

С.Г. НЕБАБА, А.А. ЗАХАРОВА

**АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ 3D
МОДЕЛЕЙ ЛИЦА И ОБОСНОВАНИЕ ЕГО ПРИМЕНИМОСТИ
В СИСТЕМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЧНОСТИ**

Небаба С.Г., Захарова А.А. Алгоритм построения деформируемых 3D моделей лица и обоснование его применимости в системах распознавания личности.

Аннотация. Описан алгоритм автоматического построения деформируемых 3D моделей лица, основанного на использовании метода Active Shape Models, метода восстановления ландшафтных поверхностей Шепарда и набора частных 3D моделей лиц. Предложена альтернативная к EER оценке точности в задаче распознавания личности по изображению лица, основанная на фиксированном значении оценки FAR. Приведены результаты тестирования описанного алгоритма. Продемонстрированы результаты использования полученных моделей в рамках работы алгоритма распознавания на крупной базе из нескольких тысяч изображений (база изображений FERET за 2000 год), содержащей фотографии людей под углами 0, 45 и 90 градусов относительно оптической оси камеры. Анализ результатов показал, что применение деформируемых моделей лица не снижает качества распознавания личности по изображению лица даже при сложных начальных условиях, а в ряде случаев ведет к улучшению результатов распознавания.

Ключевые слова: распознавание личности, активные модели форм, 3D модель лица, деформируемая модель лица, биометрический вектор.

1. Введение. Задача распознавания личности по изображению лица является одной из первых практических задач, которая послужила стимулом для эволюции теории распознавания объектов. Потребность в быстрой и правильной идентификации личности в видеопотоке в режиме реального времени в последнее время продолжает возрастать.

Данное направление компьютерного зрения сталкивается с двумя ключевыми проблемами — различные условия освещения и различные ракурсы съемки лиц [1-4].

Для решения этих проблем существует два пути: расширение базы эталонных образов добавлением изображений с различными условиями съемки (что не всегда возможно сделать), а также моделирование условий съемки на эталонных образах при их сравнении с анализируемыми. Расширением второго подхода является использование 3D моделей лиц и сравнение отдельно рельефа и текстуры получаемых трехмерных объектов [5]. Данный подход представляет широкие возможности по моделированию ракурса и освещения, но требует создания 3D модели каждого лица в базе данных, что является ресурсоемкой и нетривиальной задачей. Разработка методов и алгоритмов распознавания и обработки объектов на изображениях ведется не только зарубежными, но и российскими

учеными. Весомый вклад в область анализа изображений внесли А. С. Конушин [6], Н. Г. Загоруйко [7], Л. М. Местецкий [8], С. Ю. Желтов, Ю. В. Визильтер [9], А. С. Крылов [10], А. И. Шерстобитов [11], А. И. Пахирка [12] и другие. Существуют также практические реализации систем как 2D, так и 3D распознавания, например, компания VOCORD занимается полным циклом производства систем распознавания, начиная от камер высокого разрешения и заканчивая специализированным программным обеспечением, рассчитанным на работу с различными конфигурациями оборудования [13].

Применение классических двумерных методов распознавания, рассчитанных на глубокий анализ изображения или обучение нейронных сетей, и методов, использующих 3D модели, позволяет получить впечатляющие результаты для ряда случаев распознавания личности по фотографии [14]. Однако во многих сферах деятельности требуется некооперативное распознавание личности человека в видеопотоке, например поиск подозрительного человека по короткой видеозаписи плохого качества, на которой он не смотрит прямо в объектив камеры, присутствуют шумы, боковая засветка.

Существующие быстрые двумерные методы и алгоритмы достигают хорошей точности только при соблюдении жестких требований по ракурсу изображений лица и условиям съемки [15], что обусловлено механизмами кластеризации и машинного обучения.

Если влияние условий съемки, таких как освещение, яркость и контрастность изображения, в большинстве случаев можно компенсировать с помощью существующих методов и алгоритмов обработки изображений [16, 17], то задача компенсации ракурса чаще всего сводится к использованию оборудования, позволяющего получать трехмерные модели лиц для дальнейшего использования в распознавании [18, 19]. Методы, рассчитанные на построение 3D моделей из видеопотока, обычно не рассматриваются для использования в системах реального времени, так как для создания 3D модели высокого качества в режиме реального времени требуются значительные вычислительные ресурсы [20, 21].

Ранее [22] был предложен алгоритм получения набора изображений лиц для формирования кластера биометрических векторов с помощью ряда известных методов, таких как Deformable Face Models (DFM) [23, 24], Active Shape Models (ASM) [25] и аффинных преобразований исходного изображения. Также были представлены первые результаты проверки работоспособности гипотезы о том, что данный подход позволяет улучшить качество

распознавания личности человека для существующих двумерных методов распознавания [26].

Однако использованная оценка EER (equal error rate, мера равного уровня ошибок), по которой была проверена эффективность алгоритма, не всегда является объективным показателем при сравнении эффективности распознавания. Она показывает только точку, в которой ошибки FAR и FRR равны, но не изменения этих ошибок в зависимости от параметров сравнения кластеров биометрических векторов.

В связи с этим становится актуальной задача получения развернутых результатов тестирования алгоритма, в том числе на других базах изображений, помимо собственной выборки и показательной, но крайне малой базы Caltech Faces.

2. Алгоритмы формирования 3D модели лица и набора изображений лиц. При наличии достаточно большого числа 3D моделей лиц в качестве искомой модели можно взять ближайшую эталонную модель, выбрав в качестве критерия удаленность особых точек модели, полученных автоматически с помощью алгоритмов ASM, от особых точек анализируемого лица. Однако более точным решением является интерполяция каждой точки 3D модели исходя из близости к эталонным моделям [23].

Для вычисления модели была применена модификация метода интерполяции Шепарда для каждой особой точки [27]:

$$w_i = \frac{\left(\frac{R - h_i}{R \cdot h_i}\right)^2}{\sum_{q=1}^N \frac{R - h_q}{R \cdot h_q}}, \quad (1)$$

где i — номер модели лица, N — число моделей, h_i — расстояние от точки модели до точки изображения на плоскости (X , Y), R — заданный радиус, $R \geq \min(h_i)$, w_i — коэффициент удельного веса модели при вычислении третьей координаты особой точки лица.

При этом z -координата определяется как сумма произведений z -координат моделей и соответствующих весов, полученных из формулы (1):

$$z_j = \sum_{i=1}^N z_i \cdot w_i, \quad (2)$$

где j — номер особой точки изображения лица.

Данная модификация метода позволяет автоматизировать процесс интерполяции, вычисляя радиус R через другие параметры — размерность пространства, число и плотность точек модели. Радиус R определяется автоматически по формуле:

$$R = \max_{i \in K} |x - x_i|, \quad (3)$$

где $K=N_w < N$ — число ближайших точек. Согласно общим рекомендациям [28] по выбору числа точек, принято значение $N_w=9$. Данная модификация хорошо подходит для случаев неравномерной неизвестной заранее сетки, а также позволяет использовать вместо константных значений z_j в формуле (2) некоторый функционал, например линейный или квадратичный [29]. В рассматриваемом случае было решено ограничиться константными значениями.

Этот метод позволяет получить уникальную модель анализируемого лица, которая будет более точной, чем любая из эталонных моделей. При таком подходе увеличение числа эталонных моделей аналогично ведет к улучшению точности, но не является критичным для успешного вычисления.

Исходя из этого, был предложен следующий алгоритм формирования индивидуальной модели лица:

А. Поиск соответствия между найденными особыми точками и известными 3D моделями.

Для того чтобы найти соответствие, необходимо получить фронтальную проекцию множества точек 3D моделей лиц $P_i(x, y, z)$. То есть найти такое множество точек $P_i(x^*, y^*)$, при котором координаты центров глаз будут находиться на строго горизонтальной линии (координата x^*), а серединные точки рта и переносицы — на строго вертикальной линии (координата y^*) [30].

Так как в выбранном для предложенного алгоритма наборе моделей координаты x и y соответствуют координатам x^* и y^* фронтальной проекции, то итоговая проекция получается отбрасыванием третьей координаты z . Далее, из этой проекции можно сформировать фронтальное изображение лица по облаку точек $P_i(x, y)$ и текстуре 3D модели.

Для дальнейшего нормирования полученного фронтального изображения модели к фронтальному изображению лица необходимо вычислить набор особых точек $E_j(x, y)$ для изображения, полученного из 3D модели, и изображения анализируемого лица с помощью алгоритма ASM.

Б. Нормирование особых точек относительно масштаба моделей (например, расстояние между центрами глаз) и центра координат (например, кончик носа).

Для нормирования плоского изображения необходимо определить как минимум две точки, относительно которых будет проводиться масштабирование остальных координат и сведение центров координат. В общем случае координаты изображения лица соответствуют пикселям этого изображения и по определению лежат в плоскости целых положительных чисел, а координаты проекции 3D модели могут быть дробными и отрицательными числами (зависит от формата хранения модели).

В рассматриваемой задаче удобнее всего при вычислении коэффициента масштабирования опереться на координаты особых точек, вычисленные алгоритмом ASM. Для этого достаточно взять две устойчивые точки, координаты центров глаз для изображения проекции модели, $E_l(x_l, y_l)$ и $E_r(x_r, y_r)$, а также для изображения анализируемого лица, $E'_l(x'_l, y'_l)$ и $E'_r(x'_r, y'_r)$. Расстояния между этими точками находятся по формулам:

$$D = \sqrt{(x_l - x_r)^2 + (y_l - y_r)^2} \quad \text{и} \quad D' = \sqrt{(x'_l - x'_r)^2 + (y'_l - y'_r)^2}. \quad (4)$$

В результате, с использованием значений расстояния, полученных по формуле (4), коэффициент масштабирования для изображения анализируемого лица определяется как соотношение $K=D/D'$.

В качестве точки центра координат корректно будет указать точку, которая не является симметричной в модели ASM. Эта точка — кончик носа, $E_n(x_n, y_n)$. Для совмещения центров координат необходимо найти расстояние между координатами точки $E_n(x_n, y_n)$ изображения проекции модели и координатами точки $E'_n(x'_n, y'_n)$ изображения анализируемого лица:

$$D_x = x_n - x'_n, \quad D_y = y_n - y'_n. \quad (5)$$

После вычитания расстояний (5) из каждой точки изображения лица и последующего умножения на коэффициент масштабирования K изображение лица и проекции модели становятся нормированными относительно одной и той же системы координат.

В. Вычисление расстояний для каждой особой точки изображения лица и соответствующих особых точек каждой из 3D моделей.

Так как полученные координаты особых точек для изображений нормированы по точкам центров глаз E_l и E_r , а также центра носа E_n , то расстояния между остальными точками массивов E и E'

характеризуют различия изображения анализируемого лица и 3D модели, использованной при формировании фронтальной проекции:

$$F_i = \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} . \quad (6)$$

Г. Вычисление координаты глубины для особых точек изображения лица путем интерполяции значений в особых точках моделей.

Вычисленное на предыдущем этапе расстояние (6) между соответствующими особыми точками известной модели и заданного изображения лица позволяет судить о близости 3D моделей к лицу человека на изображении. После вычисления расстояний для проекции каждой из 3D моделей появится возможность применить формулы интерполяции Шепарда, определив радиус R числом ближайших точек поверхности. Таким образом, для каждой особой точки изображения лица находится координата глубины z , позволяющая судить о рельефе анализируемого лица.

Д. Определение координаты глубины для всех остальных точек искомой модели постепенным вычислением новых точек между известными особыми точками до тех пор, пока число точек модели не достигнет числа точек эталонных моделей.

Для получения более подробной 3D модели лица недостаточно вычисления третьей координаты только в особых точках, поэтому необходимо расширить массив до некоторого предела $Q \leq N$, где N — число точек, описывающих исходные 3D модели.

В этом случае к описанной ранее процедуре дробления треугольников изображения лица добавляется вычисление координаты z для новой точки. Напрямую применять интерполяцию в данном случае некорректно, так как для новой точки изображения лица неизвестны соответствующие точки моделей. Для решения этой проблемы необходимые веса w_i новой точки вычисляются по средневзвешенному значению весов нескольких ближайших особых точек. Этим достигается гладкость и непрерывность результирующей 3D модели.

В результате этих операций получается индивидуальная 3D модель лица, которую можно использовать для алгоритма построения изображения лица, повернутого на заданный угол.

Для решения задачи получения набора изображений в различных ракурсах необходимо произвести следующие операции:

— Разбиение полученной модели лица на треугольники. В результате этой операции будет получен набор треугольников, описывающих область лица на изображении. Его можно использовать

для построения нормированного изображения, но результат получится достаточно грубым.

— Дробление треугольников по выбранному критерию, позволяющему снизить размеры используемых треугольников и приблизить используемую треугольную сетку к равномерной. В качестве критерия разбиения можно взять максимальную площадь треугольника либо максимальную длину стороны.

Процесс разбиения заключается в циклическом выполнении следующих действий:

- а) поиск грани треугольника в сетке согласно критерию разбиения;
- б) создание новой точки, делящей самую длинную грань треугольника пополам;
- в) построение двух новых треугольников вместо одного изначального. Если грань общая для двух треугольников, то смежный треугольник разбивается аналогично.

Процесс повторяется до тех пор, пока суммарное число треугольников не достигнет необходимого значения либо пока максимальная площадь треугольника не станет меньше заданного порога.

— Каждый из треугольников с помощью операций вращения относительно заданного центра и аффинного преобразования смещается и деформируется в соответствии с заданной величиной угла.

В результате выполнения алгоритмов из одного изображения лица удается получить набор изображений, которые могут использоваться в алгоритмах распознавания личности.

3. Подготовка тестирования алгоритма распознавания личности. Аналогично работе [26] для проверки эффективности использования алгоритма в процессе формирования биометрических векторов было проведено тестирование системы распознавания, основанной на методе ближайшего соседа и кластерах биометрических векторов. Полученные векторы признаков сравнивались с помощью метрики Евклида.

Было использовано 3 базы изображений лиц. Первое тестирование проводилось на базе, составленной из видео. Второе тестирование проводилось на базе лиц Caltech Faces [31]. Для третьего тестирования была использована первая версия базы изображений лиц FERET [32], содержащая несколько изображений лиц, повернутых относительно оптической оси камеры на большие углы — от -90 градусов до 90 с шагом в 45 градусов.

В первоначальном сравнении результатов в качестве оценки эффективности алгоритма была выбрана характеристика EER. EER — равный уровень ошибок FAR и FRR, где FAR — вероятность ложного обнаружения, то есть вероятность того, что система по ошибке признает подлинность пользователя, не зарегистрированного в системе, а FRR —

вероятность пропуска цели, то есть вероятность того, что система не признает подлинность зарегистрированного в ней пользователя. Чем меньше EER, тем более эффективным считается алгоритм [33].

Другими словами, эффективность алгоритмов распознавания может быть оценена двумя вероятностными характеристиками:

1. FAR (False Accept Rate) — вероятность ложного обнаружения; система принимает одного человека, не имеющего фотографий в базе системы распознавания, за другого, зарегистрированного в базе («обознались»).

2. FRR (False Reject Rate) — вероятность пропуска цели; система не регистрирует совпадения по фотографии зарегистрированного в ней пользователя («не узнали»).

В системах распознавания эти вероятности всегда являются взаимобратными величинами, в различных системах более важной считается либо первая, либо вторая характеристика.

Однако оценка EER не всегда отражает реальную эффективность, так как зависит не только от минимальных или оптимальных значений оценок FAR и FRR, но и от динамики их изменения, области применения алгоритмов. Кроме того, ее затруднительно вычислить для эмпирических данных, так как требуется множество вычислений FAR и FRR с различными параметрами, не гарантирующими получение точного значения за конечное число итераций. В системах, контролирурующих вход людей на объекты ограниченного допуска, вероятность пропуска цели не такая критичная характеристика, как вероятность ложного обнаружения. Исходя из этих соображений, конечной оценкой эффективности системы идентификации личности для задач безопасности примем уровень FRR при заданном уровне $FAR \leq 1\%$ от выборки.

4. Базы изображений лиц для тестирования. Первое тестирование проводилось на собственной базе изображений, полученных из видеозаписей стандартным детектором лиц. База состоит из 21 тысячи изображений лиц 12 человек в различных ракурсах и условиях съемки. Система распознавания была запущена с тремя эталонными наборами изображений:

1) Одно фронтальное изображение каждого из 12 человек.

2) 15 изображений каждого человека, всего 180 уникальных изображений.

3) Набор сформирован вращением одного изображения каждого человека от -20 до 20 градусов по горизонтали относительно оптической оси камеры с шагом в 10 градусов и от -15 до 15 градусов по вертикали с шагом 15 градусов. Таким образом, третий набор составлен из 15 изображений лиц на человека, всего 180 изображений.

На рисунке 1 представлены примеры изображений лиц из собственной базы. Слева — 6 изображений хорошего качества с

малыми углами поворота относительно оптической оси камеры; справа — 6 изображений, содержащие помехи для распознавания, такие как низкая контрастность, посторонние объекты, закрывающие часть лица, и повороты лиц на различные углы.



Рис. 1. Примеры изображений лиц из собственной базы

Второе тестирование проводилось на базе изображений лиц Caltech Faces [31]. Эта база содержит изображения 26 человек, снятых во фронтальном ракурсе, но с различным качеством и мимикой, общее число изображений — 450. Так как число изображений каждого человека в базе разное, при тестировании использовались следующие варианты: 1 изображение на человека, от 3 до 6 изображений на человека и 15 сгенерированных изображений на человека.

На рисунке 2 представлен пример изображения базы Caltech Faces и повернутых изображений, полученных с помощью алгоритма деформируемых моделей лиц.

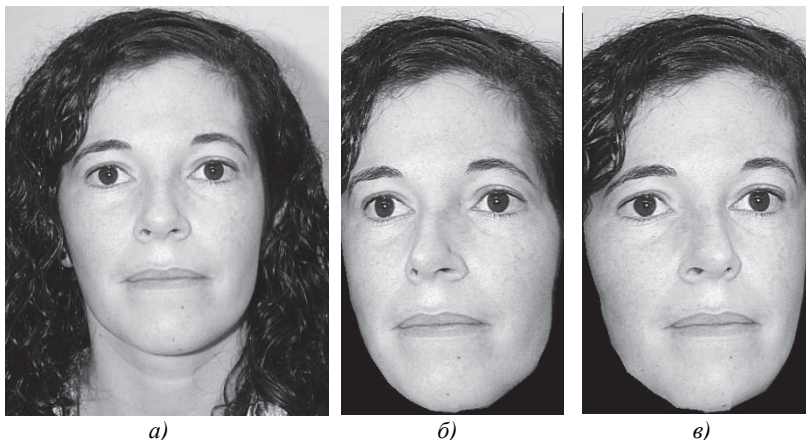


Рис. 2. Пример изображения базы Caltech Faces: а) исходное фронтальное изображение лица из базы Caltech Faces; б, в) лица, полученные поворотом вдоль горизонтальной оси на 20 градусов влево и вправо

Третье тестирование проводилось на первой версии базы изображений лиц FERET [32]. Эта база содержит изображения 996 человек, снятых в различных ракурсах (повороты на 0, 45 и 90 градусов по горизонтали относительно оптической оси камеры), с различным качеством, освещением и мимикой. Такая база плохо соответствует реальным задачам распознавания, но хорошо покажет предел эффективности для алгоритмов компенсации различных ракурсов изображений лиц. Общее число изображений 11297, из них успешно опознаются стандартным детектором 5335. Так как число изображений каждого человека в базе разное, при тестировании использовались следующие варианты: 1 изображение на человека, от 2 до 6 изображений на человека и 15 сгенерированных изображений на человека. Для распознавания была составлена выборка из базы, содержащей изображения 30 человек, общее число изображений — 181.

На рисунке 3 представлен пример изображений базы FERET и повернутых изображений, полученных с помощью алгоритма деформируемых моделей лиц.

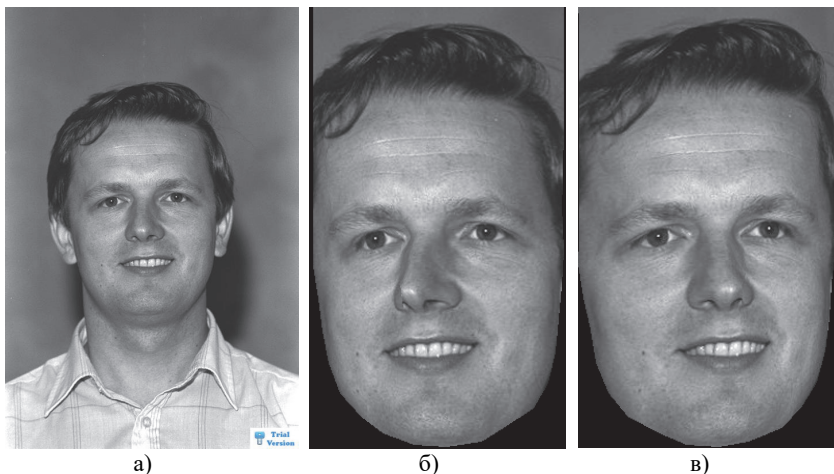


Рис. 3. Пример изображений базы FERET: а) исходное фронтальное изображение лица из базы FERET; б) лица, полученные поворотом вдоль горизонтальной оси на 20 градусов влево и вправо

5. Результаты тестирования алгоритма распознавания с алгоритмом формирования наборов изображений (собственная база изображений). В таблицах 1-2 и на рисунках 4-7 представлены результаты тестирования системы распознавания с наборами эталонных изображений первой базы лиц (12 человек, 21 тысяча изображений лиц).

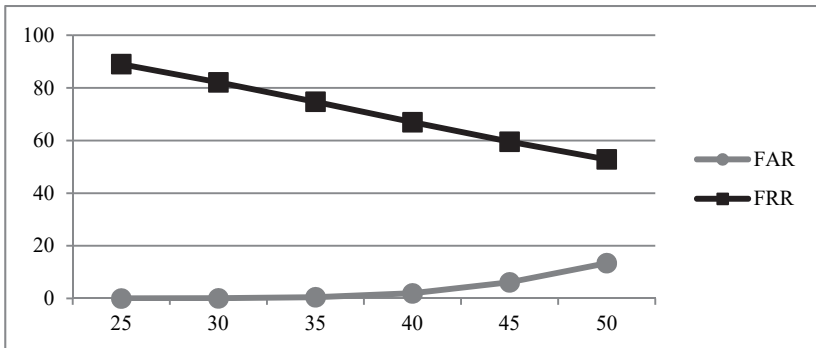


Рис. 4. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, одно изображение лица на человека

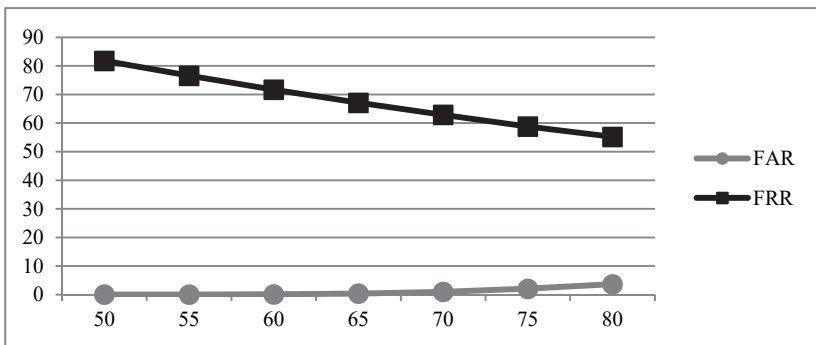


Рис. 5. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, 15 изображений на человека

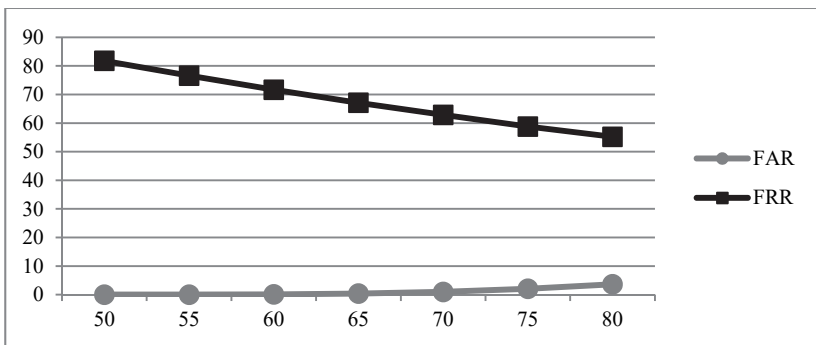


Рис. 6. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, 15 сгенерированных алгоритмом изображений на человека

Полученные при тестировании результаты можно объединить предложенной оценкой уровня ошибки FRR при заданном FAR=1%, а также представить в виде графика PR-кривой, которая показывает отношение точности (precision) и полноты (recall). Здесь полнота P — доля верно распознанных изображений лиц относительно общего числа принятых (верно распознанных и ложно опознанных), а точность R — это доля верно распознанных лиц относительно всех искомых лиц (верно распознанных и ложно отвернутых).

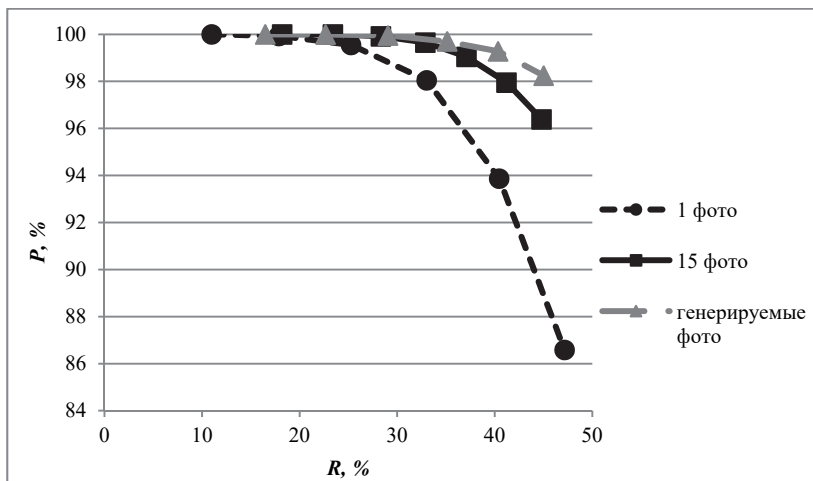


Рис. 7. PR-кривая для тестирования алгоритма на видеофайлах

Сбалансированная F_1 -мера для каждой из баз изображений представлена в таблице 1.

Таблица 1. F_1 -мера тестирования на видеофайлах

Порог распознавания	Одно изображение лица на человека	15 изображений на человека	15 сгенерированных изображений
55	19.776	37.944	28.284
60	30.312	44.135	36.94
65	40.3	49.459	45.022
70	49.403	53.992	51.936
75	56.538	58.013	57.366
80	61.057	61.168	61.737

Таблица 2. Результаты тестирования системы распознавания личности на видеофайлах, FRR при FAR=1%

Набор эталонных изображений	FRR, % (при FAR=1%)
Одно изображение лица на человека	8.069
15 изображений на человека	4.82
15 сгенерированных алгоритмом изображений на человека	2.179

Как можно видеть из таблицы 2, результаты тестирования по новой оценке подтверждают результаты, полученные ранее по оценке EER для сгенерированных изображений [22], а также результаты измерения F_1 -меры. Эффект от использования алгоритма расширения набора биометрических векторов на собственной базе изображений на 2 процентных пункта больше, чем у стандартного подхода.

6. Результаты тестирования алгоритма распознавания с алгоритмом формирования наборов изображений (база Caltech Faces). В таблицах 3-4 и на рисунках 8-11 представлены результаты тестирования системы распознавания с наборами эталонных изображений второй базы лиц (26 человек, 450 изображений лиц).

Таблица 3. F_1 -мера тестирования на видеофайлах

Порог распознавания	Одно изображение лица на человека	15 изображений на человека	15 сгенерированных изображений
75	84.286	98.467	96.961
80	89.193	98.812	97.362
85	93.281	98.647	97.628
90	95.907	98.318	97.628
95	96.974	98.318	97.762
99	96.759	98.318	98.015

Таблица 4. Результаты тестирования системы распознавания личности на базе изображений лиц Caltech Faces, FRR при FAR=1%

База изображений	FRR, % (при FAR=1%)
Одно изображение лица на человека	5.185
3-6 изображений на человека	2.349
15 сгенерированных алгоритмом изображений на человека	3.457

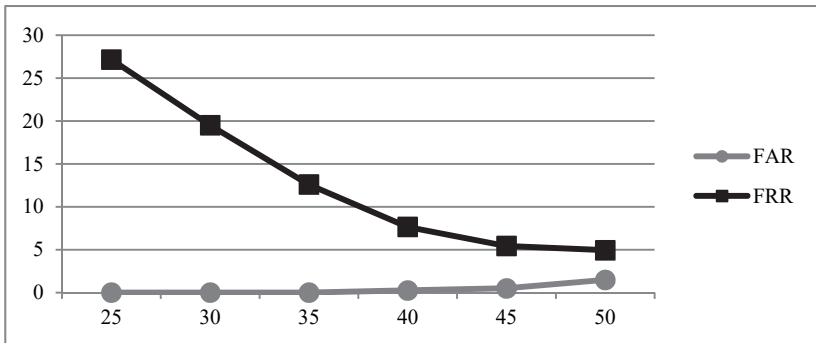


Рис. 8. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, одно изображение лица на человека

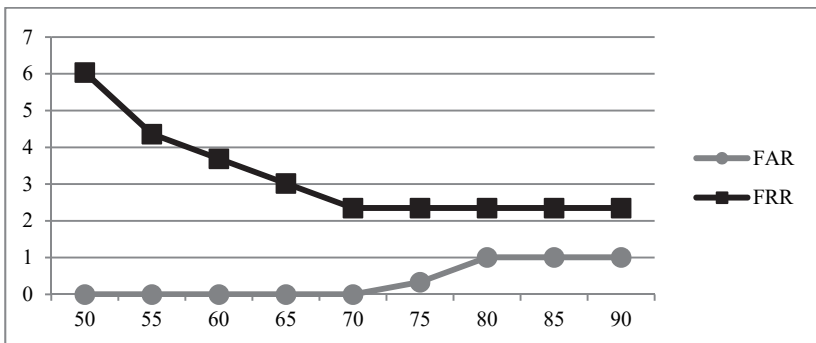


Рис. 9. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, 3-6 изображений на человека

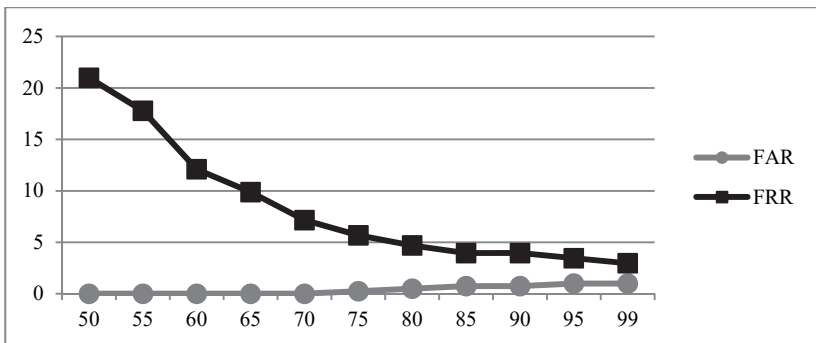


Рис. 10. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, 15 сгенерированных алгоритмом изображений на человека

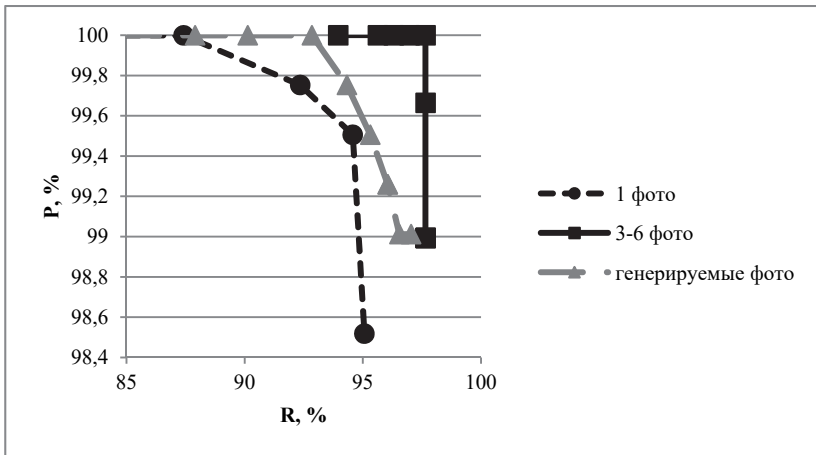


Рис. 11. PR-кривая для тестирования алгоритма на базе Caltech Faces

Результаты, представленные в таблице 4, подтверждают результаты, полученные ранее с помощью оценки EER. В данном случае синтетические изображения показали себя хуже, чем набор фотографий человека, но повысили эффективность распознавания для единственного изображения.

7. Результаты тестирования алгоритма распознавания с алгоритмом формирования наборов изображений (база FERET). В таблицах 5-6 и на рисунках 12-15 представлены результаты тестирования системы распознавания с наборами эталонных изображений третьей базы лиц (996 человек, 5335 изображений лиц).

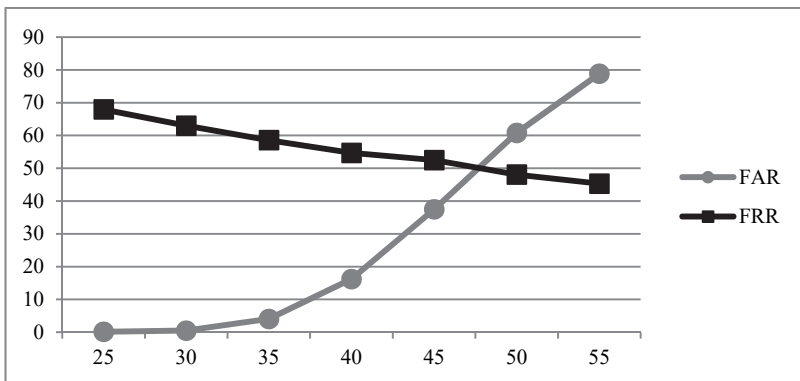


Рис. 12. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, одно изображение лица на человека

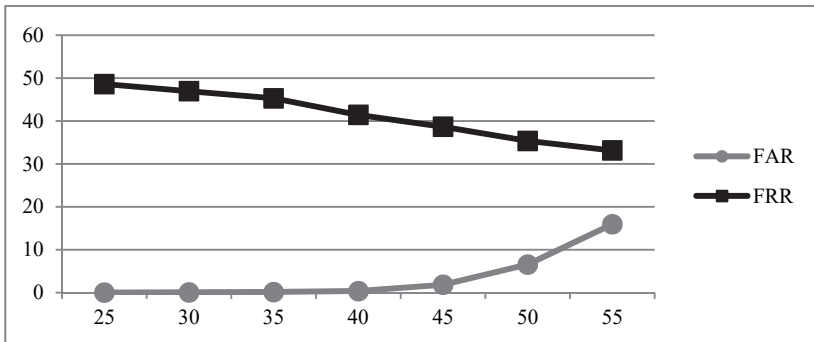


Рис. 13. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, 2-6 изображений на человека

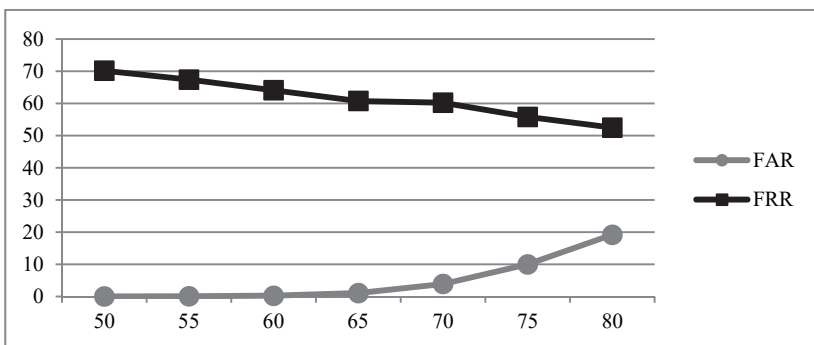


Рис. 14. Ошибки FAR и FRR в зависимости от выбранного порога распознавания, 15 сгенерированных алгоритмом изображений на человека

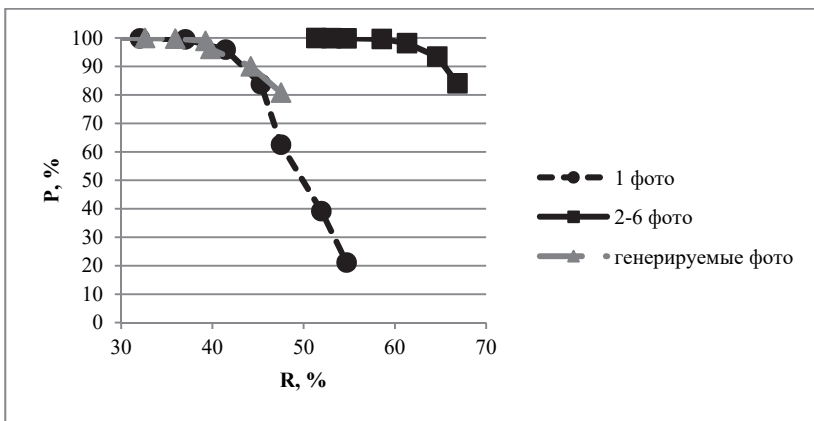


Рис. 15. PR-кривая для тестирования алгоритма на базе FERET

Таблица 5. F_1 -мера тестирования на видеофайлах

Порог распознавания	Одно изображение лица на человека	15 изображений на человека	15 сгенерированных изображений
50	48.522	67.883	45.957
55	53.961	69.301	49.162
60	57.878	70.681	52.814
65	58.809	73.77	56.184
70	53.998	75.496	56.274
75	44.685	76.423	59.29
80	30.517	74.477	59.846

Таблица 6. Результаты тестирования системы распознавания личности на базе изображений лиц FERET, FRR при FAR=1%

База изображений	FRR, % (при FAR=1%)
Одно изображение лица на человека	61.878
2-6 изображений на человека	41.436
15 сгенерированных алгоритмом изображений на человека	61.326

Как можно видеть из таблицы 6, использование сгенерированных изображений оказывается на 20 процентных пунктов менее эффективным для базы, состоящей из большого числа фотографий с критичным изменением ракурса, чем использование нескольких изображений для каждого человека, но все же на 0.55 процентных пунктов более эффективным, чем использование одного изображения. Это позволяет утверждать, что использование синтетических изображений в разных ракурсах, полученных с помощью деформируемых моделей лиц, в общем случае не может вести к ухудшению результатов распознавания.

Из результатов, представленных в таблицах 2, 4 и 6, можно сделать вывод, что алгоритм генерации изображений лиц с разными ракурсами не только не снижает эффективности распознавания личности, но и в ряде случаев улучшает результат.

8. Заключение. В статье приведено описание алгоритма построения деформируемых 3D моделей лиц и создания с его помощью набора изображений лиц в различных ракурсах, применимого в системах распознавания личности по изображениям в видеопотоке в режиме реального времени. Получены новые результаты по тестированию системы распознавания личности с изображениями, сгенерированными таким алгоритмом. Использована новая оценка качества распознавания, более близкая к практическим задачам распознавания личности по изображению лица. Оценка

показала согласованность результатов с ранее использовавшейся оценкой EER и сбалансированной F_1 -мерой. Также проведено тестирование на крупной базе из нескольких тысяч изображений лиц FERET с большими углами поворота лица относительно оптической оси камеры. Результат тестирования показал, что даже в сложных условиях применение синтетических изображений лица в разных ракурсах не ведет к снижению точности распознавания.

Следовательно, использование алгоритма формирования индивидуальной 3D модели лица обосновано при формировании кластеров биометрических векторов, и есть основания рекомендовать его применение в реальных системах распознавания личности по двумерному изображению лица для верификации личности, осуществления криминалистической экспертизы, реализации контрольно-пропускных систем из требований безопасности.

Кроме того, системы распознавания, основанные на разработанном алгоритме, применимы при создании мобильных систем распознавания на удаленных объектах, функционирующих без доступа к сетевой инфраструктуре и серверам обработки информации ввиду низких требований по производительности системы. Слабое влияние на производительность обусловлено выполнением этих алгоритмов на этапе подготовки базы изображений лиц, а дальнейшее формирование биометрических векторов и распознавание производится стандартными методами. Время подготовки базы изображений в таком случае может возрасти с 1-2 минут до 5-10, в зависимости от ее объема, при полном сохранении скорости сравнения биометрических векторов.

Сам алгоритм создания индивидуальных 3D моделей вне контекста распознавания личности имеет перспективы применения в активно развивающихся системах виртуальной реальности для переноса реальных человеческих лиц в виртуальную интерактивную среду и последующего использования в анимированных моделях. Конечными целями подобных операций являются задачи постобработки фильмов, игровой анимации, корректировки мимики, синхронизации движений губ при дубляже, а также замены лиц в видеопотоке.

Литература

1. *Zhao W., Chellappa R., Phillips P.J., Rosenfeld A.* Face recognition: A literature survey // ACM computing surveys (CSUR). 2003. vol. 35. no. 4. pp. 399–458.
2. *Adini Y., Moses Y., Ullman S.* Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1997. vol. 19. pp. 721–732.

3. *Bronstein A., Bronstein M., Kimmel R.* Expression-invariant 3D face recognition // Proceedings of Audio and Video-based Biometric Person Authentication (AVBPA). Springer. 2003. LNCS 2688. pp. 62–69.
4. *Zhou H. et al.* Recent advances on singlemodal and multimodal face recognition: a survey // Proceedings of IEEE Transactions on Human-Machine Systems. 2014. vol. 44. no. 6. pp. 701–716.
5. *Щеголева Н.* Восстановление 3D поверхности лица. Сборник научных трудов 23-ей Международной научной конференции «GraphiCon2013». Владивосток: Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН. 2013. С. 135–139.
6. *Сергеев А.Е., Коцушин А.С., Коцушин В.С.* Подавление ложноположительных обнаружений лиц в видеопотоках систем видеонаблюдения // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 958–967.
7. *Zagoruiko N.G., Kutnenko O.A.* Recognition Methods Based on the AdDel Algorithm // Pattern Recognition and Image Analysis. 2004. vol. 14. no. 2. pp. 198–204.
8. *Chernyshov V.G., Mestetskii L.M.* Mobile Computer Vision System for Hand-Based Identification // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. vol. 25. no. 2. pp. 209–214.
9. *Vizilter Yu.V., Zheltov S.Yu.* Similarity measures and comparison metrics for image shapes // Journal Of Computer And Systems Sciences International. 2014. vol. 53. pp. 542–555.
10. *Krylov A.S., Nasonov A.V.* 3d image sharpening by grid warping // International Conference on Intelligent Science and Big Data Engineering. Springer International Publishing. 2015. LNCS 9242. pp. 441–450.
11. *Шертобитов А.И., Федосов В.П., Приходченко В.А., Тимофеев М.В.* Распознавание лиц на групповых фотографиях с использованием алгоритмов сегментации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. Т. 148. С. 66–73.
12. *Зотин А.Г., Пахирка А.И., Дамов М.В., Савчина Е.И.* Улучшение визуального качества изображений, полученных в сложных условиях освещенности на основе инфракрасных данных // Программные продукты и системы. 2016. Т. 115. № 3. С.109–120.
13. *Манолов А.И. и др.* Некооперативная биометрическая идентификация по 3D-моделям лица с использованием видеокамер высокого разрешения // Сборник научных трудов 19-ой Международной научной конференции «GraphiCon2009». М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2009. С. 210–214.
14. *Taigman Y., Yang M., Ranzato M.A., Wolf L.* Deepface: Closing the gap to human-level performance in face verification // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. pp. 1701–1708.
15. *Gorodnichy D., Granger E., Radtke P.* Survey of commercial technologies for face recognition in video // CBSA. Border Technology Division. Tech. Rep. 2014. vol. 22. 35 p.
16. *Bui T.T.T. et al.* Development of algorithms for face and character recognition based on wavelet transforms, PCA and neural networks // Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON'2015). 2015. pp. 1–6.
17. *Savitskiy Yu.V et al.* Analysis of methods of features extraction from image of human face for identification // Scientific Visualization. 2016. vol. 8. no. 2. pp. 107–119.
18. *Klehm O. et al.* Recent advances in facial appearance capture // Computer Graphics Forum. 2015. vol. 34. no. 2. pp. 709–733.
19. *Заварикин Д.Н. и др.* Система некооперативной биометрической идентификации людей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2012. С. 40–45.
20. *Song H., Lv J., Wang Y.* Rapid 3D Face Modeling from Video // Pacific Rim Conference on Multimedia. 2015. pp. 201–211.
21. *Garrido P. et al.* Reconstruction of Personalized 3D Face Rigs from Monocular Video // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2016. vol. 35. no. 3. pp. 28.
22. *Небаба С.Г., Захарова А.А., Андреев С.Ю.* Алгоритм формирования индивидуальной трехмерной модели лица человека из растрового изображения

- лица и набора частных трехмерных моделей лица // Информационное общество. 2015. №5. С. 25–34.
23. *Blanz V., Vetter T.* Face recognition based on fitting a 3D morphable model // Proceedings of IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2003. vol. 25. no. 9. pp. 1063–1074.
 24. *Zhu X. et al.* Discriminative 3D morphable model fitting // Proceedings of 11th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG). 2015. vol. 1. pp. 1–8.
 25. *Cootes T.F., Taylor C.J., Cooper D.H., Graham J.* Active shape models - their training and application // Computer Vision and Image Understanding. 1995. vol. 61. pp. 38–59.
 26. *Небаба С.Г., Захарова А.А.* Применение алгоритма формирования индивидуальной трехмерной модели человеческого лица в системе распознавания личности по изображению лица // Сборник научных трудов 26-ой Международной научной конференции «GraphiCon2016». Нижний Новгород: ННГАСУ. 2016. С. 310–313.
 27. *Renka R.J.* Multivariate Interpolation of Large Sets of Scattered Data // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 1988. vol. 14. no. 2. pp. 139–148.
 28. ALGLIB User Guide. Интерполяция/аппроксимация по обратному средневзвешенному расстоянию. URL: <http://alglib.sources.ru/interpolation/inversedistanceweighting.php#tuning> (дата обращения: 16.03.2017).
 29. *Renka R.J.* Algorithm 790: CSHEP2D: Cubic Shepard method for bivariate interpolation of scattered data // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 1999. vol. 25. no. 1. pp. 70–73.
 30. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-5-2006. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Форматы обмена биометрическими данными // М.: Госстандарт России. 2006. 36 с.
 31. Computational Vision: Archive. Available at: www.vision.caltech.edu/html-files/archive.html (дата обращения: 13.01.2017).
 32. *Phillips P.J., Moon H., Rauss P.J., Rizvi S.* The FERET evaluation methodology for face recognition algorithms // Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. vol. 22. pp. 1090–1104.
 33. *Кухарев Г.А., Каменская Е.И., Матвеев Ю.Н., Щеголева Н.Л.* Методы обработки и распознавания изображений лиц в задачах биометрии / Под ред. М.В. Хитрова // СПб: Политехника. 2013. 388 с.

Небаба Степан Геннадьевич — высококвалифицированный рабочий научно-учебной лаборатории 3D моделирования, Томский политехнический университет (ТПУ). Область научных интересов: 3D-моделирование, распознавание объектов, обработка и анализ изображений. Число научных публикаций — 10. stepan-lfx@mail.ru; ул. Советская, 84/3, Томск, 634050; р.т.: +7-953-911-75-34, Факс: +7(3822)606-100.

Захарова Алена Александровна — д-р техн. наук, доцент, заведующий научно-учебной лабораторией 3D моделирования, заведующий кафедрой инженерной графики и промышленного дизайна, Томский политехнический университет (ТПУ). Область научных интересов: 3D-моделирование, визуализация сложных систем, моделирование нефтегазовых месторождений, компьютерная графика. Число научных публикаций — 150. zaa@tpu.ru; ул. Советская, 84/3, Томск, 634050; р.т.: +7(3822)606-298, Факс: +7(3822)606-100.

S.G. NEBABA, A.A. ZAKHAROVA
**AN ALGORITHM FOR BUILDING DEFORMABLE 3D HUMAN
 FACE MODELS AND JUSTIFICATION OF ITS APPLICABILITY
 FOR RECOGNITION SYSTEMS**

Nebaba S.G., Zakharova A.A. An Algorithm for Building Deformable 3d Human Face Models and Justification of its Applicability for Recognition Systems.

Abstract. In the article, an algorithm for constructing deformable face models, based on the use of Active Shape Model method, Shepard method of landscape surfaces restoring and set of 3D particular face models, is described. Alternative to the EER, the assessment of accuracy in the task of the person recognition using their face image based on an anchored value of FAR is offered. The results of testing the algorithm are presented. We demonstrate the results of using the obtained models within the framework of recognition algorithm performance on a large base of several thousand images (FERET image database by 2000 year), which contains photographs of people at angles of 0, 45 and 90 degrees relative to the optical axis of the camera. Analysis of the results showed that the use of deformable face models does not reduce the quality of the person recognition by face image even under difficult initial conditions and in some cases leads to improving recognition results.

Keywords: face recognition, active shape models, 3D face model, deformable face model, biometric vector.

Nebaba Stepan Gennadyevich — highly skilled worker of scientific and educational laboratory of 3D Modelling, Tomsk Polytechnic University (TPU). Research interests: 3D modelling, object recognition, image processing and analysis. The number of publications — 10. stepan-lfx@mail.ru; 84/3, Sovetskaja st., Tomsk, 634050, Russia; office phone: +7-953-911-75-34, Fax: +7(3822)606-100.

Zakharova Alena Alexandrovna — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of scientific and educational laboratory of 3D Modelling, head of engineering graphics and industrial design department of Institute of cybernetics, Tomsk Polytechnic University (TPU). Research interests: 3D modelling, visualization of complex systems, modelling of oil and gas fields, computer graphics. The number of publications — 150. zaa@tpu.ru; 84/3, Sovetskaja st., Tomsk, 634050, Russia; office phone: +7(3822)606-298, Fax: +7(3822)606-100.

References

1. Zhao W., Chellappa R., Phillips P. J., Rosenfeld A. Face recognition: A literature survey. *ACM computing surveys (CSUR)*. 2003. vol. 35. no. 4. pp. 399–458.
2. Adini Y., Moses Y., Ullman S. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1997. vol. 19. pp. 721–732.
3. Bronstein A., Bronstein M., Kimmel R. Expression-invariant 3D face recognition. *Proceedings of Audio and Video-based Biometric Person Authentication (AVBPA)*. Springer. 2003. LNCS 2688. pp. 62–69.
4. Zhou H. et al. Recent advances on singlemodal and multimodal face recognition: a survey. *Proceedings of IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2014. vol. 44. no. 6. pp. 701–716.
5. Shhegoleva N. [3D face surface reconstruction]. *Sbornik nauchnyh trudov 23-ej Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «GraphiCon2013»* [GraphiCon2013:

- Collected papers]. Vladivostok: Institut avtomatiki i processov upravlenija DVO RAN. 2013. pp. 135–139. (In Russ.).
6. Sergeev A.E., Konushin A.S., Konushin V.S. [Reducing background false positives for face detection in surveillance feeds]. *Komp'juternaja optika – Computer Optics*. 2016. Issue 40. vol. 6. pp. 958–967. (In Russ.).
 7. Zagoruiko N.G., Kutnenko O.A. Recognition Methods Based on the AdDel Algorithm. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2004. vol. 14. no. 2. pp. 198–204.
 8. Chernyshov V.G., Mestetskii L.M. Mobile Computer Vision System for Hand-Based Identification. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2015. vol. 25. no. 2. pp. 209–214.
 9. Vizilter Yu.V., Zheltov S.Yu. Similarity measures and comparison metrics for image shapes. *Journal Of Computer And Systems Sciences International*. 2014. vol. 53. pp 542–555.
 10. Krylov A.S., Nasonov A.V. 3d image sharpening by grid warping. International Conference on Intelligent Science and Big Data Engineering. Springer International Publishing. 2015. LNCS 9242. pp. 441–450.
 11. Sherstobitov A.I., Fedosov V.P., Prihodchenko V.A., Timofeev M.V. [Face recognition on groups photos with using segmentation algorithms]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2013. vol. 148. pp. 66–73. (In Russ.).
 12. Zotin A.G., Pahirka A.I., Damov M.V., Savchina E.I. [Visual quality enhancement of images obtained in adverse illumination conditions based on infrared data]. *Programmnye produkty i sistemy – Software products and systems*. 2016. Issue 115. vol. 3. pp. 109–120. (In Russ.).
 13. Manolov A.I. et al. [Non-cooperative biometric identification with 3D face models using high-resolution video cameras]. *Sbornik nauchnyh trudov 19-oj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «GraphiCon2009»* [GraphiCon2009: Collected papers]. M.: MGU im. M.V. Lomonosova. 2009. pp. 210–214. (In Russ.).
 14. Taigman Y., Yang M., Ranzato M.A., Wolf L. Deepface: Closing the gap to human-level performance in face verification. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. pp. 1701–1708.
 15. Gorodnichy D., Granger E., Radtke P. Survey of commercial technologies for face recognition in video. CBSA. Border Technology Division. Tech. Rep. 2014. vol. 22. 35 p.
 16. Bui T.T.T. et al. Development of algorithms for face and character recognition based on wavelet transforms, PCA and neural networks. Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON'2015). 2015. pp. 1–6.
 17. Savitskiy Yu.V. et al. Analysis of methods of features extraction from image of human face for identification. *Scientific Visualization*. 2016. vol. 8. no. 2. pp. 107–119.
 18. Klehm O. et al. Recent advances in facial appearance capture. *Computer Graphics Forum*. 2015. vol. 34. no. 2. pp. 709–733.
 19. Zavarikin D.N. et al. [System of non-cooperative biometric identification of people]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. "Priborostroenie" – Bulletin of MSTU N.E. Bauman: Instrumentation*. 2012. pp. 40–45. (In Russ.).
 20. Song H., Lv J., Wang Y. Rapid 3D Face Modeling from Video. Pacific Rim Conference on Multimedia. 2015. pp. 201–211.
 21. Garrido P. et al. Reconstruction of Personalized 3D Face Rigs from Monocular Video. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2016. vol. 35. no. 3. pp. 28.
 22. Nebaba S.G., Zaharova A.A., Andreev S.Ju. [The algorithm of forming the individual three-dimensional model of a human face from a bitmap face image and a set of three-dimensional particular face models]. *Informacionnoe obshchestvo – Information society*. 2015. vol. 5. pp. 25–34. (In Russ.).
 23. Blanz V., Vetter T. Face recognition based on fitting a 3D morphable model. Proceedings of IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2003. vol. 25. no. 9. pp. 1063–1074.

24. Zhu X. et al. Discriminative 3D morphable model fitting. Proceedings of 11th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG). 2015. vol. 1. pp. 1–8.
25. Cootes T.F., Taylor C.J., Cooper D.H., Graham J. Active shape models - their training and application. *Computer Vision and Image Understanding*. 1995. vol. 61. pp. 38–59.
26. Nebaba S.G., Zakharova A.A. [Application of the algorithm of forming the individual three-dimensional human face model in face recognition system]. *Sbornik nauchnyh trudov 26-oi Mezhduнародnoj nauchnoj konferencii «GraphiCon2016»* [GraphiCon2016: Collected papers]. Nizhnij Novgorod: NNGASU. 2016. pp. 310–313. (In Russ.).
27. Renka R.J. Multivariate Interpolation of Large Sets of Scattered Data // *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*. 1988. vol. 14. no. 2. pp. 139–148.
28. ALGLIB User Guide. Interpoljacija/approksimacija po obratnomu srednevzveshennomu rasstojaniju. [ALGLIB User Guide. Interpolation/Approximation by Reverse Average-Weighted Distance]. Available at: <http://alglib.sources.ru/interpolation/inversedistanceweighting.php#tuning> (accessed 16.03.2017). (In Russ.).
29. Renka R.J. Algorithm 790: CSHEP2D: Cubic Shepard method for bivariate interpolation of scattered data. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*. 1999. vol. 25. no. 1. pp. 70–73.
30. GOST R ISO/MJeK 19794-5-2006. [Automatic identification. Biometric identification. Biometric data interchange formats]. M.: Gosstandart Rossii. 2006. 36 p. (In Russ.).
31. Computational Vision: Archive. Available at: www.vision.caltech.edu/html-files/archive.html (accessed: 13.01.2017).
32. Phillips P.J., Moon H., Rauss P.J., Rizvi S. The FERET evaluation methodology for face recognition algorithms. Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. vol. 22. pp. 1090–1104.
33. Kuharev G.A., Kamenskaja E.I., Matveev Ju.N., Shhegoleva N.L. *Metody obrabotki i raspoznavanija izobrazhenij lic v zadachah biometrii. Pod red. M.V. Hitrova* [Methods of processing and recognition of facial images in biometry tasks. Edited by M.V. Hitrov]. SPb: Politehnika. 2013. 388 p. (In Russ.).