

Ю. И. Рассадкин, А. В. Синицын

СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Описывается использование алгоритмов машинного зрения применительно к задаче идентификации личности человека по изображению лица. Описаны алгоритмы идентификации по количественным и качественным признакам, приведены результаты экспериментов.

E-mail: rassadin@sm.bmstu.ru

Ключевые слова: распознавание изображений, системы технического зрения, идентификация личности, классификация объектов.

При разработке современных робототехнических систем большую роль традиционно играют системы технического зрения. Они позволяют решать задачи навигации, обхода препятствий, анализа целевых объектов. Создание таких систем требует разработки алгоритмов распознавания, классификации и анализа изображений, объектов и сцен. Эти алгоритмы, базируясь на фундаментальных принципах распознавания образов, могут иметь двойное применение, т.е. помимо робототехники использоваться и в других областях.

На кафедре СМ-7 МГТУ им. Н.Э. Баумана разработке систем машинного зрения традиционно уделяется большое внимание, так как они являются важным компонентом интеллектуальных систем управления мобильными роботами. Алгоритмы, созданные для использования в системах машинного зрения роботов, оказалось возможным применить при решении задачи идентификации личности человека.

Идентификация личности человека, а также максимально возможная автоматизация этого процесса с применением средств электронно-вычислительной техники в течение длительного времени были и остаются весьма актуальной задачей. Она решается прежде всего криминалистическими службами (в ходе поиска и идентификации подозреваемых, без вести пропавших людей, опознания трупов), а также другими организациями, заинтересованными в ограничении доступа к конфиденциальной информации или материальным ценностям.

Системы идентификации личности изучаются уже более 30 лет. Существует несколько подходов к решению задачи идентификации. Прежде всего это дактилоскопия, использующая для установления личности характеристики папиллярных узоров кожи человека (чаще всего отпечатки пальцев). Хотя дактилоскопические методы обеспечивают высокую степень достоверности, их применение не всегда удобно и возможно. В первую очередь, это связано с тем, что для получения отпечатка папиллярного узора необходим непосредственный контакт устройства ввода с поверхностью кожи человека, что в ряде случаев невозможно или нежелательно.

В то же время существует и другой подход, предусматривающий проведение идентификации по характерным особенностям человеческого лица (с использованием его изображения). Этот подход широко применяется в криминалистике при организации розыска подозреваемых путем накопления в различных картотеках большого числа фотоизображений и последующего поиска по этим картотекам подозреваемого лица по его фотоизображению или композиционному субъективному фотопортрету (фотороботу). Вся эта работа, как правило, ведется "вручную", задача идентификации решается путем визуального сравнения изображений двух лиц экспертом-криминалистом. Такая процедура требует специальной подготовки человека, выполняющего сравнение, и занимает значительное время при необходимости поиска по большому массиву изображений. Система автоматической идентификации человеческих лиц позволила бы существенно повысить производительность труда работников криминалистических служб, а также повысить эффективность их работы, так как появилась бы возможность оперативной проверки фотографии подозреваемого по большому массиву подучетных лиц.

Общий подход к решению задачи идентификации лица. Для криминалистической поисковой системы наиболее важным параметром является скорость сравнения, так как объем обрабатываемых баз может быть очень большим. При этом наличие небольшой погрешности допустимо, так как на выходе такого поиска может быть не одно, а несколько наиболее похожих на предъявленное фотоизображений, окончательный выбор между которыми выполняет эксперт.

Существуют проверенные многолетней криминалистической практикой методики проведения фотопортретных экспертиз. В соответствии с ними, в основе сравнения фотопортретов лежит выделение и определение отобразившихся на них идентификационных признаков внешности. Существуют качественные (точное измерение которых невозможно или несущественно) и количественные (выраженные числом) признаки. К качественным признакам относятся форма, величина (относительная), положение, наличие (отсутствие) элементов, степень симметрии парных элементов, выраженность. В качестве количественных признаков используются относительные размеры элементов лица.

Очевидно, что совокупность признаков должна в наибольшей степени отражать те свойства объектов, которые важны для их распознавания. Уменьшение числа признаков снижает затраты на проведение измерений и вычислений, но может привести к падению достоверности распознавания. С практической точки зрения требования минимума общей размерности задачи распознавания и максимума достоверности оказываются противоречивыми. Уже из этого очевидного

факта следует большая важность формирования признакового пространства [1, 2].

Идентификация по количественным признакам. В основу формирования пространства количественных признаков в проводившихся работах положена криминалистическая методика Зинина–Кирсановой [3], успешно используемая в криминалистической практике в течение многих лет. Для формирования вектора идентификационных признаков, согласно этой методике, необходимо: расставить на изображении лица антропометрические точки (рис. 1); определить линейные размеры отдельных частей лица; вычислить относительные размеры.

После выбора пространства признаков необходимо проанализировать, насколько эти признаки пригодны для применения в автоматизированной системе идентификации, и сформировать вектор количественных признаков.

Положение некоторых антропометрических точек очень условно, положение части из них можно определить только по профильному изображению лица, поэтому на основании результатов обширных экспериментальных исследований (подвергнуто обработке и анализу более тысячи изображений) часть точек признаны непригодными для дальнейшей автоматической идентификации.

Кроме того, в проводившихся ранее экспериментальных исследованиях [4] показано, что использование при идентификации точек 1,

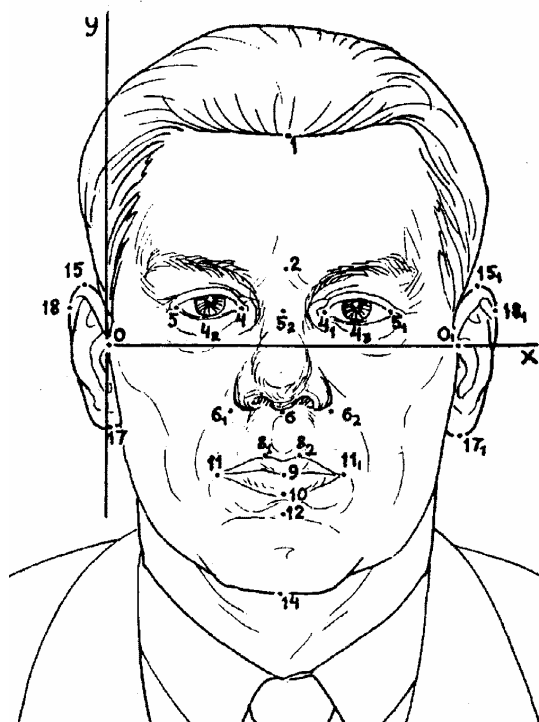


Рис. 1. Антропометрические точки

6, 15, 15₁, 17, 17₁, 18, 18₁, 0, 0₁ либо никак не влияет на результат поиска, либо ухудшает его.

Таким образом, в качестве количественных признаков для идентификации рассматривались линейные размеры, перечисленные в таблице, и содержащие всю доступную достоверную информацию о количественных характеристиках лица.

№	Антропометрические точки	Название размера
1	$x(4_2-4_3)$	Расстояние между зрачками глаз
2	$x(4_2-6)$	Расстояние между линией зрачков и кончиком носа
3	$x(4-5)$	Ширина глаза
4	$x(4-4_1)$	Расстояние между внутренними углами глаз
5	$x(6-6_2)$	Ширина носа
6	$y(2-6)$	Высота носа
7	$y(6-14)$	Высота ротоподбородочной части
8	$x(11-11_1)$	Ширина рта
9	$y(6-8)$	Высота верхней губы
10	$y(10-14)$	Высота подбородка

Чтобы исключить влияние возможных различий масштабов изображений, в качестве количественных признаков необходимо использовать не абсолютные, а относительные размеры элементов лица. Для этого абсолютные размеры делятся на значение базового размера. В качестве базового выбирается один из линейных размеров с учетом следующих рекомендаций:

- антропометрические точки, определяющие базовый размер, должны определяться с высокой точностью на любом изображении лица, чтобы уменьшить погрешности при вычислении относительных размеров;

- базовый размер должен быть по возможности большим по сравнению с остальными размерами (из тех же соображений).

Кроме того, необходимо рассматривать отдельно горизонтальные и вертикальные размеры, чтобы исключить влияние поворота головы вокруг горизонтальной и вертикальной осей. Исходя из этих соображений, подтвержденных результатами проведенных экспериментальных исследований, в качестве базовых размеров выбраны:

- расстояние между зрачками $x(4_2-4_3)$ в качестве горизонтального базового размера;

- расстояние от линии зрачков до верхнегубной точки $y(4_2-8)$ в качестве вертикального базового размера.

Пусть Ah и Av соответственно горизонтальный и вертикальный абсолютный размеры, а Bh и Bv — горизонтальный и вертикальный базовые размеры. Тогда относительные размеры Lh и Lv будут вычисляться по формулам

$$Lh = \frac{Ah}{Bh}; \quad Lv = \frac{Av}{Bv}, \quad (1)$$

где $Bh = y(4_2-8)$, $Bv = x(4_2-4_3)$.

Рассмотрим вопрос о влиянии на сформированный вектор признаков возможного наклона или поворота головы на изображении с учетом закономерностей изменения относительных размеров проекций лица при различных положениях головы [3].

1. При наклоне головы на небольшой угол к правому или левому плечу горизонтальные и вертикальные проекции размеров изменяются пропорционально, поэтому относительные размеры, вычисленные отдельно для группы горизонтальных и отдельно для группы вертикальных размеров, остаются неизменными. Проведенные эксперименты подтвердили, что изменения значений размерных признаков при указанном наклоне головы не превышают значения случайной ошибки при измерении размера (определении положения антропометрической точки) и поэтому могут специально не учитываться.

2. Наклон головы вперед или назад приводит к значительным изменениям размерных отношений лица по вертикали (горизонтальные размеры при этом не меняются). Соотношения между вертикальными размерами не меняются, если они расположены в параллельных плоскостях, а наклон головы не превосходит 20° . Учитывая, что реально встречающийся естественный наклон головы не превосходит 20° , а принятые к рассмотрению размеры расположены в параллельных плоскостях, можно сделать вывод об отсутствии влияния на выбранные признаки наклона головы вперед или назад.

3. Поворот головы от фаса к профилю влечет уменьшение абсолютных размеров проекций лица по горизонтали. Однако относительные размеры по горизонтали при незначительных поворотах головы, когда парные точки лица хорошо различимы, не претерпевают изменений.

Таким образом, из приведенных соображений (основанных на экспериментальных данных и обобщении экспертной практики [3]) следует, что значения выбранных признаков не должны существенно (превышая значение случайной погрешности определения признаков) изменяться при поворотах головы на небольшие углы (в пределах реально встречающихся естественных поворотов, как правило, не превышающих $5^\circ \dots 10^\circ$).

В дополнение к линейным относительным размерам в разработанных алгоритмах использовались угловые размеры. Угол измеряется

в основании треугольника, построенного по трем определенным антропометрическим точкам. Для обеспечения независимости углового значения от поворотов головы вычисление углов выполнялось через отношения линейных признаков (являющихся катетами соответствующего прямоугольного треугольника). Поскольку относительные линейные признаки (как показано далее) не изменяются при поворотах головы, то и вычисленные по ним угловые признаки изменяться не должны.

В результате для выполнения идентификации лица по количественным признакам в разработанном алгоритме использовался вектор из 15 признаков, 9 из которых составляют относительные линейные размеры элементов лица, а 6 признаков — угловые характеристики (линейный размер № 1 не включается в вектор признаков, так как он является горизонтальным базовым и его относительное значение всегда будет равно единице).

На рис. 2 представлено изображение лица, на котором с помощью автоматического алгоритма проставлены все описанные антропометрические точки и определены размеры-признаки (показаны только линейные размеры).

Идентификация по качественным признакам. К качественным признакам относятся следующие характеристики элементов внешности: форма, относительная величина, положение, число таких элементов как морщины, родинки, степень симметрии парных элементов.

Для идентификации лица по качественным признакам можно использовать непосредственно изображение человеческого лица или не-

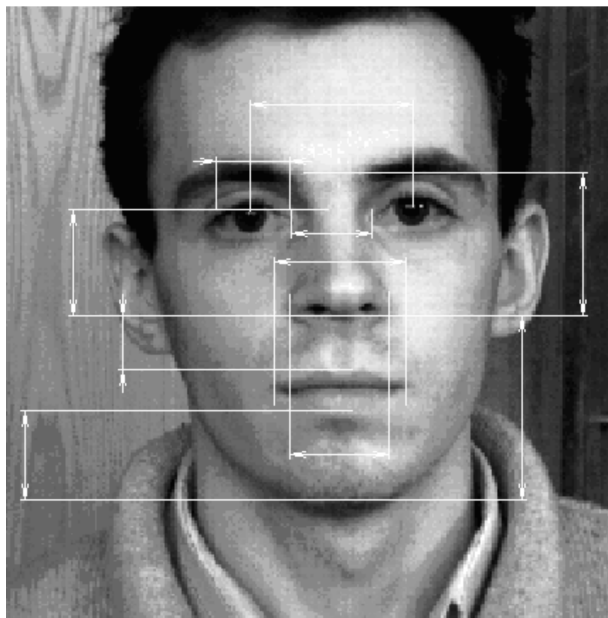


Рис. 2. Линейные размеры-признаки

которой его части, так как интенсивности точек изображения отражают форму лица, его элементов, положение элементов, их цвет, степень симметрии, т.е. весь набор качественных признаков. При этом признаки в чистом виде не выделяются, а в качестве вектора признаков используется само изображение, представленное в двумерном виде как матрица яркостей точек изображения.

Для выполнения идентификации по качественным признакам в литературе рассматриваются два основных подхода:

- шаблонное сравнение бинаризованного изображения;
- идентификация на основе дискретных разложений с использованием собственных векторов.

Первый подход очень чувствителен к изменению яркости и контраста. Второй подход имеет высокую алгоритмическую сложность, что приводит к увеличению времени сравнения и размера вектора признаков, а также отличается сложностью нормализации яркости и контраста.

Поэтому для сравнения количественных признаков было предложено использовать сравнение отдельных участков (зон) изображения лица корреляционным методом.

Предположим, что в поле зрения находится изображение одного объекта и известен его эталон. Эталоном является изображение B_0 , определенное на растре D , причем носителем этого изображения является область $E_0 \subset D$, совпадающая по форме с областью $E \subset D$, соответствующей изображению реального объекта (носителем изображения B называется множество точек (i, j) , в которых $B(i, j) \neq 0$). Это значит, что процедурой смещения вдоль строк и столбцов растра область E_0 можно перевести в область E . Пусть p, s — параметры этого смещения, $B(i, j)$ — изображение, содержащее объект. В наиболее простом случае

$$B(i, j) = B_0(i - p, j - s), \quad (i, j) \in E. \quad (2)$$

Предположим вначале, что отсутствуют преобразования яркости (эталонное и реальное изображения формируются в условиях одной и той же освещенности и одного и того же контраста). При отсутствии помех параметры p, s можно найти как параметры, для которых выполнено условие (2). Однако ввиду наличия помех на любом реальном изображении условие (2) не может быть выполнено ни при каких параметрах.

Пусть m, n — текущие параметры, а $E_{m,n}$ — область растра, полученная из E_0 смещением на m элементов вдоль строк и на n элементов вдоль столбцов; $\xi(m, n)$ — мера близости изображений $B(i, j)$ и $B_0(i - m, j - n)$ в области $E_{m,n}$. Тогда искомые параметры можно

определить из условия экстремума

$$(p, s) = \arg \max_{(m,n) \in D_0} \xi(m, n). \quad (3)$$

Множество D_0 состоит из целочисленных пар (m, n) , для которых $1 \leq i + m \leq \alpha$, $1 \leq j + n \leq \beta$ для всех $(i, j) \in E_0$. Здесь α и β — число строк и столбцов растра соответственно.

Суть корреляционных алгоритмов состоит в реализации формулы (3). Корреляционные алгоритмы различаются выбором правила вычисления меры близости изображений и, кроме того, способом максимизации функции $\xi(m, n)$. Будем считать, что чем больше мера близости, тем более похожи изображения.

Мера близости двух изображений $B_1(i, j)$ и $B_2(i, j)$ обычно определяется корреляционным коэффициентом. Для корреляционного коэффициента введем обозначение $\gamma_R(B_1, B_2)$, где R — часть поля зрения D , в которой сравниваются изображения. Прежде всего, выясним, в каких случаях должно быть выполнено условие $\gamma_R(B_1, B_2) = \gamma_R(B_1, B_1)$. При отсутствии преобразования яркости это условие может быть выполнено только при совпадении изображений B_1, B_2 в области R .

Если же допустимы преобразования яркости, т.е. нет полной информации об эталоне, то указанное равенство должно быть выполнено и для изображений B_1, B_2 , отличающихся освещенностью и контрастом.

Инвариантный к изменению освещенности коэффициент корреляции можно получить с помощью использования скалярного произведения в $L^2(R)$:

$$\gamma_R(B_1, B_2) = \frac{\langle B_1, B_2 \rangle}{\|B_1\| \|B_2\|}, \quad (4)$$

где

$$\|B\| = \left(\sum_{(i,j) \in R} B^2(i, j) \right)^{1/2}; \quad (5)$$

$$\langle B_1, B_2 \rangle = \sum_{(i,j) \in R} B_1(i, j) B_2(i, j). \quad (6)$$

Заменив в правой части формулы (4) изображения B_1 и B_2 изображениями \hat{B}_1, \hat{B}_2 , получим коэффициент корреляции, инвариантный к преобразованиям контраста и освещенности. Коэффициент корреляции (4) часто называют классическим. В отличие от других, приведенных ранее, он получил наибольшее распространение.

Важным достоинством классического корреляционного алгоритма является заранее известное значение максимума коэффициента

$\gamma_R(B_1, B_2)$ — независимо от конкретной ситуации он равен единице. Это следует из того, что скалярное произведение $\langle B_1, B_2 \rangle$ никогда не превышает произведения норм $\|B_1\| \|B_2\|$, а совпадение этих значений имеет место при $B_1 = kB_2$, где k — произвольный коэффициент, в частности, когда изображения B_1 и B_2 совпадают.

Таким образом, суть корреляционного сравнения изображений заключается в нахождении максимального совпадения двух предъявляемых изображений по формуле (3), где в качестве меры близости $\xi(m, n)$ используется коэффициент корреляции (4).

$$\gamma_{\max} = \max_{(m,n)} \gamma_R(B_1(i, j), B_2(i - m, j - n)). \quad (7)$$

Максимальный коэффициент корреляции γ_{\max} определяет сходство двух предъявляемых изображений лица и может принимать значения от -1 до $+1$ (значение $+1$ соответствует полному тождеству изображений).

Формула (7) предполагает определение максимального коэффициента корреляции путем последовательного смещения эталона относительно предъявляемого изображения на m элементов вдоль строк и на n элементов вдоль столбцов, так как максимальное значение коэффициента будет достигнуто в момент точного “совмещения” изображений лиц. Такой подход предусматривает значительный объем вычислений, так как нужно вычислить коэффициент корреляции по формуле (4) $m \times n$ раз, последовательно смещая эталон по всему изображению. Однако, если заранее известны координаты хотя бы двух точек на изображении каждого лица, совместить изображения можно, совместив точки с известными координатами. Поскольку максимальное значение коэффициента корреляции достигается при точном совмещении изображений лиц, в данном случае нет необходимости в итерационном вычислении γ_R . Можно сначала совместить по известным координатам две точки, а затем один раз вычислить значение коэффициента корреляции γ_R по формуле (4), которое и будет максимальным. Этот вариант соответствует $m = n = 0$ в формуле (7).

В ходе проведенных экспериментов установлено, что в качестве двух опорных точек лучше всего использовать точки зрачков, так как они наиболее точно и однозначно проставляются вручную на изображении лица и с высокой точностью определяются с помощью автоматического алгоритма, что делает возможным полностью автоматизировать процесс идентификации по качественным признакам.

Чтобы совместить изображения, используя известные координаты точек зрачков, необходимо выполнить ряд аффинных преобразований для компенсации разности положения, разности масштаба и взаимного углового положения двух сравниваемых лиц. Для упрощения представления описания лица в базе данных в разрабатываемой системе

выполнялось приведение каждого изображения лица к единому виду, т.е. к единому положению, масштабу и угловому положению.

Как уже упоминалось, при идентификации по качественным признакам сравниваются изображения лица без выделения самих признаков в явном виде. Однако сравнение всего изображения лица представляется нецелесообразным, так как при этом оказываются велики затраты машинного времени и на лице могут быть области, вид которых изменяется достаточно сильно под влиянием внешних факторов (например, прическа, периферийная зона лица). Поэтому в разработанном алгоритме сравниваются отдельные области лица, отвечающие ряду требований:

— они должны содержать максимальный объем информации о чертах лица;

— они должны быть в минимальной степени подвержены изменениям, связанным с освещенностью (тени), мимикой лица, пространственным положением головы, прической и другими внешними факторами.

Исходя из этих требований и на основе накопленного экспериментального материала в разработанном алгоритме для корреляционного сравнения используются две зоны: глаз и носа.

Как уже отмечалось, метод корреляционного сравнения инвариантен к изменениям яркости и контраста. Однако на предъявляемых изображениях могут присутствовать искажения иного рода: неравномерность освещения, а также тени от элементов лица (например, носа), возникающие при нефронтальном освещении. Такие искажения приводят к ухудшению результатов корреляционного сравнения, если они присутствуют на одном из сравниваемых изображений, а на другом отсутствуют либо имеют другой характер. Для устранения этого эффекта в результате проведенных исследований разработан метод частичного маскирования зоны. Суть его заключается в том, что часть зоны, подверженная искажениям, исключается из рассмотрения и не учитывается при вычислении коэффициента корреляции. Для этого используется маска зоны $M(i, j)$, представляющая собой бинарный массив, размеры которого совпадают с размерами соответствующей зоны. Элементы массива могут иметь значения нуля (соответствующая точка изображения не учитывается) или единица (учитывается). Точка $B(i, j)$ используется при вычислении коэффициента корреляции, только если $M(i, j) = 1$.

Практические эксперименты и результаты тестирования подтвердили, что применение метода частичного маскирования зоны позволяет существенно улучшить показатели системы при наличии теней и неравномерности освещения. Однако при частичном маскировании размер зоны, используемой при сравнении, уменьшается, что приводит к потере части информации о качественных характеристиках лица.

Поэтому ошибка классификации оказывается все же выше, чем при отсутствии искажений, но существенно ниже, чем при наличии искажений и сравнении без применения маскирования.

Заключение. Описанные алгоритмы были реализованы в виде программного комплекса (ПК) идентификации личности человека по изображению лица “Облик” (разработчики — доцент кафедры СМ-7 Ю.И. Рассадкин, аспиранты А.В. Сеницын, С.В. Махалов). Программный комплекс успешно прошел испытания в Экспертно-криминалистическом центре МВД РФ, в ходе которых проводились эксперименты по поиску и сравнению заданных лиц на фоне тестового репрезентативного массива, содержащего 1000 изображений различных лиц.

В ходе экспериментов были достигнуты следующие показатели: минимальное значение средневзвешенной ошибки классификации с использованием количественных признаков — 18 %, с использованием качественных признаков — 1 %.

Высокая погрешность метода идентификации с использованием количественных признаков не позволяет применять его как самостоятельный метод идентификации, поскольку он характеризуется очень малым временем операции сравнения, его можно использовать в качестве первой стадии (грубого отбора) в двухстадийной процедуре поиска, где вторая стадия — точное сравнение с использованием качественных признаков. Именно такой двухстадийный поиск реализован в ПК “Облик”.

Испытания также показали, что ПК “Облик” может с успехом применяться для решения еще одной важной задачи из криминалистической практики — подбора типажно похожих лиц для проведения опознания.

В конце 1996 г. ПК “Облик” был поставлен на опытную эксплуатацию в экспертно-криминалистический отдел УВД Юго-Западного округа Москвы. В 1995–1996 гг. отдел СМ4-3 НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с инженерно-внедренческим центром автоматизированных информатизационных систем (ИВЦ АИС) принимал участие в разработке системы “ФОТОТЕКА”, задачей которой являлась автоматизация идентификации подучетных лиц с использованием их фотографий и фотороботов. Система “ФОТОТЕКА” являлась составной частью автоматизированной информационной системы зонального информационного центра (ЗИЦ) ГУВД Москвы. В основу системы были положены описанные в данной статье алгоритмы. По состоянию на 1999 г. ПК “Облик” эксплуатировался в четырех городах, в том числе в трех подразделениях ГУВД Москвы.

Работы, проводившиеся в 1990-е гг., получили дальнейшее развитие в текущем десятилетии. По заказу Федеральной службы по кон-

тролю за незаконным оборотом наркотиков в 2005–2006 гг. с положительной оценкой выполнены НИР и этап эскизного проектирования автоматизированной системы идентификации лиц. Дальнейшие этапы ОКР — техническое проектирование и создание опытного образца системы на основе результатов, полученных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, — были поручены организациям, специализирующимся в области разработки АСУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф о м и н Я. А., Т а р л о в с к и й Г. Р. Статистическая теория распознавания образов. – М.: Радио и связь, 1986. – 263 с.
2. Ф о р А. Восприятие и распознавание образов / Пер. с фр. А.В. Серединского; Под ред. Г.П. Катгуса. – М.: Машиностроение, 1989. – 271 с.
3. З и н и н А. М., К и р с а н о в а Л. З. Криминалистическая фотопортретная экспертиза: Учеб. пособие / Под ред. В.А. Снеткова, З.И. Кирсанова. – М.: ВНКЦ МВД СССР, 1991. – 88 с.
4. Г л а з у н о в А. С., О р л о в С. В., Р я б ц е в В. Е. Поиск по антропологическим точкам. Экспериментальное исследование // Информатизация правоохранительных систем: Тезисы докл. V междунар. конф. – М., 1996. – С. 168–170.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012