

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

УДК 681.327.12.001.362

САМАЛЬ Дмитрий Иванович 

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА ПО ФОТОПОРТРЕТУ НА
ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2002

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт технической кибернетики Национальной академии наук Беларуси»

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Абламейко С.В. (Институт технической кибернетики НАН Беларуси),
доктор технических наук
Старовойтов В.В. (Институт технической кибернетики НАН Беларуси).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Тузиков А.В. (Унитарное предприятие «Информационные технологии» НАН Беларуси),
кандидат технических наук
Татур М.М. (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники).

Оппонирующая организация – Белорусский государственный университет.

Защита диссертации состоится 16 апреля 2002 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.04.01 при Государственном научном учреждении «Институт технической кибернетики Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220012, Минск, ул. Сурганова, 6, тел. ученого секретаря (017) 284-21-47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт технической кибернетики Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «13» марта 2002 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор технических наук

С.Ф. Липницкий



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Идентификация человека всегда была важной проблемой. В процессе эволюции вычислительной техники стали активно развиваться биометрические технологии – «методы и технические средства получения и использования биометрических данных человека в целях его идентификации»¹. Их целью является разработка автоматизированных систем идентификации человека на основе биометрических признаков: отпечатков пальцев, характеристик голоса и речи, рисунка радужной оболочки глаза, изображения лица.

Одной из причин повышенного внимания к биометрическим технологиям является существование обширного круга коммерческих и социальных приложений, где автоматическая идентификация человека будет воспринята весьма успешно. Так, например, идентификация человека по его лицу может применяться в системах контроля удостоверений личности (паспортов, водительских прав), информационной безопасности (доступ к ЭВМ, базам данных и т.д.), наблюдения и расследования криминальных событий, а также в банковской сфере (банкоматах, системах удалённого управления счётом). Кроме того, именно проблема надёжной идентификации пользователя является на данный момент основным препятствием для дальнейшего развития информационных сред, различного рода виртуальных сервисов и т.п. Ожидается, что применение подобных систем существенно уменьшит количество преступлений, связанных с несанкционированным доступом, в том числе и в компьютерных сетях, причём именно технология идентификации человека на основе изображений лиц признана наиболее приемлемой для массового применения, так как она не требует физического контакта с устройством, ненавязчива, естественна и, в потенциале, может обладать приемлемыми надёжностью, скоростью и ценой.

Поиск в базах данных по фотопортрету человека, автоматизированный контроль удостоверений личности особенно актуальны для правоохранительных органов большинства стран в контексте увеличения количества террористических актов и уголовных преступлений на фоне повышения общей мобильности населения.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Основой диссертационной работы являются исследования, проведённые автором в 1996-2001 гг. в Институте технической кибернетики НАН Беларуси в рамках научно-исследовательских программ: «Интеллект-17» (тема

¹ Кухарев Г. А. Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. – СПб.: Политехника, 2001. – 240 с.

«Создание теоретических основ разработки, анализа и распознавания изображений с использованием методов искусственного интеллекта», 1996 – 2000 гг.), «Инфотех-12» (тема «Разработка методов и компьютерных технологий распознавания изображений», 2001 – 2005 гг.), «Информационные технологии» (тема «Разработка методов, инструментальных средств и интеллектуальных технологий формирования цифровых моделей местности на основе автоматизированного дешифрирования аэро- и космоснимков», 2001 – 2003 гг.), а также проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований «Проблемно-ориентированное распознавание объектов полутонных изображений» (грант БРФФИ №Т98-226 1999 – 2001 гг.) и «Предварительная обработка и анализ фотопортретов» (грант БРФФИ для молодых учёных №Т98М-102, 1999 – 2000 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка комплекса алгоритмов для автоматической идентификации человека по фотопортрету.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих основных **задач**:

- разработки алгоритма автоматической локализации центров зрачков человека, изображённого на фотопортрете;
- разработки алгоритма предварительной обработки и нормализации цифровых фотопортретов;
- разработки алгоритмов поиска антропометрических точек лица на фотопортретах;
- определения множества информативных признаков для распознавания человека по изображению лица;
- разработки алгоритмов сравнения фотопортретов и идентификации человека по фотопортрету.

Методы исследования

Теоретические методы исследования основывались на методах цифровой обработки изображений, распознавания образов, дискретных преобразований и системного анализа. Экспериментальная часть исследования базировалась на обработке и анализе цифровых изображений с помощью ЭВМ с последующей численной и визуальной оценкой результатов. Для программной реализации разработанных алгоритмов использовались методы создания программных систем и программирование на языках высокого уровня, моделирование с помощью специализированных пакетов обработки данных и изображений.

Научная новизна полученных результатов

- Разработаны алгоритмы поиска области лица на фотопортрете и локализации центров зрачков, отличающиеся способностью находить в режиме реального времени центры зрачков на слабоконтрастных изображениях, полученных сканированием фотографии с удостоверения личности.
- Разработан алгоритм повышения контраста и нормализации цифровых фотопортретов, позволяющий представить анализируемые фотопортреты в едином масштабе и ориентации с близкими яркостно-контрастными характеристиками. Он отличается возможностью выравнивания яркостных характеристик как слабоконтрастных (полученных сканированием удостоверения личности) фотопортретов, так и контрастных изображений человека, поступивших с видеокамеры.
- Разработаны алгоритмы поиска восьми основных антропометрических точек лица на цифровых фотопортретах. Впервые экспериментально определены параметры фильтра Габора, применяемого для обнаружения этих точек, и параметры нормализации фотопортретов.
- Определены информативные признаки изображения лица человека на основе антропометрических точек. Особенностью набора признаков является робастность к возрастным изменениям внешности человека, освещённости, макияжу и незначительным вариациям ракурса съёмки, инвариантность к масштабу, яркости и контрасту.
- Разработаны алгоритмы идентификации человека по цифровым фотопортретам на основе геометрических признаков и эластичных преобразований. Их основными отличиями от существующих алгоритмов являются: работа в условиях отсутствия априорной информации о людях, изображенных на сравниваемой паре фотографий, отсутствие необходимости в предварительном обучении системы, а также устойчивость к возрастным изменениям людей, изображенных на обрабатываемых фотопортретах.

Практическая значимость полученных результатов

Разработанные алгоритмы могут быть использованы в автоматизированных системах проведения криминалистической фотопортретной экспертизы и автоматических контрольно-пропускных устройствах. Они могут также применяться в системах информационной безопасности (доступ к ЭВМ и отдельным программам, базам данных, криптографическим приложениям, медицинским сведениям, Интернету, системам электронной торговли и т.д.), наблюдения и расследования криминальных происшествий, а также в банковских целях (банкоматах, системах удалённого управления счётом).

Результаты диссертационной работы в виде законченной динамически подключаемой библиотеки программ внедрены на НПП «Регула», производящем системы автоматизированного контроля паспортов для

пунктов пограничного контроля Республики Беларусь и Российской Федерации.

Результаты диссертационной работы были использованы в учебных процессах Белорусского государственного технологического университета и Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники – в курсах по обработке информации и распознаванию образов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- Алгоритм локализации центров зрачков на фотопортретах с разным контрастом и фоном.
- Алгоритм предварительной обработки и нормализации цифровых фотопортретов.
- Алгоритмы поиска антропометрических точек лица на цифровых фотопортретах с помощью фильтров Габора.
- Алгоритм сравнения двух фотопортретов без использования априорной информации.
- Технология поиска портретов людей, похожих на заданного человека, в базе данных.

Личный вклад соискателя

Основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Все алгоритмы, обсуждаемые в работе, были разработаны и экспериментально исследованы автором самостоятельно. Научные руководители принимали участие в постановке цели и задач исследования, их предварительном анализе, планировании экспериментов, а также в обсуждении полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: “Computer Graphics and Image Processing” (г. Борки, Польша, 1998 г.), “Systems and Signals in Intelligent Technologies” (г. Минск, 1998 г.), “UkrOBRAZ'98” (г. Киев, Украина, 1998 г.), «Распознавание образов и обработка информации» (г. Минск, 1999 г., 2001 г.), “Nonlinear Signal and Image Processing” (г. Анталия, Турция, 1999 г.), “Acoustic, Speech, and Signal Processing” (г. Стамбул, Турция, 2000 г.), на международном симпозиуме “Optical Science, Engineering, and Instrumentation” (г. Денвер, США, 1999 г.), на Республиканском научном семинаре «Математическое моделирование сложных систем и анализ данных» (БГУ, 1999 г.), на семинарах Пражского технического университета (1997 г.), Щецинского политехнического университета (2000 г.) и Института технической кибернетики НАН Беларуси (1997 – 2002 гг.).

Опубликованность результатов

По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ. Из них 1 статья в международном журнале [1], 7 статей в трудах международных конференций [13, 7, 9, 10, 13, 12, 11], 1 препринт [6], 1 тезисы доклада на международной конференции [8], 4 статьи в сборниках Института технической кибернетики НАН Беларуси [2, 3, 4, 5]. Прикладные результаты отражены в 6 отчётах о НИР ИТК НАН Беларуси по указанным выше темам.

Структура и объём диссертации

Диссертация изложена на 170 страницах. Она состоит из введения (4 стр.), общей характеристики работы (5 стр.), четырёх глав (87 стр.), заключения (2 стр.). Работа содержит 68 иллюстраций (43 стр.) и 10 таблиц (6 стр.), список использованных источников, состоящий из 182 наименований (13 стр.), приложение 1 с экспериментальными данными и иллюстрациями (5 стр.), приложение 2 с документами об использовании результатов диссертационной работы (4 стр.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность и практическая значимость темы диссертационной работы, кратко излагается состояние предметной области, определяются основные задачи исследования, вводится термин «фотопортрет», под которым подразумевается фотографическое изображение лица одного человека в фас (например, фото для документов) без головных уборов, украшений, солнечных очков и прочих предметов, которые могут закрывать или искажать части лица.

Первая глава представляет собой обзор по проблеме «автоматического распознавания человека по изображению лица». В разделе 1.1 она рассмотрена с позиций трёх ключевых задач:

- 1) *автоматический контроль удостоверений личности/ верификация человека по предъявляемому удостоверению личности;*
- 2) *автоматический контроль доступа;*
- 3) *идентификация человека по фотографии – поиск в базе данных изображений людей, похожих на заданного.*

Определены основные требования к системам указанных типов, выявлены сложности и препятствия для их реализации, установлено, что задачи автоматического контроля удостоверений личности и поиска фотопортретов в базе данных являются наименее исследованными.

В разделе 1.2 приводится обзор методов и подходов, применяемых для распознавания людей по фотопортретам. Среди таких методов следует отметить геометрический подход, метод главных компонент, распознавание с помощью нейронных сетей и эластичного сопоставления графов.

Разделы 1.3 и 1.4 посвящены соответственно анализу аппарата, применяемого для нормализации фотопортретов, и обзору существующих коммерческих и экспериментальных систем распознавания людей по фотопортретам. Выявлено отсутствие систем, решающих задачу контроля удостоверений личности. В литературе описаны результаты исследования задачи поиска фотопортретов в базе данных лишь для малых по объёму баз – содержащих не более 10^4 записей. Подавляющее большинство существующих систем не устойчиво к возрастным изменениям внешности распознаваемого человека: по данным открытого испытания систем на базе изображений FERET, коэффициент распознавания у лучших систем падает до 60%, если исходные фотопортреты имеют разницу во времени съёмки более полугода.

Вторая глава посвящена решению задач предварительной обработки и нормализации исходных изображений, а также выделению информации для использования на последующих этапах распознавания. В ней приводятся разработанные алгоритмы поиска области лица и центров зрачков на фотопортрете, выравнивания яркостных характеристик исходного изображения, выделения восьми основных антропометрических точек лица.

В разделе 2.1 сформулированы ограничения на входные изображения.

В разделе 2.2 определена последовательность шагов этапа предобработки и нормализации:

- поиск области лица на изображении;
- обнаружение центров зрачков на портрете;
- поворот изображения (если требуется) – центры зрачков должны находиться на горизонтальной прямой;
- масштабирование (нормализация всех портретов по определённому расстоянию между зрачками);
- кадрирование (вырезание прямоугольной области с заданными размерами из полученного в результате предыдущих шагов изображения);
- выравнивание яркостных характеристик изображения, т.е. применение различных фильтров, изменяющих контраст, интенсивность и т.д., в зависимости от исходных значений параметров;
- выделение информации, требуемой для дальнейшего процесса распознавания, например, использование детектора края (оператор Собеля, Дериса - Deriche) либо подчёркивание некоторых черт лица («High Boosting»).

Исследованные алгоритмы поиска области лица и центров зрачков показали неудовлетворительные результаты при подаче на вход слабоконтрастных фотопортретов. Поэтому были разработаны новые алгоритмы, надёжно работающие при подаче на вход как изображений, полученных сканированием удостоверений личности, так и фотопортретов, поступивших с видеокамеры, с однотонным и сложным (пёстрым) фоном.

Алгоритм поиска области лица на фотопортрете состоит из следующих шагов:

Шаг 1: Выделение краёв на фотопортрете A с помощью оператора Собеля и инвертирование полученного изображения A' :

$$\bar{A}' = G - A', \quad (1)$$

где G – константа, равная количеству уровней яркости изображения, в данном случае $G = 255$.

Шаг 2: \bar{A}' бинаризуется в соответствии с методом Отсу:

$$A'' = Ot(\bar{A}') = \begin{cases} 0, & \bar{a}'_{ij} \leq T^{opt}; \\ 1, & \bar{a}'_{ij} > T^{opt}; \end{cases} \quad (2)$$

где T^{opt} – оптимальный для \bar{A}' порог бинаризации, вычисленный в соответствии с дискриминантным критерием максимальной межклассовой (объект/фон) дисперсии уровней яркости.

Шаг 3: Для A'' строится пирамида, состоящая из множества изображений $Mz = \{A''_1, A''_2, \dots, A''_t\}$, где A''_t – изображение с размерами $(m/c) \times (n/c)$, $c = 2t + p$ (в экспериментах $p = 14$). Каждый пиксель a''_t вычисляется в соответствии с выражением

$$a''_t(i, j) = \frac{1}{c^2} \sum_{x=i-c/2}^{i+c/2} \sum_{y=j-c/2}^{j+c/2} a''(x, y). \quad (3)$$

Шаг 4: Размеры изображений A''_t отличаются, соответственно и размеры лица (в пикселях) будут варьироваться. При сопоставлении эталона фиксированного размера (в результате экспериментов выбран эталон C (6×5)) с каждым из A''_t , разница в масштабе не играет существенной роли – там, где мозаичное изображение области лица будет совпадать по размеру с эталоном, функция сравнения $F(A''_t, C)$ будет иметь минимальное значение. В качестве $F(A''_t, C)$ может быть использована городская метрика:

$$F(A''_t, C) = d(A''_t, C) = \sum_{x=i-Tm/2}^{i+Tm/2} \sum_{y=j-Tn/2}^{j+Tn/2} |a''_t(x, y) - C(x, y)|. \quad (4)$$

В результате, оценив каждую из областей изображения, где может находиться лицо, выбирается та, при сравнении с которой $F(A''_t, C)$ даёт минимальный отклик. Если разница в значениях оценки F для нескольких областей минимальна или отсутствует, то проверяются соответствующие им области на смежных мозаиках A''_{t-1} , A''_{t+1} и вычисляется комплексная оценка.

Алгоритм поиска координат центров зрачков:

Шаг 1: Производится обработка области лица $A_F(x, y)$ с помощью тех же инструментов, что и в алгоритме поиска области лица: оператора Собеля, инверсии и метода Отсу. В результате преобразования $A_F(x, y) \rightarrow A'_F(x, y) \rightarrow$

$\bar{A}'_F(x,y) \rightarrow A''_F(x,y)$ получается бинаризованное изображение с подчеркнутыми чертами лица и осветленными областями волосяного покрова.

Шаг 2: Анализ вертикальной интегральной проекции (5) центральной части лица позволяет выделять горизонтальные полосы изображения A''_F шириной приблизительно 4-5 диаметров зрачка A^B_i , которым соответствуют значительные впадины на графике $V(x)$. В таких полосах находятся глаза и, иногда, брови и нос. При соблюдении ограничений раздела 2.1 таких полос выделяется в 70% случаев – одна, в 25% - две $A''_F \rightarrow U\{A^B_1, A^B_2, \dots A^B_i\}$.

$$V(x) = \sum_{y=y_1}^{y_2} I(x, y). \quad (5)$$

Здесь $I(x,y)$ - исходное изображение, $[x_1, y_1]$ и $[x_2, y_2]$ – координаты квадратной области изображения, по которой вычислялась проекция.

Шаг 3: Каждая из выделенных полос $U\{A^B_1, A^B_2, \dots A^B_i\}$ подвергается анализу с помощью преобразования Хоха (Haugh):

$$H^B_{iR} = A^B_i \otimes O_R, \quad \text{где} \quad O_R(m, n) = \begin{cases} 1, & (R-0,5)^2 < m^2 + n^2 < (R+0,5)^2, \\ 0. & \end{cases} \quad (6)$$

Результатом данного преобразования является отображение $A^B_q \rightarrow H^B_{qR}$, при котором каждому чёрному пикселю $a^B_q(i,j)$ ставится в соответствие окружность/полуокружность радиуса R пикселей с центром в $h^B_{qR}(i,j)$. Для каждой из областей проводится несколько подобных преобразований с различными $R = \{9, 12, 15, 17\}$. Геометрический смысл данного преобразования состоит в том, что при наличии в области A^B_q элементов в виде полуокружности или окружности радиуса R пиксель, соответствующий её центру, будет иметь наибольшее значение на множестве H^B_{qR} .

Учитывая информацию о том, что у мужчин расстояние между зрачками составляет 63 ± 7 мм, а у женщин - 61 ± 6 мм при диаметре радужки $d = 12$ мм, на изображении H^B_{qR} ищутся пики (локальные максимумы), удалённые друг от друга по горизонтали на расстояние $4,5-6d$. Из полученных претендентов выбирается одна с наибольшим суммарным значением на различных множествах H^B_{qR} .

Благодаря независимости от возможных вариантов изображений глаз и постепенному сужению области поиска зрачков данный алгоритм позволяет надёжно находить центры зрачков на слабоконтрастных изображениях.

При нормализации исходных фотопортретов иногда требуется повернуть изображения на произвольный угол α . Для выбора алгоритма, вносящего в исходное цифровое изображение минимальное количество искажений, в работе исследовались пять алгоритмов поворота цифровых изображений. В результате были сделаны следующие выводы: на этапе предварительной обработки изображений с целью минимизации вносимых в них искажений лучше

использовать алгоритм поворота сдвигом по Оуэну и Македону (7). Обрабатывать изображения в интерактивном режиме для последующего автоматического анализа лучше с помощью пакета COREL Photo-Paint®.

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -tg\alpha/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sin \alpha & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -tg\alpha/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Стабильное улучшение контраста и яркостных характеристик изображений было получено с помощью алгоритма нелинейного растяжения гистограммы, его формальная запись имеет следующей вид:

Если H_i – количество пикселей изображения со значением яркости i ($0 \leq i \leq 255$) и $G(x,y)$ – значение яркости пикселя (x,y) , то

$$Q = \sum_{i=0}^{255} (H_i)^r, \quad S_{G(x,y)} = \frac{255}{Q} \sum_{j=0}^{G(x,y)} (H_j)^r, \quad G'(x,y) = \begin{cases} 0, & S_{G(x,y)} \leq 0; \\ S_{G(x,y)}; \\ 255, & S_{G(x,y)} \geq 255. \end{cases} \quad (8)$$

Данный алгоритм хорошо зарекомендовал себя на большом количестве протестированных изображений (более 300). Его плюсом является прямая зависимость стандартного отклонения значений пикселей итогового изображения от параметра r .

В разделе.2.3 выполнен анализ возможности автоматического выделения антропометрических точек лица, их информативности и инвариантности признаков на их основе. Определены точки, дающие наиболее робастные признаки для идентификации.

Раздел 2.4 посвящён исследованию возможности применения фильтров Габора для обнаружения антропометрических точек лица. Общий вид фильтра может быть представлен как

$$h_{\theta_0}(x, y) = g_{\theta_0}(x, y) \exp\{i(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0)\}, \quad (9)$$

$$\text{где } g_{\theta_0}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_x\sigma_y}} \exp\left\{-\frac{(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(-x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0)^2}{2\sigma_y^2}\right\}; \quad (10)$$

$g_{\theta_0}(x, y)$ является двумерным гауссианом со стандартными отклонениями $\sigma_x\sigma_y$, повернутым на угол θ_0 .

Исходной гипотезой являлось предположение о существовании таких вариантов фильтра, которые имеют экстремальные значения в искомой антропометрической точке по сравнению со значениями, вычисленными в её окрестности.

Каждый вариант фильтра описывался шестью параметрами. Было выбрано несколько дискретных значений каждого из параметров. В ходе экспери-

ментов поочерёдно генерировались все возможные комбинации указанных параметров. Общее их количество составило $4 \times 3 \times 5 \times 6 \times 7 \times 2 = 5040$.

В ходе экспериментов каждый из вариантов фильтра, сгенерированных в соответствии с возможными значениями параметров, вычислялся для всех пикселей окрестности каждой из восьми искомым антропометрических точек. Так как значения фильтров Габора суть комплексные числа, то в каждом конкретном случае находились экстремумы для действительной (Re) и мнимой (Im) частей отдельно. Таким образом определялись четыре экстремума для каждого фильтра в окрестности отдельно взятой антропометрической точки конкретного фотопортрета – Re_max , Re_min , Im_max , Im_min . Местоположение каждого из экстремумов отдельного фильтра относительно искомой точки оценивалось городской метрикой в пикселях и усреднялось по всем обработанным изображениям. Полученные результаты анализировались с целью отбора вариантов фильтра с минимальным отклонением найденных экстремумов от заданной точки.

В результате экспериментов было установлено, что с помощью фильтров Габора можно находить координаты антропометрических точек лица. Отобраны лучшие варианты фильтра, позволяющие определять восемь основных антропометрических точек лица с точностью до 2 пикселей при расстоянии между зрачками 40 пикселей. Варианты предварительной обработки фотопортретов существенно влияли на точность поиска. Для нахождения большинства из указанных точек при предварительной обработке изображения использовался оператор Дериша, однако в некоторых случаях (особенно при поиске уголков рта) приходилось применять подход “High Boosting”. Такой вариант предобработки фотопортретов позволял находить точки рта с большей точностью, чем при использовании оператора Дериша.

В **третьей главе** рассматриваются алгоритмы решения задач поиска портрета в базе данных и паспортного контроля, разработанные на основе проведённых автором исследований.

В разделе 3.1 описана двухуровневая технология извлечения из больших баз данных портретов людей, похожих на заданного человека. Её суть заключается в постепенном сужении области поиска: на первом этапе отбираются портреты, в количестве $K_1 = (\ln N)^2$, наиболее близкие к искомому в признаковом пространстве. Использование признаков, описывающих и хранящихся вместе с изображениями, предполагает большую скорость отбора близких портретов. На втором этапе производится детальное сравнения K_1 отобранных нормализованных фотопортретов с изображением искомого человека с помощью меры D , предложенной В.В. Старовойтовым

$$D(A, B) = \frac{1}{2G} \left\{ \left(\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N (f_2(a_{i,j}, B) + f_2(b_{i,j}, A))^E \right)^{1/E} \right\}, \quad (11)$$

где G – наибольшее значение яркости, f_2 – либо метрика d_{chess} , либо d_{city} между пикселями двух изображений, E может быть произвольным числом (наиболее универсальным является $E = 2$). Для упрощенных, более быстрых оценок можно использовать $E = 1$.

Раздел 3.2 посвящён формированию множества признаков, описывающих фотопортреты. На базе 33 отобранных антропометрических точек были определены 30 комбинаций расстояний между ними. Были использованы два способа оценки исходного набора признаков. Первый, основанный на статистических данных, заключался в анализе отношения $F_l = D_{ld}/D_{lm}$. Величины D_{ld} и D_{lm} определялись следующим образом. Для элементов каждого i -го кластера вычислялись среднее арифметическое M_{li} признака Pr_l и его дисперсия D_{li} :

$$M_{li} = \frac{\sum_{j=1}^{g_i} Pr_{lji}}{g_i}, \quad D_{li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{g_i} (M_{li} - Pr_{lji})^2}{g_i - 1}}, \quad (12)$$

где i – номер кластера; g_i – количество элементов i -го кластера, т. е. количество портретов i -го человека; l – номер признака. Затем определялись среднее M_{lm} и дисперсия D_{lm} от величин M_{li} :

$$M_{lm} = \frac{\sum_{i=1}^k M_{li}}{k}, \quad D_{lm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (M_{lm} - M_{li})^2}{k - 1}}. \quad (13)$$

Здесь k – количество кластеров, т.е. человек, а также среднее M_{ld} и дисперсия D_{ld} величин D_{li} :

$$M_{ld} = \frac{\sum_{i=1}^k D_{li}}{k}, \quad D_{ld} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (M_{ld} - D_{li})^2}{k - 1}}. \quad (14)$$

Геометрический смысл отношения $F_l = D_{ld}/D_{lm}$ следующий: чем больше для данного Pr_l дисперсия величин M_{li} , тем шире диапазон колебания признака при описании различных людей, тем, следовательно, выше ценность данного признака для их различия. Чем меньше дисперсия величин D_{li} , тем меньше колебание признака Pr_l для портретов одного и того же человека, т.е. тем кучнее будут располагаться в признаковом пространстве элементы одного кластера. Следовательно, чем больше D_{lm} и одновременно чем меньше D_{ld} , тем лучше признак выделяет образы одного кластера, а величина $F_l = D_{ld}/D_{lm}$ для такого признака будет стремиться к 0. Такая оценка признака Pr_l не зависит от значений других признаков и от изменения размерности признакового пространства, т.е. любой признак, претендующий на включение в итоговый набор, может быть оценен один раз и сравнен с остальными признаками без пересчёта их оценок. Второй способ был основан на оценке изменений, происходящих во взаимном расположении образов в признаковом про-

странстве при удалении из набора того либо иного признака. Для этого, определив средние значения признаков для образов каждого кластера и приняв их за координаты центра кластера A_i , вычислялись средние арифметические расстояний между центром A_i и образом S_{i_j} . Иными словами, определялся средний радиус MV_i n -мерной сферы в признаковом пространстве, в среднем описывающей данный кластер.

Эксперимент состоял из пяти опытов. В первом опыте была вычислена величина F для каждого из признаков. Затем проводилось распознавание с уменьшенным набором признаков. Поочерёдно исключался каждый признак. Кроме коэффициента распознавания каждый раз вычислялось среднее арифметическое радиусов кластеров T . Эксперименты производились на базе данных, состоящей из 70 портретов 12 людей: поочерёдно каждый из 70 портретов становился тестируемым, а оставшиеся 69 - базой данных, на которой проводился поиск, т.е. фактически в каждом случае распознавание выполнялось 70 раз.

В результате эксперимента при удалении из признакового набора двух из тридцати признаков (с наименьшими значениями F) коэффициент распознавания увеличился с 90 до 98,5 %.

Раздел 3.3 посвящён сравнению фотопортретов методом эластичных экспоненциальных деформаций. Решение задачи верификации личности по документам (например, по паспорту) требует использования методов распознавания, которые базируются на сравнении лишь двух изображений А и В. Основная сложность её решения заключается в нахождении достаточного количества общих или различающих признаков на сравниваемых изображениях для уверенного ответа на вопрос об идентичности объектов. Определить необходимый минимум таких признаков, основываясь лишь на паре фотографий и часто не имея возможности использовать какую-либо априорную информацию об изображённых на них объектах, представляется сильно затруднительным. Поэтому, исследователи, работающие в данном направлении, предложили методы, базирующиеся на деформации одного изображения с целью превращения его в другое и оценке “усилий”, необходимых для её выполнения.

Суть алгоритма, разработанного на основе метода эластичных деформаций, заключалась в следующем. Деформируемое изображение, дискретная решётка которого представляется в виде модели эластичной мембраны, должно быть совмещено с эталоном. В соответствии с этой моделью любой элемент решётки i может быть перемещён на позицию элемента j , однако при этом изменяются и координаты соседних элементов. Характер перемещения, а также определение того, какие именно из соседей должны переместиться, определяются параметром "пластичности" среды s в соответствии с выражением

$$d_k = d_{ij} e^{-sd_{ik}}, \quad (15)$$

где d_{ij} – расстояние между пикселями i и j , k – пиксель, лежащий на расстоянии d_{ik} от пикселя i , d_k – величина сдвига элемента решётки k в направлении, задаваемом вектором \vec{ij} . Совмещение производится путём многократного изменения дискретной решётки изображения, "подгоняемого" к эталону. На каждой итерации, случайным образом выбирается элемент решётки i и вектор его перемещения, вычисляется характер изменения позиций других элементов решётки. Чем "жестче" мембрана, тем большее количество элементов решётки меняют свои координаты при каждой деформации, и наоборот, чем "мягче" – тем меньшее количество соседей затрагивает перемещение одного выбранного элемента.

Деформация оценивается с точки зрения минимизации затраченной энергии и улучшения функции близости сравниваемых изображений. Функция близости может быть выбрана исходя из специфики задачи. Если в результате произошедших изменений общая оценка близости изображений улучшается, то в следующей итерации участвует полученное изображение. В противном случае оно отбрасывается и используется предыдущая деформация. Процесс останавливается, если заданное количество деформаций не улучшает итоговую оценку либо было выполнено максимально разрешённое количество деформаций.

В отличие от других приложений, использующих подобные деформации, в данном случае на сравниваемых изображениях имеется по паре точек (центры зрачков), которые при любых деформациях не должны изменять своего положения. Кроме того, находящиеся в непосредственной близости к названным точкам элементы решётки не должны сильно деформироваться, а форма зрачков должна сохраняться:

$$d_k = d_{ij} e^{-sd_{ik} f(l)_k f(r)_k}, \quad (16)$$

$$f(l)_k = e^{-sq(d_{lk}, R)}, \quad (17)$$

$$q(d_{lk}, R) = \begin{cases} 1, & d_{lk} \geq R; \\ R - d_{lk}, & d_{lk} < R. \end{cases} \quad (18)$$

Здесь R – радиус зрачка на изображении; l, r – центры левого и правого зрачков; d_{lk} – расстояние от пикселя k до центра зрачка l .

С помощью этих ограничений удалось исключить случаи недопустимых искажений лица типа «превращение глаза в бровь».

Для уменьшения зависимости результата сравнения изображений от условий освещённости человека в момент съёмки и контрастности снимков при

оценке каждой деформации в проведённых экспериментах использовался модифицированный коэффициент ранговой корреляции в следующем виде:

$$v_r = \frac{1}{nm} \sum_i^n \sum_j^m (K_A(a_{ij}) - K_B(b_{ij}))^2, \quad (19)$$

где

$$K_A(a_{ij}) = \sum_{l=1}^{a_{ij}-1} H_A(l) + \frac{1}{2}(H_A(a_{ij}) + 1), \quad (20)$$

H_A – гистограмма изображения А. $K_B(i)$ вычислялся для изображения В аналогично $K_A(i)$.

В ходе экспериментальной проверки были исследованы 70 вариантов нормализации исходных данных алгоритма, коэффициент распознавания составил 92,5% при сравнении 289 пар изображений реальных людей. При этом разница во времени получения изображений, относящихся к одному классу, составляла более полутора лет. Однако экспериментальные исследования продемонстрировали также зависимость результата работы алгоритма от разницы яркостных характеристик сравниваемых изображений, т.е. качества предварительной обработки входных изображений. Несмотря на применение ранговой корреляции в качестве функции близости изображений, указанная зависимость вносила существенные коррективы в результат сравнения. К недостаткам алгоритма также можно отнести время его работы - около 10 с на сравнение одной пары изображений размером 100×100 пикселей, на РС Pentium II – 600.

Четвертая глава посвящена вопросам программной реализации и экспериментальной проверке комплекса разработанных алгоритмов на реальных данных. В ней описываются набор экспериментальных программ и итоговая реализация комплекса разработанных алгоритмов в виде стандартного для ОС Microsoft Windows™ модуля динамически подключаемой библиотеки (Dynamic Link Library - DLL) – “IECFace22D.dll”. Приведено описание его структурной схемы и функций интерфейса.

Раздел 4.3 посвящён экспериментальной проверке разработанных алгоритмов (см. рис.) на собственной базе данных (376 портретов 50 человек), базе данных ORL (400 портретов 40 людей) и сравнению его с аналогами. Показано, что алгоритмы определения координат области лица на фотопортрете и нахождения центров зрачков устойчиво работают на слабоконтрастных изображениях в режиме реального времени (общее время предобработки – от 0,5с), что сравнимо с известными системами. Алгоритм распознавания людей на основе эластичных экспоненциальных деформаций может использоваться в режиме реального времени в задачах паспортного контроля. Основным его недостатком является принципиальная невозможность формирования вектора признаков портрета (т.е. повторного использования результатов работы



алгоритма) и существенного снижения вычислительной стоимости из-за итерационной природы алгоритма. Однако в отличие от известных аналогов, алгоритм показал хорошие результаты при сравнении портретов, сделанных с разницей во времени от года до 30 лет – коэффициент распознавания составил 92,5%.

В **приложении 1** представлены экспериментальные данные и дополнительные иллюстрации к главам 2, 3. **Приложение 2** содержит акты внедрения результатов диссертационной работы.

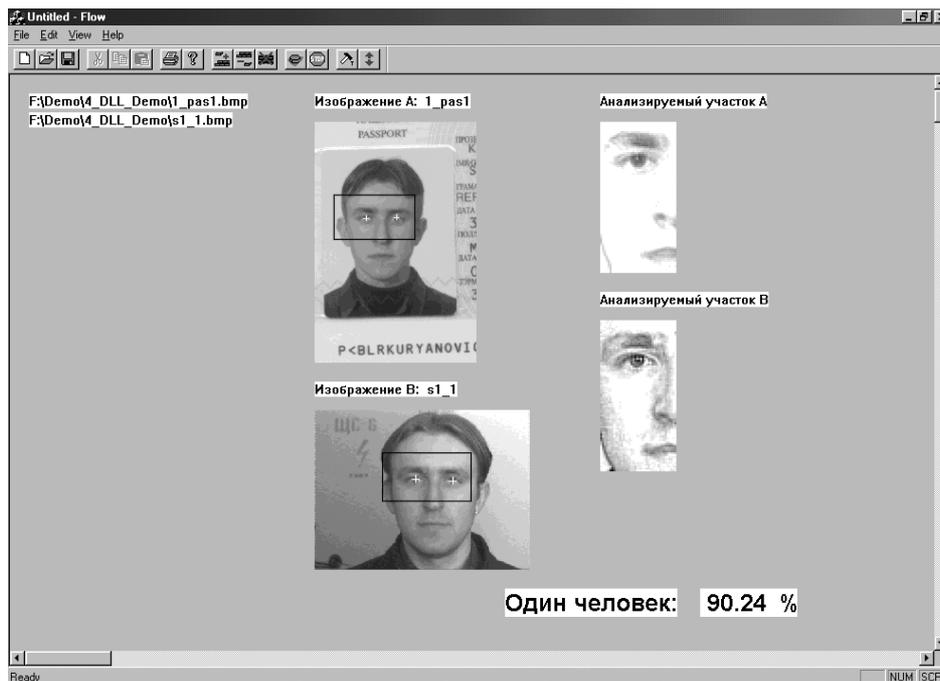


Рис. Пример результата работы комплекса алгоритмов для сравнения фотопортретов. Слева – исходные изображения с найденными центрами зрачков. Справа – части нормализованных портретов, на основании сравнения которых было сделано заключение, что с вероятностью 90,24% на обоих портретах изображён один человек

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны алгоритмы поиска области лица на фотопортретах и локализации центров зрачков глаз на найденной области лица. Эти алгоритмы, в отличие от ранее опубликованных в литературе, позволяют находить центры зрачков как на контрастных, так и на слабоконтрастных изображениях в режиме реального времени и не требуют предварительного обучения и настройки [13 – 11].



2. Исследованы различные алгоритмы предварительной обработки цифровых фотопортретов. Показано, какие алгоритмы поворота цифровых изображений лучше использовать в системах распознавания (для минимизации искажений исходной информации), а какие – для лучшего визуального восприятия человеком. Разработан алгоритм повышения контраста цифровых фотопортретов и их нормализации. Он отличается возможностью выравнивания яркостных характеристик как слабоконтрастных (полученных сканированием документа) фотопортретов, так и изображений человека, поступающих с видеокамеры [13, 10].

3. Исследована задача автоматического поиска основных антропометрических точек лица с помощью фильтра Габора. Проанализировано 5040 комбинаций параметров фильтра Габора для её решения. Впервые экспериментально определены параметры фильтра Габора и нормализации фотопортретов, позволяющие находить восемь основных антропометрических точек лица с точностью до 2 пикселей [3, 5, 11].

4. Предложены и экспериментально исследованы информативные признаки лица на основе комбинаций расстояний между определёнными антропометрическими точками лица. Их особенностями является робастность к возрастным изменениям внешности человека, освещённости, макияжу и незначительным вариациям ракурса съёмки, инвариантность к масштабу, яркости и контрасту. Использование этих признаков позволило получить точность распознавания 98,5% на экспериментальной базе данных из 70 фотопортретов, сделанных с разницей во времени в несколько лет при разных ракурсах съёмки и условиях освещённости. Предложена и исследована двухуровневая технология поиска фотопортретов людей, похожих на заданного человека, в базах данных, основанная на использовании геометрических признаков лица человека [1, 2, 4, 6, 7, 9, 8].

5. Разработан итерационный алгоритм идентификации человека по цифровым фотопортретам, основанный на методе эластичных деформаций изображения. Этот алгоритм, использующий не более тысячи итераций, позволил обеспечить коэффициент распознавания 92,5% на изображениях, полученных сканированием паспортов и других удостоверений личности, изготовленных в разные годы [13, 12].

Использование совокупности новых результатов, полученных в рамках проведённых исследований, обеспечивает решение важной прикладной задачи идентификации человека по цифровым фотопортретам в режиме реального времени. Разработанные алгоритмы, реализованные в виде динамически подключаемой библиотеки программ, были внедрены в специализированную систему пограничного контроля АРМП «Контролер» (НПП «Регула», г. Минск), разработанную по заказу Государственного комитета пограничных войск Республики Беларусь.



СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и сборниках

1. Starovoitov V. and Samal D. Experimental study of color image similarity// *Machine Graphics & Vision*, – 1998. – Vol. 7. – No. ½. – P. 445-462.
2. Самаль Д.И. Построение систем идентификации личности на основе антропометрических точек лица// *Цифровая обработка изображений*. – Минск. – Ин-т техн. киберн. НАН Беларуси.– 1998.- С.72-78.
3. Самаль Д.И., Старовойтов В.В. Выбор признаков для распознавания на основе статистических данных// *Цифровая обработка изображений*. – Минск. – Ин-т техн. киберн. НАН Беларуси. – 1999. – С.105-114.
4. Самаль Д.И., Старовойтов В.В. Методика автоматизированного распознавания людей по фотопортретам// *Цифровая обработка изображений*. – Минск. – Ин-т техн. киберн. НАН Беларуси. – 1999. – С.81-85.
5. Самаль Д.И., Старовойтов В.В. Обнаружение антропометрических точек лица с помощью фильтров Габора// *Цифровая обработка изображений*. – Минск. – Ин-т техн. киберн. НАН Беларуси. – 2001. – С.141-150.

Препринт

6. Самаль Д.И., Старовойтов В.В. Подходы и методы распознавания людей по фотопортретам. – Минск, 1998. – 54с. – (Препринт/ НАН Беларуси Ин-т техн. киберн.; № 8).

Статьи в сборниках трудов международных конференций

7. Starovoitov V. and Samal D. A distance based dissimilarity measure for color images// *Proceedings of Int. Conf. on Signal and Systems in Intelligent Technologies*. – Minsk. – 1998. – P. 298-306.
8. Starovoitov V. and Samal D. Geometric features for face recognition// *Proceedings of Int. Conf. UkrOBRAZ'98.- Kyjiv.- Ukraine*. – 1998. – P. 109-110.
9. Starovoitov V. and Samal D. A geometric approach to face recognition// *Proceedings of Workshop on Nonlinear Signal Image Processing*. – Antalia, Turkey. – 1999. – P. 210-213.
10. Starovoitov V. and Samal D. Comparison of rotation algorithms for digital images// *Proceedings of Int. Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, Vision Geometry VIII*. –1999. – SPIE Vol. 3811. – Denver, USA. – P. 346-356.
11. Starovoitov V., Samal D., Votsis G. and Kollias S. Face recognition by geometric features// *Proceedings of Int. Conf. on Pattern Recognition and Image Processing*. – Minsk. – 1999. – P. 39-43.

12. Starovoitov V., Samal D. and Sankur B. Matching of faces in camera images and document photographs// Proceedings of Int. Conf. on Acoustic, Speech, and Signal Processing. – 2000. – vol. IV. – Istambul., P.2349-2352.

13. Samal D.I., Taleb M.A. and Starovoitov V.V. Experiments with preprocessing of human portraits// Proceedings of Int. Conf. on Pattern Recognition and Image Processing. – 2001. – Minsk. – P. 15-20.

14. Starovoitov V.V. and Samal D.I. Human identification for document control// Proceedings of Int. Conf. on Pattern Recognition and Image Processing. – Minsk. – 2001. – P. 192-196.

РЕЗЮМЕ

диссертационной работы Самалья Дмитрия Ивановича

"Алгоритмы идентификации человека по фотопортрету на основе геометрических преобразований"

Ключевые слова: обработка изображений, идентификация человека по фотопортрету, геометрические признаки лица, верификация личности по документам, поиск в базе данных портретов людей, похожих на заданного человека, эластичные деформации.

Диссертационная работа посвящена проблеме распознавания людей по фотопортретам. Ее целью является разработка комплекса алгоритмов автоматической идентификации человека по фотопортрету.

Разработаны алгоритмы поиска области лица, локализации центров зрачков и повышения контраста цифровых фотопортретов, работающие как с контрастными, так и слабоконтрастными изображениями в режиме реального времени и не требующие предварительного обучения и настройки.

Впервые экспериментально определены параметры фильтра Габора и нормализации фотопортретов, позволяющие находить восемь основных антропометрических точек лица с точностью до 2 пикселей.

Предложены и экспериментально исследованы информативные признаки лица на основе комбинаций расстояний между антропометрическими точками лица. Их особенностями является робастность к изменениям внешности человека с возрастом, освещённости, макияжу и незначительным вариациям ракурса съёмки, инвариантность к масштабу, яркости и контрасту.

Разработан алгоритм идентификации человека по цифровым фотопортретам, основанный на методе эластичных деформаций. Он позволил обеспечить коэффициент распознавания 92,5% на изображениях, полученных с разницей во времени более одного года.

Представлено описание библиотеки программ, реализующих разработанный комплекс алгоритмов, приведены результаты экспериментальных исследований алгоритмов и их сравнения с аналогами.

Полученные в диссертационной работе результаты предназначены для применения в автоматических системах контроля удостоверений личности, поиска в базах данных фотопортретов людей похожих на заданного человека, контроля доступа к закрытым ресурсам.

РЭЗЮМЭ

дыссертацыйнай працы Самалы Дзмітрыя Іванавіча

"Алгарытмы ідэнтыфікацыі чалавека па фотапартрэту на аснове геаметрычных пераўтварэнняў"

Ключавыя словы: апрацоўка відарысаў, ідэнтыфікацыя чалавека па фотапартрэту, геаметрычныя прыкметы твару, верыфікацыя асобы па пасведчанні, пошук у базах звестак партрэтаў людзей падобных на патрэбнага чалавека, эластычныя дэфармацыі.

Дыссертацыйная праца прысвечана праблеме ідэнтыфікацыі чалавека па фотапартрэтах. Яе мэтай з'яўляецца распрацоўка комплексу адпаведных алгарытмаў, вырашаючых названую праблему.

У выніку даследвання распрацаваны алгарытмы пошуку вобласці твару, цэнтраў зрэнкаў, паляпшэння кантрасту лічбавых фотапартрэтаў, якія працуюць як з кантраснымі, так і слабакантраснымі відарысамі ў рэжыме рэальнага часу і якія не патрабуюць папярэдняга навучэння.

Упершыню эксперыментальна вызначаны параметры фільтра Габара і варыянты нармалізацыі фотапартрэтаў, якія дазваляюць знаходзіць восем асноўных антрапаметрычных кропак твару з дакладнасцю да 2 пікселяў.

Прапанаваны і эксперыментальна даследаваны інфарматыўныя прыкметы твару на аснове камбінацый адлегласці паміж вызначанымі антрапаметрычнымі кропкамі на твары. Іх уласцівасцямі з'яўляецца ўстойлівасць да змяненняў твару з узростам, ужывання макіяжу і нязначным варыяцыям ракурсу пры здыманні, інварыянтнасць да маштабу, яркасці і кантрасту.

Распрацаваны алгарытм ідэнтыфікацыі чалавека па лічбавым фотапартрэтах на аснове метада эластычных дэфармацый відарысаў. Ён дазволіў забяспечыць каэфіцыент распазнавання 92,5% на відарысах зробленых у розны час.

Створана бібліятэка праграм, якія рэалізуюць распрацаваны комплекс алгарытмаў, прыведзены вынікі эксперыментальных даследванняў алгарытмаў і іх параўнання з аналагамі.

Атрыманья ў дыссертацыйнай працы вынікі прызначаны дзеля ўжывання ў аўтаматычных сістэмах кантроля пасведчанняў, пошука ў базах звестак фотапартрэтаў людзей падобных на патрэбнага чалавека, абмежавання доступа да зачыненых рэсурсаў.

SUMMARY
of the Ph.D. thesis
"Algorithms of face recognition based on geometric transformations"
by Samal Dmitry Ivanovich 

Key words: image processing, face recognition, facial geometric features, document control, human identification, the similar facial images database retrieval, elastic deformations.

The thesis is devoted to face recognition problem. The aim of the research is development of a complex of algorithms for human being identification based on facial images (portraits). Two tasks of the problem – identification by similar portraits of the required person database retrieval and human being verification by comparison permit (passport) photo and bearer likeness are investigated.

New algorithms of face localization, iris centers detection and portrait contrast/brightness normalization are developed. They are differ from analogue by ability to process both the low contrast images obtained by passport (or other permits) scanning and the photos obtained from a camera.

The Gabor filter parameters and image preprocessing conditions are determined. They allow to detect 8 main anthropometric points of a face. The face feature set based on distances between some of the points is characterized by robustness to appearance changing by time, difference of lighting conditions, hairstyle, and pose. The set is independent to image scale, contrast level and deterioration due to scanning conversion.

A fully automatic system for matching face images in ID photographs to camera images is described. Its kernel is a new algorithm of face image comparison based on elastic deformations. The recognition rate equals to 92.5% on over 300 portraits prepared under different conditions and time.

All presented algorithms work in the real time mode without any preliminary teaching or tuning.

Подписан к печати 12.03.2002. Формат бумаги 60×84¹/₁₆.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Зак. № 7.

Отпечатано на ризографе Государственного научного учреждения
«Институт технической кибернетики Национальной академии наук Беларуси».
220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6. ЛП № 74 от 17.04.2001.