

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА ЛИЦА НА ФОТОГРАФИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ

**Федоров Д.М.,**

аспирант, Национальный авиационный университет,  
vorodefdm@gmail.com

*Аннотация.* Проанализированы литературные источники по распознаванию изображений лиц. Обнаружено, что в существующих алгоритмах распознавания не учитывается наклон лица в глубину вперед или назад, что снижает вероятность правильной идентификации личности. Дано описание алгоритма эластичного графа для определения ключевых точек лица, информация о которых будет использована в данной статье. Имея информацию о ключевых точках, разработан метод определения угла наклона лица в глубину на фотографии для повышения качества идентификации личности.

*Ключевые слова:* лицо, изображение, наклон, распознавание, алгоритм.

## METHOD FOR DETERMINING THE ANGLE OF THE PHOTOS ON TO IMPROVE THE QUALITY OF IDENTIFICATION

**Fedorov D.M.,**

graduate student, National Aviation University

*Abstract.* The literature sources for the recognition of faces. It was found that the existing recognition algorithms do not take into account the slope of the face in depth forward or backward, which reduces the probability of correct identification. The description of the elastic graph algorithm to identify key points of the face, details of which will be used in this article. Having the information on the key points, developed a method for determining the angle of inclination of the person in depth on the pictures to improve the quality of personal identification.

*Keywords:* face, image, tilt, pattern recognition, algorithm.

### Введение

**В** последнее время широкое распространение получили информационные системы, в которых применяется технология распознавания лица с целью идентификации личности. Эта технология идентификации, наряду с технологиями распознавания голоса, наилучшим образом подходит для интеллектуальных сред нового поколения. Подсистемы идентификации личности с применением технологии распознавания лица могут быть использованы в автоматизированных системах безопасности, например, на государственных пунктах пропуска, в крупных аэропортах, различных общественных местах и пр. с целью идентификации разыскиваемых персон с одновременной передачей соответствующей оперативной

информации службам, занимающимся установлением личности.

В наше время чаще всего идентификация и установление личности проводится все таки с использованием конкретных данных о ней (фамилия, имя, отчество, дата рождения, пол, гражданство). Но может быть ситуация, когда устанавливаемое лицо проходит под разными установочными данными. В таком случае только наличие точных установочных данных может помочь найти его в базе данных. Кроме того, если говорить об использовании идентификации личности в интернете, то традиционные системы идентификации требуют знания пароля, наличия ключа, идентификационной карточки или иного идентифицирующего предмета, создающего порой пользователям таких систем существенные трудности: иденти-

фицирующий предмет может быть забыт, утерян или скомпрометирован.

В отличие от традиционных биометрические системы идентификации основываются на уникальных биологических характеристиках человека, которые трудно подделать и которые однозначно определяют конкретного человека. К таким характеристикам относятся, например, отпечатки пальцев, форма ладони, узор радужной оболочки и изображение сетчатки глаза. Лицо, голос и запах каждого человека так же индивидуальны.

Распознавание человека по изображению лица выделяется среди биометрических систем тем, что, во-первых, не требуется дорогостоящего специального оборудования. Для большинства приложений, использующих метод распознавания человека по изображению его лица, достаточно персонального компьютера средней мощности и обычной видеокамеры. Во-вторых, не нужен физический контакт идентифицируемого человека с техническими устройствами: нет необходимости к чему-либо прикасаться или специально останавливаться и ждать срабатывания системы. В большинстве случаев достаточно просто пройти мимо или задержаться перед камерой на непродолжительное время.

К недостаткам распознавания человека по изображению лица следует отнести то, что сама по себе такая система не обеспечивает 100%-ой надежности идентификации. Там, где требуется высокая надежность, применяют комбинирование нескольких биометрических методов.

### Алгоритм эластичного графа

Для определения угла наклона лица на изображении нужно иметь информацию о расположении идентификационных точек лица. Для ее получения будет использоваться алгоритм эластичного графа. Далее дано краткое описание этого алгоритма.

В основе алгоритма лежит вейвлет-преобразование Габора. Главная идея вейвлетного преобразования — частотно-локальное (частотно-временное) представление сигнала, в отличие от таких частотных

преобразований, как преобразование Фурье или косинусное преобразование, дающих информацию только о частотных характеристиках сигнала, безотносительно тому, когда и какие частотные компоненты имели место быть в сигнале [1].

Вместо представления некоторой функции в виде суммы взвешенных дельта-функций (пространственно-временное представление) или суммы взвешенных синусоид (частотная область) в вейвлетном представлении функция представлена суммой некоторой базовой функции при различных сдвигах и масштабах. Эта базовая функция  $\psi(t)$  называется вейвлетом [1]. Вейвлеты должны быть пространственно локализованы, иметь равные площади над и под осью графика, и не равны нулю только на конечном интервале:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0.$$

Также желательно, чтобы вейвлетный базис был ортонормированным, т.е. произведение любых различных векторов (базисных функций) равно нулю, и длина каждого вектора (норма функции) равна единице. Таким образом, вейвлетные коэффициенты будут нести максимум независимой информации.

Простейшее преобразование для представления функций — это преобразование Хаара. Но как раз из-за его простоты оно плохо подходит для представления сложных функций. Имеются также более сложные вейвлет-преобразования, например такие как вейвлеты Добеши (преобразование Хаара — их частный случай). Они локализованы по времени и по частоте и обладают фрактальными свойствами, т.е. на каждом масштабе вейвлет Добеши (как и все остальные вейвлеты) является уменьшенной копией самого себя.

Ниже приведен общий вид вейвлетного преобразования и вычисление вейвлетных коэффициентов функции  $f(t)$

$$W(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{\nu}^{\mu}(t) dt, \quad \forall \nu, \mu,$$

где  $\mu$  — масштаб;  $\nu$  — сдвиг базисной функции (вейвлета)

$$\Psi_v^\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} \Psi\left(\frac{t-v}{\mu}\right).$$

На практике обычно используется дискретное вейвлетное преобразование, масштаб и сдвиг базисного вейвлета изменяется дискретными шагами. Масштаб, как правило, на каждом шаге уменьшается в геометрической прогрессии  $2^{-m/2}$  ( $m$  – шаг), а шаг смещения выбирается пропорционально масштабу. Обратное преобразование (реконструкция) имеет вид

$$f(t) = \iint \Psi_v^\mu(t) W(\mu, v) \frac{d\mu dv}{\mu^2}.$$

Основным прикладным назначением вейвлетных преобразований является сжатие изображений. Кроме того, вейвлетное преобразование используется для извлечения ключевых характеристик изображений и поиска участков с одинаковыми свойствами на разных изображениях.

Как уже было сказано, алгоритм эластичного графа основывается на вейвлет-преобразовании Габора. Также, из названия алгоритма видно, что базовым объектом представления для алгоритма эластичного графа является размеченный граф. Ребра графа помечаются информацией о расстоянии между узлами, а узлы помечаются локальными откликами вейвлет-преобразования, которые условно называют джетами (jets) [2]. Джет описывает маленький фрагмент полутонового изображения  $I(\bar{x})$  вокруг заданного пикселя  $\bar{x} = (x, y)$  [2]. Описание джета основано на вейвлет-преобразовании Габора, определяемом как свертка

$$J_j(\bar{x}) = \int I(\bar{x}') \psi_j(\bar{x} - \bar{x}') d^2 \bar{x}'$$

с семейством функций Габора

$$\psi_j(\bar{x}) = \frac{k_j^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{k_j^2 x^2}{2\sigma^2}\right) \left[ \exp(ik_j \bar{x}) - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right) \right]$$

в форме плоских волн с волновым вектором  $\bar{k}_j$ , ограниченным огибающей Гаусса. Обычно используют дискретный набор из 5-ти различных частот с индексами  $v = 0..4$ , и 8-ми ориентации с индексами  $\mu = 0..7$

$$\bar{k}_j = \begin{pmatrix} k_{jx} \\ k_{jy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_v \cos \phi_\mu \\ k_v \sin \phi_\mu \end{pmatrix}, \quad k_v = 2^{\frac{v+2}{2}} \pi, \quad \phi_\mu = \mu \frac{\pi}{8},$$

где индекс  $j = \mu + 8v$ . Это квантование равномерно покрывает всю полосу в частотной области. Ширина Гауссиана  $\sigma/k$  контролируется параметром  $\sigma = 2\pi$ . Джет  $J$  определяется как набор  $\{J_j\}$  комплексных коэффициентов Габора, полученных из одной точки изображения. Комплексный коэффициент Габора может быть записан следующим образом

$$J_j = a_j \exp(i\phi_j),$$

где величина  $a_j(\bar{x})$  медленно изменяется в зависимости от местоположения на изображении, и фазы  $\phi_j(\bar{x})$ .

Вейвлеты Габора устойчивы к изменению освещения изображения и к изменению контраста, что достигается путем нормализации джетов. Ограниченная локализация в пространстве и частоте дает определенную величину устойчивости против сдвига, искажения, поворота и масштабирования. Недостатком функций Габора является их чувствительность к фоновым изменениям. Однако, в работах [1,3] показано, что если контур объекта известен, влияние фона можно подавить.

Для того, чтобы представить изображение лица с помощью эластичного графа, следует определить набор лицевых точек (например, зрачки, углы губ, и пр.). Размеченный граф  $G$ , представляющий лицо, содержит  $N$  узлов в этих лицевых точках в позициях  $\bar{x}_n$ ,  $n=1, \dots, N$  и  $E$  ребер между ними. Узлы обозначены джетами  $J_n$ . Ребра  $e = 1, \dots, E$  являются двухмерными векторами и помечены расстояниями  $\Delta \bar{x}_e = \bar{x}_n - \bar{x}_{n'}$ . Ребро  $e$  связывает узел  $n'$  с узлом  $n$ . Такой граф лица является объектно-адаптированным, так как узлы выбраны в точках, специфичных для лица (лицевые точки).

Графы для различных ракурсов головы различаются в геометрии и локальных характеристиках. Несмотря на то, что лицевые точки ссылаются на соответствующие объектные локализации, некоторые из них могут быть скрыты, и джеты, как и дистанции, изменятся вследствие поворота или наклона

в глубину. Для возможности сравнивать графы при различных изменениях ракурса лица требуется вручную определять указатели на соответствующие узлы в различных графах. Джеты, извлеченные из различных изображений лиц, могут значительно отличаться. Следовательно, нельзя ожидать, что можно достоверно находить лицевые точки, согласовывая лишь одну модель с изображениями лиц различных персон. Решается эта задача путем использования обобщенного набора графов моделей для различных лиц - «общее знание о структуре лица» (General Face Knowledge). В общем знании о структуре лица все графы моделей имеют одинаковую структуру, узлы ссылаются на соответствующие лицевые точки. Все узлы, ссылающиеся на одинаковые лицевые точки, связываются вместе и представляют собой различные экземпляры этих локальных лицевых областей. Ребра размечаются усредненными значениями расстояний между узлами. Таким образом, достигается усредненная геометрия лица (рис. 1).

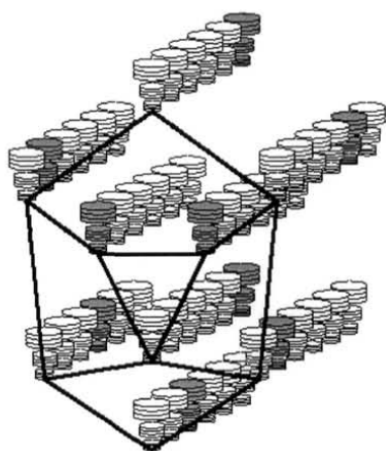


Рис. 1. Обобщенный граф

Обобщенный граф используется для автоматической разметки нового изображения с целью получения графа изображения. При этом каждый узел графа может быть подвергнут сравнению с соответствующим узлом любой из моделей во множестве (рис. 1). Допускаем, что для каждого нового лица и для каждой лицевой точки имеется «экспертный» джет в общих знаниях, достаточно подобный с джетом на новом

лице в этом месте, чтобы приблизительно определить позицию лицевой точки. Помимо получения графа изображения процесс разметки также предоставляет информацию о том, какая модель более подобна новому лицу в любой лицевой точке. Справедливо возникает вопрос об объеме обобщенного графа. Он зависит от степени различия лиц во множестве. Если лица во множестве имеют принадлежность к различным расам, с разным выражением эмоций, разного возраста и т.д., общий граф должен содержать достаточно много различных моделей, чтобы справиться с описанными различиями. Объем обобщенного графа также будет увеличиваться, если требуется достичь желаемой точности согласования при нахождении лицевых точек на новом лице в процессе формирования графа изображения. Точность согласования может быть оценена при разметке обобщенного графа на изображение лица. При этом найденные лицевые точки проверяются вручную.

### Анализ последних исследований и публикаций

На данный момент проблеме распознавания человека по изображению лица посвящено множество работ, однако в целом она еще далека от разрешения. Основные трудности такого метода идентификации личности состоят в том, что система идентификации должна распознавать человека по изображению лица независимо от изменения ракурса, условий освещенности при съемке, а так же при различных изменениях, связанных с возрастом, прической, гримом и т.д. В данной работе будет предложен метод, который позволит сделать распознавание независимым от изменения ракурса лица. Для этого будет предложен метод определения угла наклона лица, который позволит сделать распознавание не чувствительным к наклону лица вперед или назад в глубину. При анализе литературных источников не было найдено никаких сведений о таком искажении.

В работе [2] рассматривается метод сравнения эластичных графов, который способен достаточно надежно распознавать изображения при изменениях ракурса (повороте влево или вправо в глубину) до  $22^\circ$ .

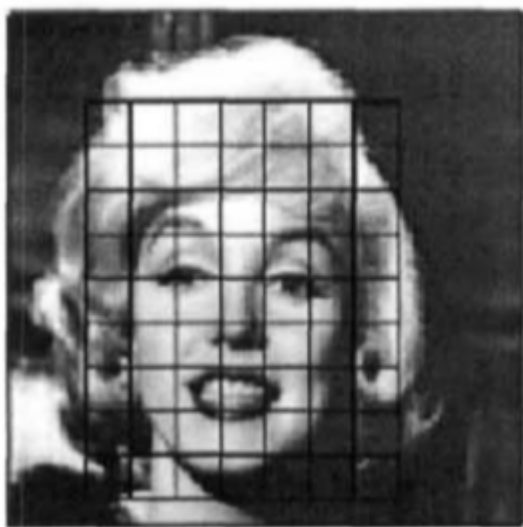
При больших углах точность распознавания изображения резко уменьшается, функция подобия оказывается более чувствительной к ракурсу, чем к межклассовым различиям. Но про наклон лица на изображении вперед или назад в работе [2] ничего не сказано.

В работе [4] предложен метод, в котором для оценки точности определения углов поворота изображения лица предлагается использовать трехмерные модели лиц, получаемые путем трехмерного сканирования. Первым шагом в оценке точности является получение трехмерной модели лица человека. Для определения ошибок вычисления угловых координат модель поворачивается вокруг осей опорной системы координат на заданные углы, и строится ее проекция на фокальную плоскость виртуальной камеры, ориентированной относительно опорной системы координат. Эта проекция считается изображением повернутого лица, по которому осуществляются оценки углов поворотов изображения с помощью косвенных методов измерения, реализованных в программе оценки соответствия изображения лица требованиям ГОСТ. Возможно, такой метод позволил бы определить не только угол поворота лица, но и угол его наклона вперед или назад. Но в работе [4] задача упрощается тем, что используется трехмерная модель лица и вследствие этого задача определения угла наклона или поворота становится тривиальной.

Но в данной статье в качестве исходной информации для обработки имеется только фотография лица.

В работе [5] описано дальнейшее развитие метода из работы [2], которое заключается в извлечении коэффициентов важности на основе анализа обучающей выборки. Для каждого джета симплекс-методом вычисляется коэффициент важности, который затем используется в алгоритме восстановления параллельного к наблюдателю положения лица. Коэффициенты важности вычисляются из условия максимизации функции подобия для одного и того же лица и минимизации – для различных лиц. Но это не позволяет сделать распознавание нечувствительным к наклону лица на изображении вперед или назад.

Другое улучшение метода заключается в применении линейных преобразований джетов для компенсации изменения ракурса изображения [6]. Существуют также более ранние разновидности этого метода, которые не используют изначально определенные ключевые точки и структуры графа [6]. Одни из них используют для сравнения решетки джетов, наложенные на изображение (рис. 2). В неизвестном изображении отыскиваются точки соответствия и потом по найденным точкам строится искаженная решетка, а затем измеряется мера ее искажения для определения наиболее похожего изображения.



а)



б)

Рис. 2. Эластичная решетка, наложенная на изображение, и ее искажение

В других методах точки извлечения джетов изначально образуют решетку, а затем наименее пригодные для распознавания точки отсеиваются в процессе обучения. Но все эти методы не позволяют определить угол наклона лица в глубину на изображении или сделать распознавание нечувствительным к такому виду искажений.

### Постановка задачи

В целом, сложившиеся подходы к идентификации персон по изображениям человеческих лиц практически устоялись, но имеют недостатки связанные с распознаванием искаженных в глубину изображений. Необходимо совершенствование существующих алгоритмов с целью устранения этих недостатков и таким образом повышения надежности распознавания лиц по фотографии. Как видно из анализа последних исследований и публикаций, проблема распознавания повернутого лица влево или вправо уже решена, но не предложен еще алгоритм распознавания, который учитывает наклон лица на изображении вперед или назад. Поэтому целью данной статьи является разработка метода определения угла наклона лица на фотографии, который позволит сделать распознавание нечувствительным к такому изменению ракурса.

### Решение задачи

Определение угла наклона основано на геометрических особенностях строения лица человека. В качестве априорных данных может быть использована информация об опорных лицевых точках (центры зрачков, кончик носа, крайние левая и правая границы лица, центр губ, нижняя точка лица). Как уже было сказано выше, автоматически получить данные о местоположении опорных точек можно с помощью использования алгоритма эластичного графа, а перечисленные опорные точки этот алгоритм находит уже на первых итерациях.

Выделение и измерение угла наклона лица в глубину (ракурс лица) позволяет, используя известные методы, автоматически преобразовать наклоненное лицо человека во фронтальное (угол наклона равен

0 градусов) и проводить распознавание человека уже для фронтального изображения его лица (рис. 3).

Это значительно снижает затраты на оптимизацию алгоритма распознавания человека по наклоненному изображению его лица. В частности, отсутствует необходимость составления обобщенных графов для выборочных углов наклона лица в глубину [2]. Кроме того, если распознавание лиц будет использоваться при поиске человека в базе данных, то определение угла наклона лица избавляет от необходимости хранить в базе данных несколько изображений лиц одного и того же человека при разных углах наклона в глубину. Следовательно, в базе данных регистрируется и хранится только фронтальное изображение лица человека (например, фотография на документы), а, следовательно, отсутствует избыточность информации, которая могла быть вызвана необходимостью хранения данных для изображений лица человека при различных ракурсах. В целях разработки алгоритма автоматического определения угла наклона лица по его изображению предлагается использование мер, основанных на геометрических особенностях лица человека. Для определения угла можно использовать следующие опорные точки (рис. 4):

- 1) центр зрачка левого глаза;
- 2) центр зрачка правого глаза;
- 3) кончик носа;
- 4) центр губ;
- 5) нижняя точка лица

Так как изображение лица человека является двумерным, то для определения угла наклона в основном будут использованы методы, применяемые в геометрии на плоскости. Однако, следует учитывать пространственную геометрию лица человека, в частности то, что кончик носа имеет некоторую высоту над плоскостью, проходящей через другие опорные точки (центры зрачков глаз, центр губ, нижняя точка лица), что может помешать правильному определению угла наклона лица. В данной статье предлагается алгоритм определения наклона лица в глубину, основанный на использовании площади одного из треугольников, образованного опорными точками лица. Исследования

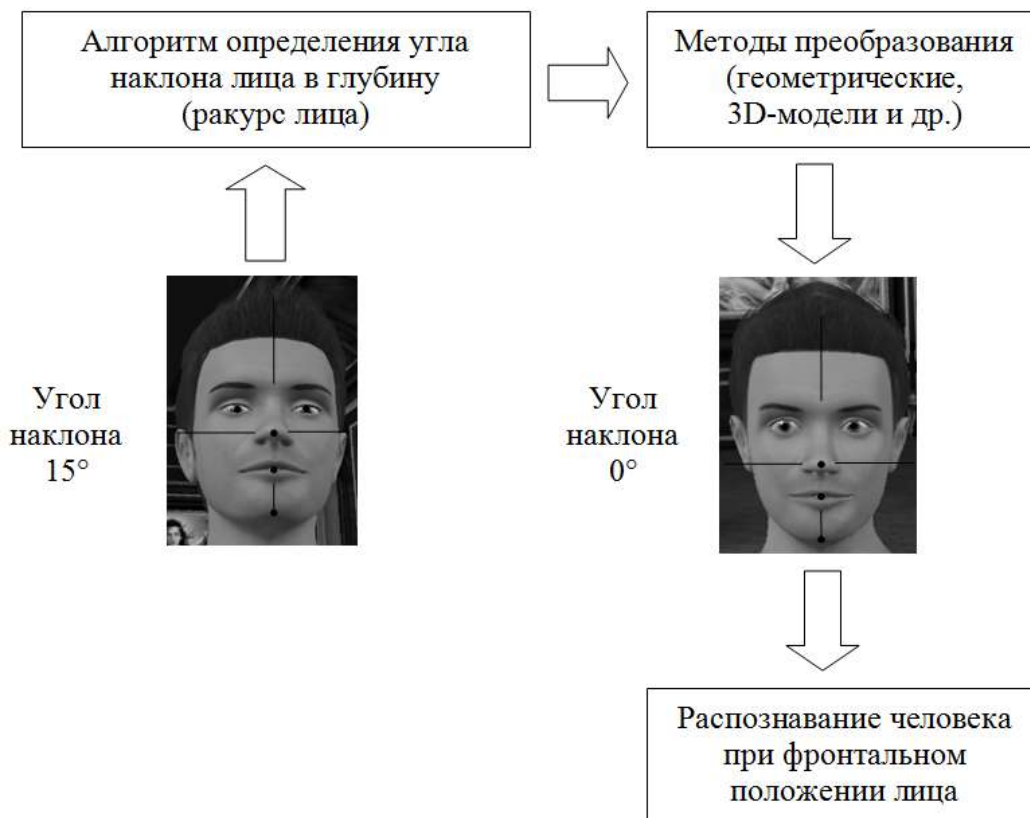


Рис. 3. Распознавание человека при ракурсе лица, отличном от фронтального

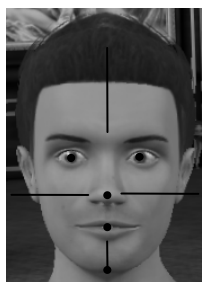


Рис. 4. Опорные точки для определения угла наклона лица

проводились для случаев поворота лица в глубину в диапазоне от 0 до 45 градусов (табл. 1).

В исследовании используются треугольники  $ABC$ ,  $ABD$  и  $ABE$  (рис. 5), но для метода определения наклона лица будет выбран только один, при котором вычисления будут как можно менее трудоемкими.

Из курса геометрии известно, что площадь треугольника по заданным координатам его вершин  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$ ,  $C(x_3, y_3)$  рассчитывается по следующей формуле

$$S_{\Delta} = \left| \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}{2} \right|.$$

Таблица 1

Лицо под разными углами наклона

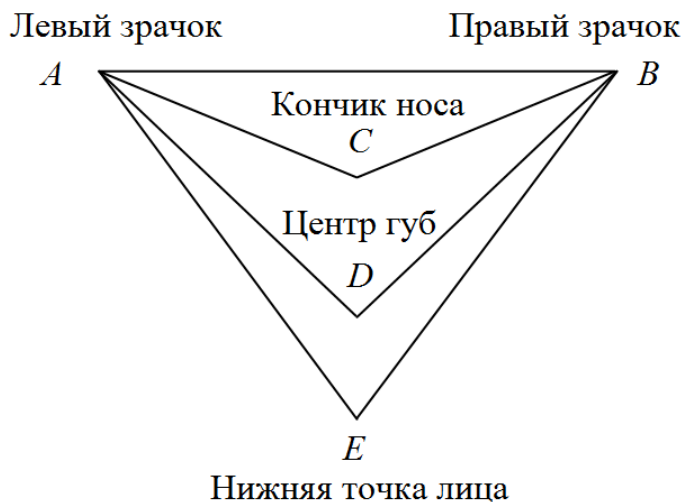
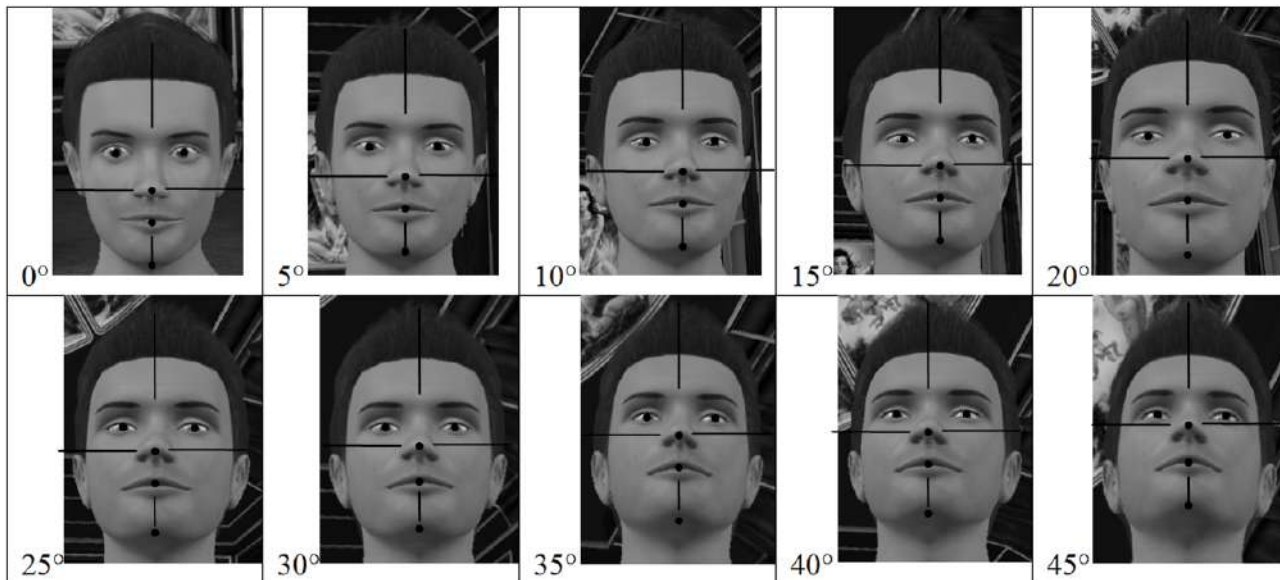


Рис. 5. Треугольники, используемые в алгоритме определения наклона лица

Если обозначить площадь треугольника  $ABC$  как  $S_{ABC}$ , а площадь проекции этого треугольника при наклоне лица как  $S_{\alpha}$ , то они будут связаны соотношением  $S_{\alpha} = S_{ABC} \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол наклона лица. Отсюда следует, что невозможно определить угол наклона лица, зная только площадь треугольников  $ABC$ ,  $ABD$  и  $ABE$ , так как неизвестна максимальная площадь

каждого из них, или если точнее – площадь проекции этих треугольников при нулевом угле наклона лица. Поэтому, нужно воспользоваться дополнительными пропорциями лица, которые включают в себя соотношения между высотой элементов лица и их шириной. Для этого подойдут пропорции лица по Бамессу (рис. 6)



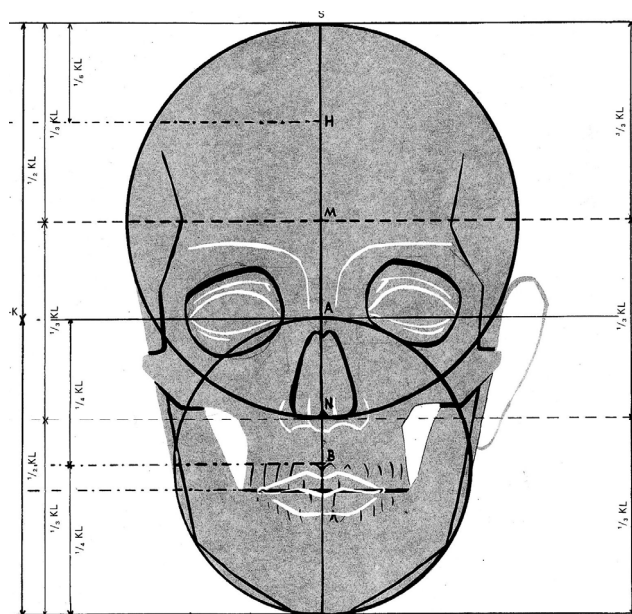


Рис. 6. Соотношения между частями лица по Бамессу

Из рис. 6 видно, что ширина лица на уровне верхней точки губ равна расстоянию от начала носа до конца подбородка, а расстояние от верхней точки головы до конца носа равно ширине лица на уровне середины этого расстояния (точки *M*). Используя эту информацию и информацию о расположении контрольных точек на рис. 5 можно составить общую модель лица, пригодную для вычисления угла его наклона (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что высота треугольника *ABE* – это диаметр нижней окружности при условии, если лицо имеет нулевой угол наклона, а для треугольников *ABC* и *ABD* не прослеживается никаких очевидных зависимостей между их высотой и шириной лица. Поэтому в дальнейших вычислениях будет использован только треугольник *ABE*. Если угол наклона этого треугольника отличный от нулевого, то проекция нижней окружности превращается в эллипс и первоначальный диаметр нижней окружности сохраняет свою длину только на уровне верхней точки губ, проходя через нее горизонтально. Пускай этот диаметр известен и имеет длину *d*, а точка *E* имеет координаты  $(x_5, y_5)$ . Тогда площадь треугольника *ABE* будет следующей:

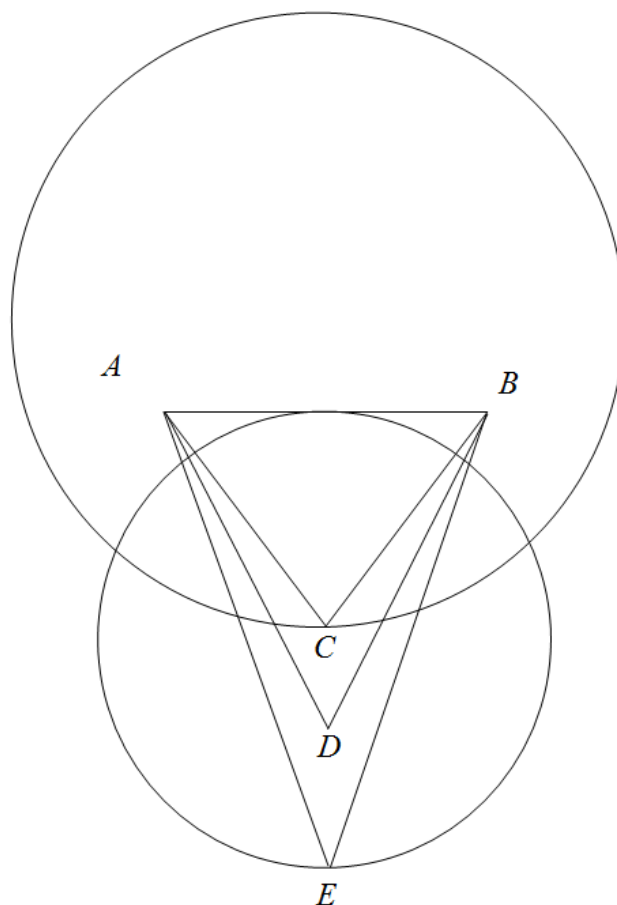


Рис. 7. Геометрическая модель лица для вычисления угла его наклона

$$S_{ABE} = \left| \frac{(x_2 - x_1)(y_5 - y_1) - (x_5 - x_1)(y_2 - y_1)}{2} \right|.$$

С другой стороны  $S_{ABE} = \frac{1}{2} ah$ , где *a* – длина основы треугольника *ABE*, а *h* – его высота. Отсюда получается, что

$$\begin{aligned} \left| \frac{(x_2 - x_1)(y_5 - y_1) - (x_5 - x_1)(y_2 - y_1)}{2} \right| &= \frac{1}{2} |AB| h \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \left| \frac{(x_2 - x_1)(y_5 - y_1) - (x_5 - x_1)(y_2 - y_1)}{2} \right| &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2}((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)h \Rightarrow \\ \Rightarrow h &= \frac{|(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)|}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \end{aligned}$$

Так как  $h = d \cos \alpha$ , то

$$\alpha = \arccos \left( \frac{|(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)|}{d((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)} \right).$$

Но лицо может быть наклонено не только на положительные углы, но и на отрицательные, поэтому в последней формуле модуль нужно опустить. В результате для вычисления угла наклона получим следующую формулу

$$\alpha = \arccos \left( \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}{d((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)} \right).$$

что и будет ответом на поставленную задачу. Имея угол наклона лица, появляется возможность частично восстанавливать изображение лица в профиль, что

может быть полезным при поиске человека по лицу в большой базе данных или при видеосъемке в реальном времени, когда лицо в основном не находится во фронтальном положении.

**Выводы.** В данной статье разработан метод определения угла наклона лица в глубину по его фотографии, что безусловно позволит повысить вероятность правильной идентификации личности за счет геометрических преобразований наклоненного изображения в его фронтальный вид. В проанализированных литературных источниках по распознаванию изображений лиц не учитывается наклон лица в глубину. В них изображение лица обычно имеет фронтальное положение или слегка наклоненное, что почти никак не сказывается на распознавании. Но в реальных условиях лицо почти никогда не бывает расположено параллельно к объективу фотоаппарата или видеокамеры, что отрицательно сказывается на распознавании, но поправимо с использованием разработанного в данной статье метода.

### Список литературы

1. Perkins C, Fricke T. Wavelets // Department of Electrical Engineering University of California at Berkeley. - 2000, - 18 P. Wiskott L., Fellous J.M., Kruger N., Von der Malsburg C. Face Recognition by Elastic Bunch Graph Matching // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. - 1997. - vol.19. - No7. - PP. 775-779. Potzsch M., Kruger N., Von der Malsburg C Improving object recognition by transforming Gabor filter responses // Network: Computation in Neural Systems. - 1996. - vol.7. - No2. - PP.341-347. С. Каратеев Исследование точности оценки углов поворота лица по монокулярному цифровому изображению / Каратеев С., Князь В., Визильтер Ю., Бекетова И., Желтов С. - ГосНИИАС, 2009.
2. Kruger N. An Algorithm for the Learning of Weights in Discrimination Functions Using a Priori Constraints // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. - 1997. - vol. 19. - PP. 764-768. Wurtz R. P. Object Recognition Robust Under Translations, Deformations, and Changes in Background // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. - 1997. - vol.19. - PP. 769-775.