новый алгоритм поиска соответствующих точек на отпечатках пальцев, а также технология распознавания изображений отпечатков пальцев с использованием этого алгоритма. Приведены результаты тестирования разработанного программного обеспечения, реализующего эту технологию, на базах данных *FVC2002* и *NIST27*.

A new algorithm for searching corresponding points in fingerprints and the technology for recognition of fingerprints using this algorithm are described. The results of the proposed algorithm experimental testing on data bases *FVC2002* and *NIST27* are presented.

Запропоновано новий алгоритм пошуку відповідних точок на відбитках пальців, а також технологія розпізнавання зображень відбитків пальців з використання цього алгоритму. Подано результати тестування розробленого програмного забезпечення, що реалізує цю технологію, на базах даних *FVC2002* та *NIST27*.

**Введение.** В настоящее время активно разрабатываются и совершенствуются электронные системы, выполняющие идентификацию человека на основе биометрических признаков – голоса, отпечатков пальцев, изображений лица или радужной оболочки глаза и других отличительных признаков. Системы идентификации на основе распознавания отпечатков пальцев активно используются, но все еще уступают возможностям человека. Поэтому задача разработки новых, более эффективных алгоритмов и систем для распознавания отпечатков пальцев сохраняет актуальность.

Наиболее распространенный подход к распознаванию отпечатков пальцев состоит в поиске соответствия особых точек на предварительно совмещенных (нормализованных) парах сравниваемых изображений и вычислении расстояния между изображениями на основе этого соответствия [1]. Известен способ поиска соответствия особых точек [2] на отпечатках пальцев, использующий этот подход, который состоит из следующих этапов. На *начальном* этапе принимается решение о некоторых двух точках (опорные точки) на сравниваемых изображениях о том, что они соответствуют друг другу. На *втором* этапе формируются списки особых точек в окрестности каждой из двух опорных точек, упорядоченные по расстоянию и углу относительно опорной точки. Затем вы-

полняется поиск соответствия точек в упорядоченных списках с помощью так называемой «эластичной разметки» методом динамического программирования. Правильность результата разметки зависит от правильности выбора начальных точек, а также от того, сохраняется ли порядок следования особых точек в обоих списках. Последнее означает, что если одна из особых точек следует после другой в первом списке, то такой же порядок должен сохраняться для соответствующих точек во втором списке. В противном случае эти две точки не могут быть установлены как соответствующие, поскольку алгоритм эластичной разметки использует операции удаления и изменения параметров элементов цепочки, но не изменяет порядок ее элементов. Далее рассматривается новый алгоритм поиска соответствия особых точек, основанный на поиске оптимальной разметки вершин на двудольном графе. Этот алгоритм не использует представление входных данных в виде упорядоченной последовательности особых точек и свободен от упомянутых недостатков поиска соответствия точек с помощью эластичной разметки. Во введении рассмотрены основные этапы технологии кодирования и распознавания отпечатков пальцев с использованием этого алгоритма, а основные результаты тестирования этой технологии будут описаны далее.

## Обработка и распознавание изображений отпечатков пальцев

Предлагаемая технология распознавания состоит из следующих этапов:

- улучшения качества исходного изображения отпечатка пальца и его бинаризация; разбиения изображения на информативные и неинформативные (зашумленные или не содержащие папиллярных линий) области;
- получения описания изображения в виде особых точек, соответствующих окончаниям и разветвлениям линий папиллярного узора;
- вычисления расстояний между исходным изображением и эталонными изображениями на основе установления соответствия особых точек на парах сравниваемых изображений (рис. 1).



Рис. 1. Реализация технологии сравнения двух изображений отпечатков пальцев: *a* – исходная пара изображений; *б* – результат фильтрации и бинаризации; *в* – векторизация и выделение особых точек; *г* – принятие решения об идентичности двух сравниваемых изображений на основе поиска соответствующих точек

На начальном этапе обработки (см. рис. 1,*б*) осуществляется улучшение качества изображения с помощью алгоритма фильтрации [3], а также его бинаризация, после которой яркость клеток изображения имеет два значения. Затем выполняется удаление помех типа «соль и перец» на бинаризованном изображении (см. рис. 1,*в*) [4], выделение линий (векторизация) на изображении [5], устранение помех на векторном представлении изображения, а также выделение особых точек на изображении. На заключительном этапе (см. рис. 1,*г*) вычисляется расстояние между двумя сравниваемыми изображениями на основе поиска соответствующих

точек, и принимается решение о том, являются ли эти два изображения отпечатками одного и того же пальца, если расстояние меньше заданного порога, или нет в противном случае.

Особые точки изображения соответствуют окончаниям или разветвлениям линий папиллярного узора. Каждая из этих точек описывается следующими параметрами (рис. 2): координаты и тип  $n$  особой точки (конец или разветвление папиллярной линии); угол направления  $\varphi_1$  папиллярной линии в особой точке и углы направлений  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  папиллярной линии в точках, расположенных на некоторых расстояниях от особой точки.

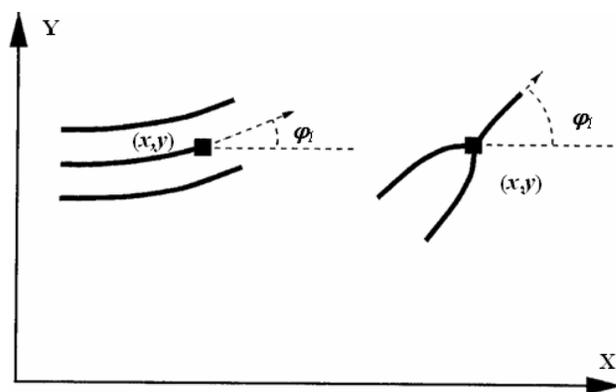


Рис. 2. Основные параметры особых точек

Параметры  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  не обязательны и используются в основном для ускорения поиска соответствия между особыми точками входного и эталонного изображений. Остальные три параметра соответствуют формату данных, используемых в *FBI* [6].

Результаты распознавания изображений отпечатков пальцев при реализации предложенной технологии во многом зависят от эффективности алгоритма поиска соответствия точек на сравниваемых изображениях. Этот алгоритм более подробно рассмотрен в следующем разделе.

### Алгоритм распознавания папиллярных изображений на основе поиска соответствия особых точек

С помощью алгоритма вычисляется расстояние между двумя предварительно совмещенными изображениями отпечатков пальцев на

основе поиска соответствия особых точек на этих изображениях. Совмещение (нормализация) двух изображений выполняется путем линейного преобразования (смещение, поворот и масштабирование) на основе совмещения особых точек на этих изображениях. Параметры этого преобразования могут быть вычислены по координатам двух пар соответствующих точек, а также по параметрам всего одной пары соответствующих особых точек на отпечатках пальцев, которые назовем *опорными*. При этом относительное смещение изображений определяется по разности координат опорных точек, поворот – по разности углов направлений  $\varphi_1$  папиллярных линий в этих точках, а коэффициент изменения масштаба как отношение количества папиллярных линий, расположенных вдоль отрезков линий определенной длины, проведенных из опорных точек в определенном направлении. Поиск двух опорных соответствующих точек осуществляется с помощью следующего так называемого *жадного* алгоритма. Составляется список пар особых точек с близкими по значению параметрами, и, которые, следовательно, могут быть соответствующими точками. Далее из списка поочередно выбираются пары точек, которые считаются опорными, и для каждой из этих пар осуществляется поиск всех других соответствующих точек с помощью алгоритма разметки на двудольных графах, который будет описан далее. При этом, если будет найдено достаточно большое число соответствующих точек, то будет принято решение о том, что два сравниваемых изображения – это отпечатки одного и того же пальца, и рассмотрение всех других пар опорных точек прекращается. В противном случае сравниваемые изображения не идентичны и соответствуют различным пальцам. Рассмотрим алгоритм поиска соответствия особых точек при некоторой паре опорных точек.

Входные данные алгоритма представляют собой параметры (тип, координаты и углы) особых точек на двух сравниваемых  $I$  и  $T$  изображениях после преобразования особых точек на втором изображении. Параметры этого преобразования вычисляются по двум выбранным

опорным точкам. Результат работы алгоритма – принятие решение о паре изображений  $(I, T)$  на основе вычисления значения их подобия по формуле  $\text{Sim}(I, T) = \text{nmatched} / \sqrt{N(I) * N(T)}$ ,

где  $N(T)$ ,  $N(I)$  – количество особых точек двух совмещенных изображений в области их пересечения;  $\text{nmatched}$  – количество найденных пар соответствующих точек, имеющих одни и те же или близкие пространственные отношения друг к другу (направления и расстояния) на обоих изображениях. На основе сравнения полученного значения с заданным порогом принимается решение о паре сравниваемых изображений.

Алгоритм поиска соответствия особых точек состоит из следующих двух основных этапов. На *первом* этапе выполняется поиск оптимальной разметки на взвешенном двудольном графе следующего вида. Вершинам этого графа соответствуют особые точки эталонного и входного изображений, а каждой из дужек – пара особых точек, одна из которых принадлежит эталонному, а другая – распознаваемому изображению. Вес на каждой дужке зависит от разности параметров особых точек, которые соединяет эта дужка, а также от разности расстояний и относительных направлений этих точек до опорных особых точек. Количество вершин графа равно  $N_T + N_I - 2$ , где  $N_T$ ,  $N_I$  – количество особых точек на, соответственно, эталонном и входном изображениях. Множество вершин графа состоит из двух подмножеств  $V_T$  и  $V_I$ . Каждой вершине  $v \in V_T$  соответствует одна из особых точек  $p_i^T$ ,  $i = 1, 2, \dots, N^T - 1$  кроме опорной точки  $p_0^T$  на эталонном изображении. Аналогично, каждой вершине  $v \in V_I$  соответствует одна из особых точек  $p_j^I$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_I - 1$  на входном изображении, которая не есть его опорной точкой. При последующем изложении используем одни и те же обозначения  $p_i^T$ ,  $p_j^I$  как для вершин графа, так и для особых точек на изображениях.

Каждая вершина  $p_i^T \in V_T$  соединена дужками со всеми вершинами  $p_j^I \in V_I$ . Аналогично

каждая вершина  $p_j^l$  соединена со всеми вершинами  $p_i^T$ . Описание вершины графа состоит из 10-ти признаков (параметров) соответствующей ей особой точки изображения: шести основных ( $n, x, y, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ) и четырех дополнительных признаков. Эти дополнительные признаки определяются положением особой точки относительно опорной точки. При последующем изложении используем следующие обозначения для угловых параметров  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  точек  $p_i^T$  и  $p_j^l$ :  $\varphi_1^T(i), \varphi_2^T(i), \varphi_3^T(i)$  и  $\varphi_1^l(j), \varphi_2^l(j), \varphi_3^l(j)$ . Некоторая точка  $p_i^T$  на эталонном изображении имеет следующие дополнительные параметры (рис. 3):

- расстояние между  $p_i^T$  и опорной точкой  $p_0^T$ ;
- $\varphi^T(i, 0)$  – угол между отрезком линии  $(p_0^T, p_i^T)$  и осью  $X$ ;
- разность  $d\varphi_1^T(i, 0)$  между углами  $\varphi^T(i, 0)$  и  $\varphi_1^T(i)$ ;
- разность  $d\varphi_2^T(i, 0)$  между углами  $\varphi_1^T(i)$  и  $\varphi_1^T(0)$ .

Аналогичные дополнительные параметры имеет также каждая особая точка  $p_j^l$  на входном изображении.

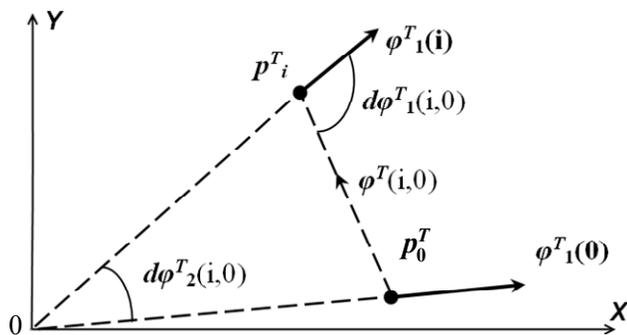


Рис. 3. Дополнительные параметры особой точки  $p_i^T$

Поиск оптимальной разметки на двудольном графе выполняется в соответствии с алгоритмом [7]. Перед реализацией алгоритма двудольный граф преобразуется к симметричному виду путем добавления вершин и дужек так,

что  $|V_l| = |V_T|$ . При этом всем добавленным дужкам ставится в соответствие одно и то же очень большое значение, что практически исключает влияние добавленных вершин и дужек на результат поиска соответствующих точек в виде их оптимальной разметки. Поиск последней означает, что каждой вершине из первого множества  $V_T$  ставится в соответствие не более одной вершины из второго множества  $V_l$  и, кроме того, суммарный вес дужек на парах соответствующих вершин минимален. Вычислительная сложность поиска оптимальной разметки составляет  $O(N^2)$  в среднем случае и  $O(N^3)$  в худшем случае, где  $N = \max(N_T, N_l)$ .

Некоторые особые точки могут быть ошибочно размечены как соответствующие вследствие, например, частичного перекрытия двух сравниваемых изображений. Эти точки удаляются из полученной разметки на втором этапе алгоритма на основе проверки выполнения их пространственных отношений (расстояния и направления) с другими размеченными точками. Оставшиеся точки имеют близкие пространственные отношения с другими соответствующими особыми точками на обоих изображениях. На втором этапе алгоритма определяются и общие количества особых точек в информативной области пересечения двух совмещенных изображений, а также значение близости (подобия) между двумя сравниваемыми изображениями.

Для экономии времени распознавания желательно сократить общее количество рассматриваемых пар опорных точек на изображениях, что достигается следующим способом. Во-первых, в качестве кандидатов на опорные точки рассматриваются только пары особых точек одного и того же типа, имеющие примерно одинаковые по кривизне соответствующие им участки папиллярных линий. При этом для оценки кривизны используются углы направлений  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  в описании каждой особой точки.

Во-вторых, поиск соответствующих опорных точек состоит из двух этапов. Сначала оптимальная разметка ищется для тех пар-канди-

датов на опорные точки, в окрестности которых находится достаточно хорошая разметка следующим *жадным* алгоритмом. Составляются списки особых точек на эталонном и распознаваемом изображениях, расположенных в некоторой окрестности рассматриваемых опорных точек. Затем для каждой особой точки на эталонном изображении из первого списка длиной  $k_T$  ищется неразмеченная точка на входном изображении из второго списка длиной  $k_I$  такая, что основные и дополнительные параметры этих точек совпадают с заданной точностью. Если в результате окажется, что количество найденных таким образом соответствующих точек меньше четырех и меньше, чем  $\max(k_T, k_I) * 0,25$ , то рассматриваемые опорные точки не считаются соответствующими, и для них на первом этапе не выполняется поиск оптимальной разметки на двудольном графе. Если на первом этапе не была найдена достаточно хорошая разметка, то тогда выполняется второй этап, на котором рассматриваются только те особые точки, которые были отсеяны на первом этапе.

### Результаты тестирования алгоритма

Разработанные алгоритмы реализованы в виде программного обеспечения для верификации изображений отпечатков пальцев. Тестирование программы выполнено на известных базах данных *FVC2002* (<http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/>) и *NIST27* (<http://www.nist.gov/it/iad/ig/sd27a.cfm>).

В процессе тестирования вычислялись значения критерия близости для различных пар сравниваемых изображений. При этом два изображения считались отпечатками одного и того же пальца, если вычисленное значение критерия близости больше заданного порога, или же в противном случае – отпечатками разных пальцев. Результаты распознавания оценивались с помощью значений *FAR* (*false accepting rate*) и *FRR* (*false rejecting rate*): *FAR* (*FRR*) – вероятность ошибки распознавания первого (второго) типа, при которой принимается ошибочное решение о том, что два изображения являются (не являются) отпечатками

одного пальца человека. Эти значения вычисляются по формулам:

$$FAR = false\_positives * 100 / ncomp\_dif,$$

$$FRR = false\_negatives * 100 / ncomp\_same,$$

где *false\_positives*, *false\_negatives* – количество ошибок первого и второго типов, а *ncomp\_dif*, *ncomp\_same* – количество сравнений отпечатков разных и одинаковых пальцев.

База данных *FVC2002* состоит из четырех частей: *DB1*, *DB2*, *DB3* и *DB4*. Тестирование выполнялось на *DB1* и *DB2*, сформированных соответственно с помощью оптических датчиков: *Optical Identixtouch ViewII* (388×374; 500 dpi) и *Biometrica FX2000* (296×560; 569 dpi). *DB1* и *DB2* состоят каждая из 880 изображений (110×8: по восемь отпечатков каждого из 110 пальцев). Проверка работы программы выполнена так: сначала для каждого пальца выбиралось одно из восьми изображений как эталонное. Затем все 110 эталонных изображений (отпечатков) перекрестно сравнивались между собой для получения оценки *FAR*. Для получения оценки *FRR* сравнивались между собой восемь изображений отпечатков пальцев в каждой из 110 групп.

Известная методика тестирования предполагает получение значений *FRR* и *FAR* при различных пороговых значениях выбранного критерия с целью построения кривых *FRR* и *FAR*. В нашем случае использовано только одно пороговое значение. Основные сравнительные результаты тестирования представлены в табл. 1 и 2, где используются следующие обозначения. *EER* (*Equal Error Rate*) – значение *FAR* при условии *FAR = FRR* при некотором пороге, соответствующем точке пересечения кривых *FRR* и *FAR*. *FRR100* – наименьшее значение *FRR* при условии, что *FAR ≤ 1%*. *FRR1000* – наименьшее значение *FRR* при условии, что *FAR ≤ 0,1%*. *ZeroFMR* – наименьшее значение *FRR* при условии, что *FAR = 0*. *REJEnroll* – количество отказов на этапе получения описания изображений. *REJMatch* – количество отказов на этапе распознавания изображений. *EnrollTime* – среднее время получения описания изображе-

ния. *MatchTime* – среднее время распознавания одного отпечатка пальца.

Проведено сравнение результатов работы следующих алгоритмов: *PA15 – Bioscrypt Inc.*, *PB05 – Siemens AG*, *PA08 – Neurotehnologija Ltd. – Lithuania*, *PA27, PB27* – неизвестный разработчик, МНУЦ – разработанная авторами программа.

Таблица 1. Сравнительные данные по базе данных *DB1*

Алгоритм	<i>EER</i> , %	<i>FRR</i> 100,%	<i>FRR</i> 1000,%	<i>Zero FMR</i> ,%	<i>REJ</i> <i>Enroll</i> ,%	<i>REJ</i> <i>Match</i> ,%	<i>Enroll</i> <i>Time</i> ,s	<i>Match</i> <i>Time</i> ,s
<i>PA15</i>	0,10	0,11	0,21	0,21	0,00	0,00	0,12	2,47
МНУЦ	0,13	0,16	0,16		0,00	0,00	0,78	0,86
<i>PB27</i>	0,24	0,18	0,39	0,82	0,00	0,00	1,30	1,15
<i>PA27</i>	0,25	0,21	0,36	0,86	0,00	0,00	2,26	1,99
<i>PB05</i>	0,52	0,86	0,96	1,11	0,00	0,00	0,54	0,58

Таблица 2. Сравнительные данные по базе данных *DB2*

Алгоритм	<i>EER</i> , %	<i>FRR</i> 100,%	<i>FRR</i> 1000,%	<i>Zero FMR</i> ,%	<i>REJ</i> <i>Enroll</i> ,%	<i>REJ</i> <i>Match</i> ,%	<i>Enroll</i> <i>Time</i> ,s	<i>Match</i> <i>Time</i> ,s
<i>PA27</i>	0,14	0,11	0,14	0,29	0,00	0,00	2,01	2,03
<i>PA15</i>	0,17	0,14	0,18	0,32	0,00	0,00	0,13	2,44
<i>PB27</i>	0,21	0,14	0,21	0,54	0,00	0,00	1,15	1,12
МНУЦ	0,40	<0,58	<0,58		0,00	0,00	0,95	1,05
<i>PA08</i>	0,52	0,64	0,75	0,82	0,00	0,00	0,67	0,68

Точно повторить условия тестирования (<http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/perfeval.asp>) оказалось невозможным, так как неизвестно, какие отпечатки пальцев выбирались в качестве эталонных. Поэтому на основании приведенных в таблицах данных можно сделать общий вывод о том, что полученные результаты находятся на уровне лучших, представленных на <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/results.asp>.

База данных *NIST27* состоит из 258 отпечатков и соответствующих им данных. В качестве входных данных использованы не изображения отпечатков пальцев, а результаты кодирования (выделения особых точек) этих изображений оператором. На этой базе данных было получено 83,72 процента правильного распознавания.

**Заключение.** Предложенная технология кодирования и распознавания отпечатков паль-

цев основана на новом алгоритме разметки особых точек на двух сравниваемых папиллярных изображениях. При реализации алгоритма не требуется представления этих точек в виде упорядоченных последовательностей, в отличие от условий решения известных задач эластичной разметки с помощью метода динамического программирования. Проверка разработанных алгоритмов на базах данных *FVC2002* и *NIST27* показала, что они находятся на уровне лучших.

Эксперименты показали, что для улучшения работы технологии необходимо повысить надежность выделения особых точек и усовершенствовать алгоритм фильтрации с локальной настройкой параметров алгоритма на частоту и направление папиллярных линий.

1. *Handbook of fingerprint recognition* / D. Maltoni, D. Maio, A. Jain et al. – Springer, 2008 – 506 p.
2. *An identity-authentication system using fingerprints* / Anil K. Jain, Lin Hong, Sharath Pankanti et al. // Proc. of the IEEE. – Sept. 1997. – **85**, N 9. – P. 1365–1388.
3. *Danielsson P.E., Ye Q.Z.* Rotation-Invariant Operators Applied to Enhancement of Fingerprints // Proc. Ninth ICPR. – 1988. – P. 329–333.
4. *Мацелло В.В.* Алгоритм удаления помех при обработке графических изображений. // Автоматика. – 1986. – № 6. – С. 86–88.
5. *Kiyko V., Schlesinger M.* Width-Independent Fast Skeletonization Algorithm for Binary Pictures // Int. J. of Imaging Syst. and Technol. – 1991. – **3**. – P. 222–226.
6. *Wegstein J.H.* An automated fingerprint identification system // U.S. Government Publication, Washington, DC: U.S. Dept. Of Commerce, National Bureau of Standards, 1982.
7. *Jonker R., Volgenant A.* A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems // Computing. – 1987. – **38**. – P. 325–340.

Поступила 22.10.2014  
Тел. для справок: +38 044 526-3018 (Киев)  
E-mail: [vkiiiko@gmail.com](mailto:vkiiiko@gmail.com), [matsello@gmail.com](mailto:matsello@gmail.com)  
© В.М. Кийко, В.В. Мацелло, 2015