

A. I. Altuhov, S. A. Bagrecov, N. A. Karpenchuk, M. A. Cheburkov  
A. F. Mozhaisky Military Space Academy

## METHODOLOGY OF ASSESSMENT OF TIME SPENDING ON LEARNING A COURSE IN THE ACADEMIC DISCIPLINE WITH THE USE OF AUTOMATED TRAINING SYSTEMS

*The methodology of assessment of time spending on a course in an academic discipline with the use of automated training systems was treated. The results of approbation of methodology of assessment of time spending on the course were given. The results of the temporal characteristics of learning the course correlate with the results obtained by calculation based on expert data. The proposed methodology can be used for the purpose of planning and evaluation time resources on concrete topics of the discipline.*

**Automated training systems, the course in the academic discipline, probable transitions, the learning time, labour input**

УДК 004.932.2

Н. Л. Щеголева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Модели изображений лиц для решения задач криминалистики

*Предложены новые математические модели изображений лиц различных категорий, используемых в криминалистике. Использование моделей позволило решить ряд важных задач: поиск людей по фотороботам (скетчам); поиск людей по поврежденным фотографиям; защита лица участника судебного процесса от узнавания; распознавание лиц с проблемами освещения и новые решения для систем видеонаблюдения; реконструкция изображений «range image» и проблема восстановления 3D-форм лица по черепу; биологический штрих-код лица человека и индексация изображения лица при регистрации людей. Совокупность представленных идей позволяет более эффективно решать практические задачи криминалистики при создании соответствующих программных систем.*

**Модель изображения лица, скетчи, поиск изображений лиц, изображения лиц  
с проблемами освещения, range image, штрих-код лица, распознавание лиц**

Изображение лица (ИЛ) человека является наиболее доступной из биометрических характеристик, позволяющих выполнять идентификацию людей и наблюдение за ними на расстоянии, не требуя от них какого-либо сотрудничества. Обработка и анализ ИЛ всегда являлись одними из наиболее приоритетных задач для специалистов, работающих в области человеко-машинного взаимодействия. Современные темпы развития техники, позволяющие использовать все более мощные математические методы, повышение производительности систем, позволили приступить к решению задач криминалистики, формализация которых ранее была под вопросом. Актуальность данных исследований обусловлена тем,

что совершенствование перспективных специальных средств и техники для спецслужб и правоохранительных органов во многом определяет национальную безопасность и развитие государства.

В данной статье описаны решения задач криминалистики, связанных с исследованием ИЛ:

- Поиск людей по фотороботам (скетчам).
- Защита лица участника судебного процесса от узнавания.
- Поиск людей по поврежденным фотографиям.
- Распознавание лиц с проблемами освещения и новые решения для систем видеонаблюдения.

- Реконструкция изображений «range images» и проблема восстановления 3D-форм лица по черепу.

- Биологический штрих-код лица человека и индексация ИЛ при регистрации людей.

#### Поиск людей по фотороботам (скетчам).

Понятие «фоторобот» было введено в практическую криминалистику в 1952 г. французским полицейским П. Шабо как коллаж (или композиционный портрет), составленный из фрагментов фотографий, представляющих примитивы лица (лобная часть, глаза, нос, рот, ...). В настоящее время все субъективные портреты, независимо от техники их создания и формы представления, стали называть фотороботами. В качестве примера на рис. 1 показаны фото преступников из криминальной хроники и соответствующие им фотороботы, составленные по словесному портрету свидетелей.



Рис. 1

В современной англоязычной литературе по криминалистике наряду с термином «фоторобот» используется и другая терминология, основу которой составляет слово «скетч», что в переводе с английского означает «эскиз, или набросок». При этом используются следующие основные формы таких скетчей: рисованный или компьютерный рисунок (Viewed Sketch); компьютерный рисунок, доработанный художником (Artist Sketch); композиционный портрет, выполненный художником по словесному портрету со слов свидетеля с помощью библиотеки примитивов лица (Composite Sketch); композиционный портрет, составленный криминалистом по словесному портрету (Composite Forensic Sketch). Полное их сравнение и представление приведено в [1].

Найти соответствие между приведенными выше фотороботами и фотооригиналами не так просто, хотя человеку это сделать легче, чем компьютеру. В [2]–[4] вскрываются причины недостижимости устойчивого компьютерного поиска фотопортретов-оригиналов по фотороботам в реальных сценариях. Среди ряда важных причин отмечаются:

- низкое качество фотороботов, что обусловлено «технологией их коллажа» из библиотеки примитивов лица (не учитывающей, как правило, генотип лица) и субъективизмом исполнителей фоторобота – свидетеля (представившего словесный портрет) и оператора-криминалиста, создающего фоторобот;

- несовершенство методов взаимного распознавания пары *скетч–фотопортрет* ввиду неразвитости методологии (идей, методов, подходов и практических решений) сравнения фоторобота и фотопортрета;

- отсутствие необходимых для этих случаев баз фотопортретов и соответствующих им фотороботов.

Исходной предпосылкой задачи исследования скетчей явилось то, что заранее неизвестно, как выглядит оригинальное фото подозреваемого, а следовательно, неизвестны и параметры лица на фото, и в какой степени оно будет соответствовать имеющемуся словесному портрету (и сгенерированному по нему фотороботу/скетчу). В связи с этим модель ИЛ в форме скетча для обеспечения репрезентативности его представления должна учитывать возможные геометрические изменения области лица.

Пусть задана матрица  $S$  размерами  $M \times N$ , представляющая исходное изображение фоторобота/скетча в формате gray. При этом примем, что область лица на скетче занимает не менее 80 % всего исходного изображения. Общее решение строится на идеях повышения репрезентативности базы скетчей и заключается в том, что каждый исходный скетч должен быть  $K > 1$  раз модифицирован и представлен с новыми параметрами по геометрии областей лиц (размеру, симметрии, сдвигу) с целью создания «новой популяции» таких скетчей. Такая модификация образует популяцию скетчей первого типа ( $P1$ ). Далее реализуется процедура кумулятивного усреднения скетчей  $P1$ , а полученные при этом скетчи образуют популяцию второго типа ( $P2$ ). Обе стратегии можно применить также к фотопортретам, например полицейским фотоснимкам (mug-shot) и фотопортретам-оригиналам.

В общем виде модель ИЛ скетча популяции 2 можно записать следующим образом:

$$\left\{ S^{(k)}, p_1, p_2, p_3, R_n, R_u \right\} \rightarrow P1^{(k)} \rightarrow P2, k = 1, 2, \dots, K. \quad (1)$$

Выберем параметры  $p_1, p_2$  и  $p_3$  с использованием генератора случайных чисел и отмасштабируем их значения в диапазоне  $\pm d$  так, что

$$p_i = \text{sign}(R_n^{(i)}) \text{fix}(dR_u^{(i)}), \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где  $p_i$  – параметр;  $d$  – максимальное значение границ изменения параметров ( $d \geq 2$ );  $R_n^{(i)}$  и  $R_u^{(i)}$  – нормально (normally) и равномерно (uniformly) распределенные случайные числа;  $\text{sign}(R_n^{(i)})$  – знак числа.

При этом параметр  $p_1$  связан с изменением длины лица на исходном изображении и, соответственно, положения линии глаз;  $p_2$  – с изменением ширины лица;  $p_3$  – с изменением положения линии симметрии на области лица. Параметр  $d$  может быть связан, например, с числом пикселей, на которые изменяется (увеличивается или уменьшается) центральная область лица или положение линии глаз или оси симметрии лица. Далее алгоритм геометрических изменений области лица складывается из трех последовательных шагов, на каждом из которых выполняется одна операция изменения геометрии области лица с использованием  $p_i$ .

Представленные идеи позволяют создать новые базы скетчей. Для оценки подобия между скетчами и оригинальным фотопортретом в экспериментах использовался индекс SSIM, поскольку он дает сравнительную оценку по текстуре локальных областей между исходными данными. На рис. 2 приведены примеры модификации скетчей базы CUNK Face Sketch (а) и «Forensic Sketch» – один из скетчей рис. 1 – исходный, модифицированный и усредненный (б). Здесь же приведены значения индекса SSIM для скетчей популяции 1 (П1) и популяции 2 (П2) в сравнении с оригинальным фото. Видно, что ISSIM для скетчей П2 на 30 % выше, чем ISSIM для скетчей П1.

При этом значение ISSIM для скетчей популяции 2 настолько высоко, что позволяет искать по ним фотооригинал, а значения ISSIM для скетчей популяции 1 настолько низки, что по ним не очень просто найти соответствующий фотооригинал. Рассмотренные здесь идеи повышения репрезентативности скетчей и стратегии их реализации защищены патентом [5].

**Защита свидетелей правоохранительными органами.** В средствах массовой информации (пресса, телевидение, Интернет), содержащих криминальные новости, свидетель события или участник происшествия должен быть защищен от непосредственного его узнавания преступником с целью обеспечения его безопасности. Такая защита осуществляется различными способами, главная цель которых – изменить или скрыть лицо человека (или центральную область его лица) таким образом, чтобы исключить его распознавание другим человеком. На рис. 3 показаны варианты изменения изображений лиц (и их центральных областей), наиболее часто используемые для достижения этой главной цели. Здесь показаны возможные модификации изображений лиц: 1 – исходное изображение; 2 – результат сглаживания исходного изображения; 3 – эффект «размытого» (или смазанного) в заданном направлении исходного изображения; 4 – перемасштабирование с низким разрешением центральной области лица; 5 – скрытие черной полосой области глаз.

Учитывая важность задачи, которую правоохранительные органы пытаются решить с помощью подобных изменений лиц свидетелей, необходимо определить:

1. Возможно ли точное распознавание подобных лиц в автоматическом режиме?

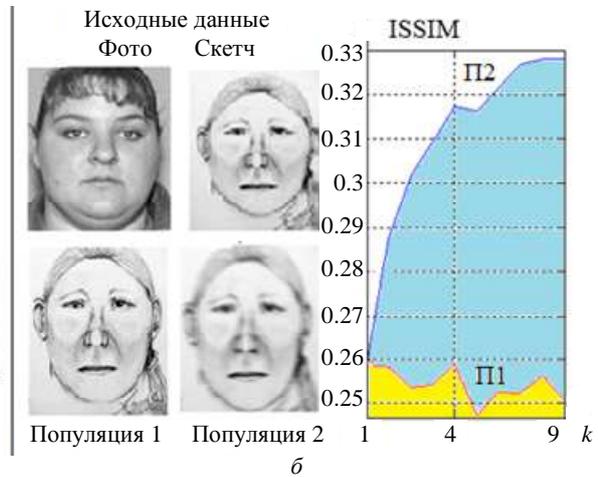


Рис. 2

2. Какие из методов экстракции признаков в системах поиска людей по ИЛ (FaRetSys – Face Retrieval System) могут обеспечить приемлемые и стабильные результаты распознавания при таких искажениях оригинала?

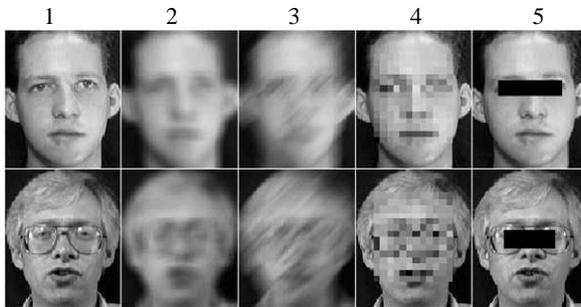


Рис. 3

Для ответа на эти вопросы был выполнен ряд компьютерных экспериментов для модификаций, показанных на рис. 3. В экспериментах используется база лиц ORL [6]. При  $M = 112$  и  $N = 92$  размер исходного изображения  $DIM = 10\ 304$ . В качестве эталонов использовано 2 изображения, 8 – тестовые. Для представления изображений лиц использованы следующие методы [7]:

1. Масштабирование исходного изображения (к размеру  $16 \times 14$ ).
2. Метод Random (с числом признаков 400).
3. Двумерное дискретное преобразование Фурье (левый верхний угол матрицы  $15 \times 15$ , записанный в форме вектора).
4. Двумерное дискретное косинус-преобразование (левый верхний угол матрицы  $15 \times 15$ , записанный в форме вектора).
5. Гистограмма яркости исходного изображения ( $BIN = 64$ ), составленная из гистограмм верхней и нижней половин исходного изображения, записанная в форме вектора.
6. Метод градиента в скользящем окне ( $w = 8$ ,  $step = 1$ ).

При распознавании правильным считалось эталонное изображение, для которого расстояние между векторами признаков, описывающими эталон и тестовое изображение, было минимальным. Правильность результата оценивалась по  $rank = 1$ .

Модели систем всех выполненных экспериментов в соответствии с нотацией, принятой в [7],

имеют вид

- 1)  $ORL(40/2/8 \rightarrow MOD_i)$  {Scale:  $112 \times 92 \rightarrow 16 \times 14$ } [KMP/L1/rank = 1];
- 2)  $ORL(40/2/8 \rightarrow MOD_i)$  {Random:  $112 \times 92 \rightarrow 400$ } [KMP/L1/rank = 1];
- 3)  $ORL(40/2/8 \rightarrow MOD_i)$  {2DDFT:  $112 \times 92 \rightarrow 15 \times 15/zigzag$ } [KMP/L1/rank = 1];
- 4)  $ORL(40/2/8 \rightarrow MOD_i)$  {2D DCT:  $112 \times 92 \rightarrow 8 \times 8/zigzag$ } [KMP/L1/rank = 1];
- 5)  $ORL(40/2/8 \rightarrow MOD_i)$  {Histogram:  $112 \times 92 \rightarrow 2 \times BIN = 64$ } [KMP/L1/rank = 1];
- 6)  $ORL(40/2/8 \rightarrow MOD_i)$  {Gr:  $w = 8$ ,  $step = 1$ } [KMP/L1/rank = 1],

где параметр  $MOD_i$  ( $i = 1-5$ ) означает модификацию тестовых изображений.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Независимо от метода искажения исходных ИЛ (оригинала) использование для представления 2D DCT обеспечивает наилучшую результативность FaRetSys в рамках реализованных моделей. На втором месте по результатам распознавания – метод масштабирования ИЛ, который только при наложении равномерного шума на область лица не дал хорошего результата. Заметим, что использование в данном случае параллельной системы позволит существенно повысить результат распознавания.

Перемасштабирование центральной области и представление ее с низким разрешением, а также скрытие области глаз черной полосой достаточно часто используются для скрытия информации о лице свидетеля. Однако, как показали эксперименты, данные ИЛ хорошо распознаются достаточно простыми методами, разработанными и исследованными примерно 8 лет (и более) назад. Полученные результаты показывают, что рассмотренные методы не могут обеспечить безопасность свидетелей преступлений.

**Поиск людей по поврежденным фотографиям.** Одной из часто решаемых криминалистами или в процессе архивного поиска фотодокументов задач является распознавание людей по смятым, разорванным либо сложенным из кусочков фотографиям, примеры которых представлены на

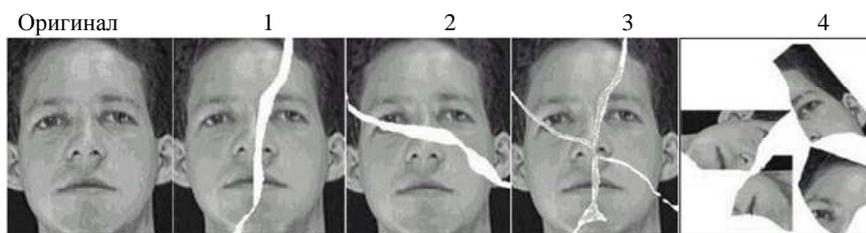


Рис. 4

рис. 4. Изображения 1, 2 и 3 представляют собой «старые фото» с изломами и потертостями их глянца, а изображение 4 составлено случайным образом из частей изображения 3.

*Задачи таких фотографий.* Используем специально подготовленную базу, содержащую исходные образы-эталонные из базы ORL и тестовые образы из этой же базы, но которые либо «помяты», либо «разорваны», либо замазаны черной краской. Модель системы имеет вид

$$\text{ORL}(40/7/3/\text{CRIM}) \{ \text{Method...} \} \\ [\text{KMP}/L1/\text{rank}=1],$$

где ORL(40/7/3/CRIM) – модификация исходных данных в способ, описанный ранее.

Результаты классификации 120 изображений лиц (составленных из шести различных частей) и варианта 7/3 разделения данных на базовые и тестовые (для всех 40 классов образов базы ORL) приведены в таблице.

DFT, %	Random, %	Scale, %	DCT, %	Histogram (BIN = 32), %
40	62	70	72	98

Видно, что только для FaRetSys, основанных на использовании гистограммных признаков, получен самый высокий результат классификации. Заметим, что распознавание лиц людей на цифровых изображениях с использованием гистограммных методов может быть адаптировано к фону, текстуре и к оттенкам старых фотографий. Очевидно, что применение подобных FaRetSys в криминалистике и в архивных поисках среди старых фотографий может привести к ожидаемому успеху.

**Распознавание лиц с проблемами освещения.** Одной из актуальных на сегодняшний день и не до конца решенных проблем остается нестабильность яркости ИЛ на входе системы – наличие бликов, теней и очень низкий уровень яркости (рис. 5). Следствием появления локальных теней являются изменение формы примитивов лица, искажение их пространственных соотношений и границы области лица. Глобальные тени существенно снижают различимость области лиц на общем фоне, что приводит к отсутствию части информации о лице. Отмеченные виды нестабильности яркости ИЛ приводят к ухудшению результативности работы FaRetSys, поэтому задача распознавания изображений лиц с проблемами освещения (ИЛПО) чрезвычайно актуальна и интерес к предлагаемым методам ее решения не ослабевает последние несколько лет.



Рис. 5

Для реализации предобработки использовался адаптивный подход, при котором в зависимости от средней яркости исходного ИЛПО использовалась гамма-коррекция (GC), логарифмирование (Log) значений яркости отдельных пикселей ИЛ или оба метода. Исследование было выполнено с помощью метода проекции в собственном базисе, основанном на 2DPCA/2DKLT. Это позволило определить структуру системы распознавания, уточнить форму модели ИЛПО и параметры модели, определяющие границы спектральных компонент, зависящих от мешающих факторов.

Анализ спектра, представляющего ИЛПО в собственном базисе, позволил выявить компоненты, связанные с локальными и глобальными тенями на ИЛПО. Оказалось, что ими являются первые 13 компонент левого верхнего угла спектральной матрицы, считываемых по методу «зигзаг». Следовательно, они должны быть исключены. Таким образом, модель ИЛПО имеет вид

$$F_1^{2DPCA} X^{(k)} F_2^{2DPCA} \rightarrow P \xrightarrow{f_n} \hat{P}, f_n \geq 14, (3)$$

где  $f_n$  – число исключаемых низкочастотных компонент. Результат распознавания составил около 93 %.

Дальнейшее решение было реализовано на принципах построения и использования модели ИЛ в универсальном базисе на основе параметров модели, полученных в собственном базисе. Исходя из того, что функции cos-преобразования достаточно точно аппроксимируют функции собственного базиса для обобщенного класса цифровых изображений, все практические решения далее были реализованы в базисе двумерного cos-преобразования. Кроме того, была сохранена точность представления ИЛ, что позволило также решать задачи распознавания ИЛПО с динамическими базами эталонов на протяжении всего жизненного цикла системы. В этом случае структура системы распознавания, модели ИЛ и их пара-

метры не изменяются. Если в базе эталонов происходят изменения, добавляются новые эталоны и/или исключаются «старые эталоны». Модель ИЛПО в универсальном базисе будет иметь вид

$$F_1^{2DDCT} X^{(k)} F_2^{2DDCT} \rightarrow C \xrightarrow{f_n} \hat{C}, f_n \geq 14. (4)$$

Моделирование выполнено в среде пакета MatLab. Тестирование проведено на базах «Yale B» и «Yale B+», специально предназначенных для тестирования задач распознавания ИЛПО. При этом база системы распознавания не содержит эталонов с бликами, глобальными и/или локальными тенями. Результат классификации тестовых изображений составил при этом 98.8 %.

**Реконструкция изображений «range image» и проблема восстановления 3D-форм лица по черепу.** Как показывает анализ современного состояния технологий лицевой биометрии, модели 3D лиц и их использование на практике стали реальностью. Если модель 3D строится по облаку измерений при сканировании лица человека, то исходными данными выступают координаты  $x_l, y_l$  на плоскости и высота  $z_l$  для  $l = 1, 2, \dots, L$ . Параметр  $L$  может варьироваться от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч. Сначала реализуется процедура триангуляции измеренных данных. Следующий этап – перенос этих координат на регулярную сетку и пересчет значений  $z_l$  для регулярной сетки. На этом этапе исходные измерения приобретают стандартную форму цифровых изображений и в данном случае называются «range image».

Однако если исходное облако  $\{x_l, y_l, z_l\}$  имеет значительные пропуски «измерений по глубине» от сканера до области лица, то и сетка треугольников будет иметь большие «полигоны пропусков». Это приведет к появлению на поверхности «range image» «дыр», соответствующих пропускам информации, которые в свою очередь не позволят получить точные 2D-формы

поверхности лица. Пример этих ошибок представлен на рис. 6, где изображения 2 и 3 взяты из [8].

В данном случае метод триангуляции не может быть эффективно использован. Решение проблемы восстановления поверхности в области «черных дыр» основано на методах сплайн-интерполяции, что требует знания границ этих дыр.

Метод восстановления 3D-поверхности в форме «range image» из облака измерений при неполном составе исходных данных основан на глобальной процедуре обратных расстояний (inverse distance) по набору точек, образующих узлы нерегулярной сетки, и в отличие от триангуляции позволяет варьировать значения  $M$  и  $N$ . Полное описание метода и примеры его использования приведены в [7], [9], [10].

Исходной информацией являются заданные значения  $\{x_l, y_l, z_l\}$ , записанные в соответствующие векторы  $X, Y, Z$  размера  $L \times 1$  каждый, где  $L$  – число точек, отвечающих условию «некратности измерений»:  $|k(n, m) - k_l| \neq 0, \forall l \neq n \text{ и } l \neq m$ .

Перенос исходных данных (облака) на заданную регулярную сетку размерами  $M \times N$ , в результате чего и будет получено «range image», реализуется следующим образом:

$$I(m, n) = \sum_{l=1}^L b_l |k(n, m) - k_l|, (5)$$

$$m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N,$$

где  $|k(n, m) - k_l|$  – модуль разницы между новыми и старыми координатами;  $k(n, m) = x_n + jy_m$ ;  $k_l = x_l + jy_l$  ( $n = 1, 2, \dots, N$  и  $m = 1, 2, \dots, M$ );

$$x_n = \min x + n(\max x - \min x)/(N - 1);$$

$$y_m = \min y + m(\max y - \min y)/(M - 1).$$

На рис. 7 приведен пример изображения («range image») [8] с «черными дырами» – показан в левом верхнем углу. «Дыры» на «range

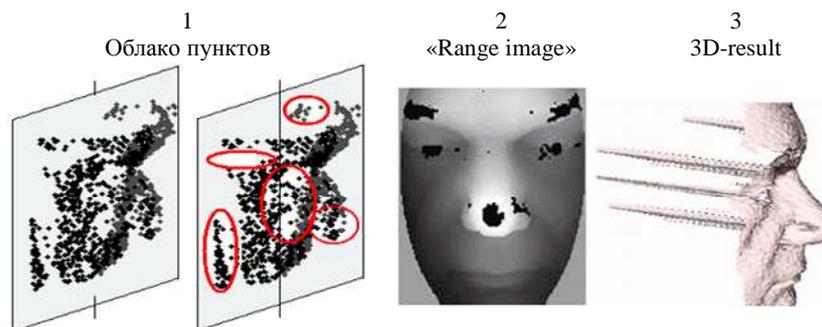


Рис. 6

image» выделены черными локальными областями: всего здесь имеется 6 крупных дыр (центр носа, две области глаз и две области над бровями) и 6 мелких дыр.

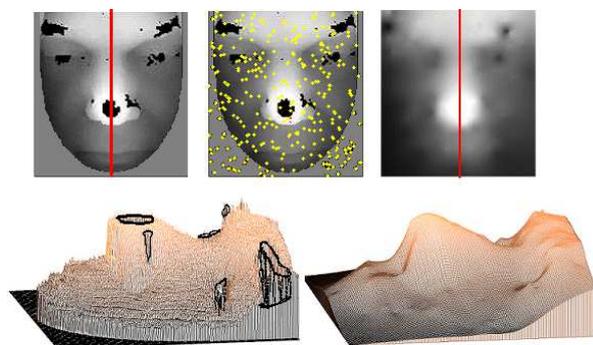


Рис. 7

На оригинальном изображении «range image» проведена вертикальная линия по оси симметрии области лица и по ней определен профиль. В верхней части рис. 7 показано размещение точек с координатами  $\{x_i, y_i\}$  на плоскости  $XU$ , полученных генератором случайных чисел. При этом можно заметить, что некоторое количество точек попало на области «черных дыр». В правой верхней части рисунка показан результат реконструкции «range image» по координатам  $\{x_i, y_i, z_i\}$ , для которых  $z_i \neq 0$  и которые удовлетворяют условию *некратности данных*. В данном эксперименте число таких координат было не более 300.

Нижняя часть рис. 7 представляет исходное изображение в форме 3D (слева), на котором выделены края видимых «черных дыр». С правой стороны показан результат 3D-реконструкции «range image», в котором уже отчетливо виден профиль человеческого лица (область носа и область над верхней губой, глазные ямы, лоб), чего совсем не видно на левом изображении.

*Реконструкция частей изображения «range image».* Наиболее информативной частью лица человека является средняя часть, охватывающая область глаз и бровей, а также нос. Эта часть лица наименее подвержена изменениям при разговоре человека, смене прически или при наклеенной бороде и усах. Именно эта особенность выделенной части лица широко используется при

решении задач распознавания людей по лицам и построении 3D-моделей лиц.

В рамках рассмотренного ранее метода также легко осуществить реконструкцию области носа в форме 3D (или «range image»). Покажем это на простом примере.

На рис. 8 представлены: 1 – исходное изображение («range image»); 2 – искусственно выполненная дыра на кончике носа; 3 – координаты  $\{x_i, y_i\}$ , по которым определялись значения  $z_i$ ; 4 – результат реконструкции области носа по 500 точкам.

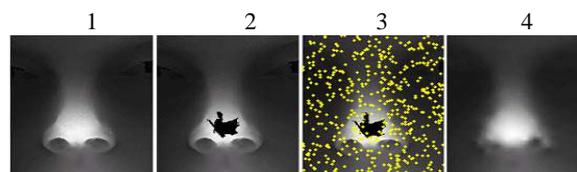


Рис. 8

Разработанный метод не требует знания границ «черных дыр» или областей отсутствующих данных, позволяет не только достаточно точно восстановить поверхность, но и улучшить результат реконструкции в случае пропусков или неточностей измерительных данных. На реконструированной поверхности отчетливо виден профиль лица, форма области лица по линии симметрии полностью восстановилась.

*Восстановление 3D-форм лица по черепу.* А теперь положим, что восстановлению 3D-формы подлежит не «range image», а череп, который может быть поврежден или представлен отдельными фрагментами. В криминалистике в данном случае применяется антропологическая (пластическая или скульптурная) реконструкция лица по черепу, разработанная М. М. Герасимовым. Она основана на краниометрических замерах и использовании корреляций между высотой расположения мягких тканей головы и индивидуальным рельефом черепа человека. Процесс восстановления состоит в добавлении искусственных пластиковых масс определенной толщины (установленных эмпирическим путем) в области проекции на черепе ключевых краниометрических точек (рис. 9).



Рис. 9

Исследователями предложено несколько методик построения лица. Российская школа реконструкции М. М. Герасимова традиционно базируется на топографоанатомической методике, в США, Канаде и Японии используется анатомическая методика ([http://www.serguei-a-gorbenko.net/ru/left\\_column/facial-reconstruction-from-skull.html](http://www.serguei-a-gorbenko.net/ru/left_column/facial-reconstruction-from-skull.html)). Кроме того, были разработаны компьютерные программы для реконструкции лица по черепу, например [http://www.victorialywood.com/Home\\_Page.html](http://www.victorialywood.com/Home_Page.html). Однако, по мнению специалистов, пока нет программы, способной учесть все индивидуальные характеристики каждого черепа.

Предложенный ранее метод восстановления дает специалистам еще одну возможность решить данную проблему, поскольку имея модель изменения толщин мягких тканей (МИТМТ) на области лица, полученную в рамках реконструкции, можно к полученным по (5) 3D-формам черепа прибавить матрицу МИТМТ и на основании этого получить восстановленную по черепу 3D-форму лица, т. е. восстановить индивидуальный облик лица человека.

**Биологический штрих-код лица человека и индексация ИЛ.** В 1999 г. впервые было показано первое применение штрихового кода для идентификации людей в момент реализации ими электронных платежей (Патент US 5878155). Через 10 лет после опубликования этого патента С. Дакин и Р. Уотт высказали мнение, что вся информация о человеческом лице содержится в горизонтальных линиях, таких, как линия бровей, линия глаз, линия границ носа и линия губ. Эту информацию можно представить в виде набора черных и белых линий, т. е. в виде некоторого бинарного кода, который авторы назвали «биологическим штрих-кодом». Идеи С. Дакина представлены на рис. 10, *а–в*.

Однако широкое применение таких кодов остается под вопросом. Этот вывод основывается на том, что представление изображений лиц в

форме бинарных биологических кодов может быть полезным только в случае задачи классификации обобщенного класса «изображения лиц людей» среди других классов изображений, не включающих лица. Данное обстоятельство связано с морфологией лица человека – границы волос/лоб, границы линий и особенностей бровей, границы линий глаз и границы линии носа и губ трудно определить, а еще труднее описать их последовательностью полос. Здесь необходима более гибкая и множественная структура линий.

На пути преобразования ИЛ в штрих-коды лежат проблемы получения стабильных признаков, не зависящих от динамики параметров ИЛ – их яркости, глобальных и локальных теней на ИЛ, изменения ракурса и наклона области лиц в поле исходных изображений, а также мимики лиц. Именно это могло повлиять на отсутствие каких-либо конкретных решений по штрих-кодам для ИЛ до работ [11]–[13].

Представление ИЛ в форме штрих-кода стандартного типа рассмотрим на примере систем Access Control (АС). В системах АС человек, стоящий перед камерой, старается выполнить условия, обеспечивающие стабильность съемки – захват портрета анфас при нейтральном выражении лица. Эти условия являются необходимыми для формирования стабильного штрих-кода. Однако в реальных сценариях достаточно сложно выдержать эти условия, поэтому необходимо допустить некоторые изменения ИЛ, поступающих на вход системы АС. Примеры допустимых изменений лиц показаны на рис. 11: изменения размеров области лиц, мимики (например, при произношении им некоторого контрольного слова, заданной фразы в бимодальных системах или в процессе разговора) и наклона лица, яркости некоторых областей лица (от влияния локальных теней или очков).

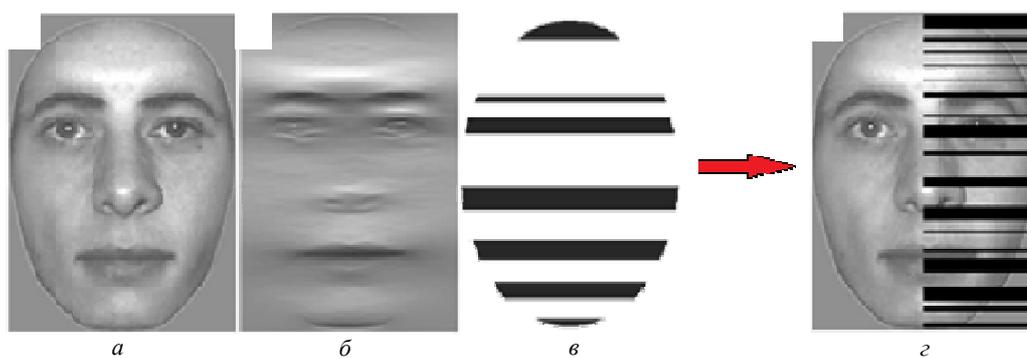


Рис. 10



Рис. 11

Признаки экстрагируются только из верхних  $\frac{3}{4}$  ИЛ, т. е. область ниже середины промежутка нос/рот исключается из рассмотрения. Выбранная часть лица не связана с мимикой, обусловленной произношением, что позволяет обеспечить стабильность представляющих ее признаков.

Предложено 2, возможно наиболее простых, подхода для представления лица человека в форме стандартных линейных штрих-кодов EAN-8, EAN-13 и UPS [11], [12]. *Первый* подход основан на гистограммах яркости, представляющих ИЛ в форме исходных признаков, *второй* – на разностных градиентах яркости, используемых как исходные признаки ИЛ. Далее, в каждом подходе, эти признаки усредняются на ограниченном числе интервалов, квантуются в диапазоне десятичных цифр от 0 до 9 и преобразуются в стандартный штрих-код.

Тестирование выполнено на базах «Face94», «Face Sketch FERET Database» и на базе композитных лиц различных возрастов. На этих базах и в рамках двух подходов выполнено по 4 эксперимента по проверке стабильности формирования штрих-кодов в условиях: 1) заметной динамики характеристик ИЛ – эксперименты выполнены на базе фотопортретов «Faces94» и на базе композитных лиц, представляющих изменения возраста человека с 22 до 64 лет; 2) изменения яркости контрольных изображений в пределах  $\pm 40\%$  относительно исходной их яркости; 3) при зеркальном повороте тестового изображения и дополнительной динамике изменений параметров изображений – шумов при съемке, локальных размеров лиц, поворота лица в плоскости XY, поворота по ракурсу, а также при изменениях мимики лица; 4) при «старении» лица. Примеры полученных штрих-кодов показаны на рис. 12.

Таким образом, экспериментально показано, что в реальных условиях динамики лиц их стабильное представление в признаковом пространстве достижимо только для верхней части лица,



а



Young – 24 years      61 years old

б

Рис. 12

поэтому штрих-коды, сформированные по ИЛ, не изменяются при изменении локальных размеров лиц, наклона в плоскости XY, изменении ракурса и зеркальном повороте вокруг вертикальной оси, а также при изменениях речевой мимики лиц и возрастных изменениях лиц. При этом оба подхода не требуют больших вычислительных затрат, а также использования специализированных пакетов программ по обработке изображений, что создает условия для формирования линейных штрих-кодов в рамках систем реального времени. Предложенный способ формирования стандартного штрих-кода строится непосредственно по исходному изображению лица и, таким образом, содержит субъективную информацию о конкретном лице человека, не зависящую от динамики параметров исходных изображений. Полученные таким образом штрих-коды можно использовать для индексации людей (по лицам) на основе линейной шкалы. Решение, основанное на использовании градиентов яркости ИЛ для формирования стандартного штрих-кода, защищено патентом [14], а программная реализация – свидетельством [15].

Предложенные новые математические модели для ИЛ различных категорий, используемых в практике биометрии и криминалистики, позволили решить ряд важных задач криминалистики:

1. На основе двух разработанных методов автоматической генерации «популяции скетчей» повысить репрезентативность исходных данных – решить проблему моделирования скетчей от группы свидетелей и проблему «малой выборки» (типичную для задач лицевой биометрии).

2. Показано, что для поиска людей по поврежденным или намеренно искаженным фотографиям можно использовать простые методы. На основании полученных выводов даны рекомендации по защите лиц участников судебного процесса от узнавания.

3. Разработан метод распознавания ИЛПО, позволяющий работать с динамическими базами эталонов на протяжении всего жизненного цикла системы, т. е. не менять структуру системы, модель ИЛ и ее параметры. Если в базе эталонов происходят изменения, добавляются новые и/или исключаются старые эталоны.

4. Метод восстановления поверхности лица в форме «range image» из облака измерений при неполном составе исходных данных позволяет улучшить 3D-форму, реконструировать поверхность при наличии «черных дыр». В отличие от

известных подходов предложенный метод не требует знания границ «черных дыр» или областей отсутствующих данных.

5. Экспериментально показано, что в реальных условиях динамики лиц их стабильное представление в признаковом пространстве достижимо только для верхней части лица. На основе этого предложен оригинальный метод представления ИЛ в форме линейного штрих-кода стандартного типа. Метод характеризуется стабильностью штрих-кода при небольших изменениях лиц.

Совокупность представленных идей позволяет более эффективно решать практические задачи криминалистики, что свидетельствует о перспективности их использования в практике решения задач обработки ИЛ и при создании соответствующих программных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеголева Н. Л., Туяка А. К вопросу совершенствования современных габитоскопических регистрационно-поисковых систем // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та МВД России. 2013. № 3 (59). С. 223–231.

2. Кухарев Г. А., Буда К., Щеголева Н. Л. Методы сравнения фотопортрета-оригинала и скетча // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 6. С. 64–78.

3. Кухарев Г. А., Матвеев Ю. Н., Щеголева Н. Л. Поиск людей по фотороботам: состояние проблемы и технологии // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 123–136.

4. Kukharev G. A., Buda K., Shchegoleva N. L. Methods of Face Photo-Sketch Comparison // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2014. Vol. 24. P. 102–113.

5. Пат. РФ № 2 541132 С1. Способ автоматической генерации скетчей и система для его осуществления / Н. Л. Щеголева, Г. А. Кухарев. Оpubл. 10.02.2015. Бюл. № 4.

6. The ORL Database. URL: [www.uk.research.att.com/pub/data/att\\_faces.zip](http://www.uk.research.att.com/pub/data/att_faces.zip).

7. Методы обработки и распознавания изображений лиц в задачах биометрии / под ред. М. В. Хитрова. СПб.: Политехника, 2013. 388 с.

8. Kevin W. Bowyer, Kyong Chang, Patrick Flynn. A survey of approaches and challenges in 3D- and multi-modal 3D + 2D face recognition // Computer Vision and Image Understanding. 2006. Vol. 101/1. P. 1–15.

9. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа для восстановления 3D-поверхности лица / Г. А. Кухарев, Ю. Н. Матвеев, Н. Л. Щеголева. № 2014614282 от 08.05.2014.

10. Кухарев Г. А., Матвеев Ю. Н., Щеголева Н. Л. Экспресс-метод формирования штрих-кода по изображениям лиц // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 99–106.

11. Кухарев Г. А., Матвеев Ю. Н., Щеголева Н. Л. Формирование штрих-кода по изображениям лиц на основе градиентов яркости // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 88–95.

12. Matveev Y., Kukharev G., Shchegoleva N. A simple method for generating facial barcodes // 22<sup>nd</sup> Intern. Conf. in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2014 in co-operation with EUROGRAPHICS Association, Plzen, Czech Republic, 2–5 June 2014.

13. Пат. РФ № 2 541136 С1. Способ формирования штрих-кода по изображениям лиц и устройство для его осуществления / Г. А. Кухарев, Н. Л. Щеголева. Оpubл. 10.02.2015. Бюл. № 4.

14. Программа для формирования линейного штрих-кода для изображения лица. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ / Г. А. Кухарев, Ю. Н. Матвеев, Н. Л. Щеголева. № 2014616517 от 08.05.2014.

15. Collection of Facial Images (faces94, faces95, faces96, grimace). URL: <http://cswww.essex.ac.uk/mv/allfaces/index.html>.

N. L. Shchegoleva

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## FACE IMAGE MODELS FOR CRIMINALISTICS

*Proposed new mathematical model of face images used in criminology. This models helps to solve important tasks: retrieval people by sketches; people retrieval on damaged photos; face protection member of the trial of the recognition; recognition of face images with illumination problems; «range image» reconstruction and the problem of restoration of 3D face shapes of the skull; biological barcode human person and people indexing. The totality of the ideas presented allows to solve practical problems of criminology more efficient at the establishment of appropriate software systems.*

**Face image model, sketches, face retrieval, face image under difficult lighting conditions, range image, face barcode, face recognition**

---