

УДК 57.087.1

Разработка и исследование метода оценки ракурса по координатам контрольных точек 2D изображения лица

Кумов В. С.^{1,*}, Самородов А. В.¹

* slava.kumov@rambler.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе построена модель взаимосвязи координат контрольных точек (КТ) лица и значений углов ракурса. С использованием модели лица CANDIDE-3 исследована зависимость погрешностей оценки углов ракурса от индивидуальной формы лица, мимических изменений, числа КТ и погрешности их локализации. Полученные в результате моделирования значения погрешностей свидетельствуют о том, что геометрический метод оценки углов ракурса лица на 2D изображениях, основанный на наборе из 28-ми КТ, обеспечивает надежное определение углов ракурса в широком диапазоне изменений формы лица, мимических изменений и значительных погрешностей локализации КТ на изображении.

Ключевые слова: ракурс лица, изображение лица, контрольные точки

Введение

При контроле качества фотографий, идентификации личности, определении изменения мимики, проведении антропометрических исследований требуется определение ракурса лица. Ракурс лица задается тремя углами: поворота (вращение относительно вертикальной оси), наклона (вращение относительно горизонтальной оси) и отклонения (вращение в плоскости изображения) [1]. При этом угол отклонения может быть легко определен по изображению лица по положению глаз.

В настоящее время выделяют восемь основных методов оценки ракурса лица (углов наклона и поворота) по двумерному изображению [2]: методы, использующие шаблоны внешнего вида; методы детекторных массивов; методы нелинейной регрессии; методы множественных вложений; методы, использующие деформируемые модели; геометрические методы; методы слежения; гибридные методы.

При условии достаточного для локализации контрольных точек (КТ) лица разрешения изображения, среди всех перечисленных методов наибольшими преимуществами обладают геометрические методы. Они характеризуются максимальным быстродействием и независимостью от текстурных особенностей области лица на изображении [2]. Однако в работах, использующих геометрические методы (например, [3, 4, 5]), отсутствует инфор-

мация о зависимости погрешности оценки углов ракурса от таких факторов, как индивидуальные особенности формы лица, мимические изменения, число используемых КТ и погрешность их локализации, что не позволяет определить предельные возможности данных методов и прогнозировать результаты их использования в конкретной задаче.

1. Построение модели взаимосвязи координат КТ лица и значений углов ракурса

Геометрические методы оценки ракурса предполагают построение модели взаимосвязи между координатами КТ лица и значениями углов ракурса. Для построения данной модели целесообразно вначале перейти от координат используемого набора КТ к вектору признаков небольшой размерности, элементы которого содержат максимальный объем информации о ракурсе, а затем построить модель взаимосвязи элементов данного вектора признаков и углов ракурса [2, 4].

Для решения указанных задач была использована параметрическая модель лица CANDIDE-3 (рис.1), которая представляет собой координаты 113 КТ для «среднего» лица и правила изменения данных координат в зависимости от изменения параметров модели. Параметрами модели являются углы ракурса, 14 единиц формы (ЕФ) лица (shape unit) и 65 анимационных единиц (АЕ) лица (animation unit)[6].

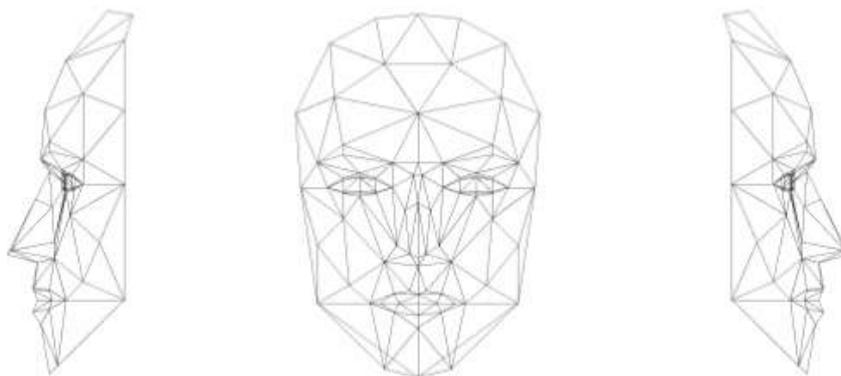


Рис. 1. Параметрическая модель лица CANDIDE-3 [6]

Для формирования вектора признаков использовался метод главных компонент (МГК). В качестве векторов данных использовались координаты 113 КТ в плоскости изображения лица, рассчитанные для «средней» модели лица при разных сочетаниях углов наклона и поворота. Диапазон изменения углов ракурса был выбран согласно антропометрическим характеристикам здоровых людей [7]; для углов поворота головы: от -75° до 75° с шагом 5° , углов наклона: от -60° до 60° с шагом 5° (775 различных сочетаний углов наклона и поворота).

В результате применения МГК было установлено, что только пять первых собственных чисел ковариационной матрицы векторов данных являются значимыми (таблица 1). Таким образом, вектор признаков для оценки ракурса должен состоять из пяти элементов.

Таблица 1. Собственные числа λ ковариационной матрицы вектора данных координат 113 КТ

№	1	2	3	4	5	6	7	...	226
λ	2,74	0,85	0,53	0,46	0,32	$2,26 \cdot 10^{-28}$	$1,55 \cdot 10^{-28}$...	$2,31 \cdot 10^{-34}$

Переход в пространство признаков Y осуществляется по формуле (1):

$$Y = \Phi^T (X - M_X), \quad (1)$$

где X – вектор данных, размерностью $[226 \times 1]$, содержащий координаты 113 КТ в плоскости изображения лица; M_X – среднее значение векторов данных (соответствует координатам КТ для фронтального положения лица); Φ – матрица, размерностью $[226 \times 5]$, столбцы которой представляют собой собственные вектора ковариационной матрицы векторов данных, соответствующие значимым собственным числам.

Следующим этапом построения модели взаимосвязи координат КТ лица и значений углов ракурса является построение регрессионных зависимостей углов ракурса и элементов полученного вектора признаков Y . Для этого в настоящей работе был использован метод нелинейной множественной регрессии [8].

Для определения вида нелинейности были построены зависимости углов ракурса и значений компонент вектора признаков (рис.2, 3).

Анализ приведенных зависимостей показал, что искомая регрессионная модель может быть представлена полиномами второго порядка:

$$\varphi = a_0 + a_1 y_1 + a_2 y_1^2 + a_3 y_2 + a_4 y_2^2 + a_5 y_3 + a_6 y_3^2 + a_7 y_4 + a_8 y_4^2 + a_9 y_5 + a_{10} y_5^2; \quad (2)$$

$$\psi = b_0 + b_1 y_1 + b_2 y_1^2 + b_3 y_2 + b_4 y_2^2 + b_5 y_3 + b_6 y_3^2 + b_7 y_4 + b_8 y_4^2 + b_9 y_5 + b_{10} y_5^2, \quad (3)$$

где φ и ψ – углы наклона и поворота модели лица; y_i – i -й элемент вектора признаков Y .

Определение коэффициентов a_i и b_i производилось с помощью метода наименьших квадратов. Результаты представлены в таблице 2.

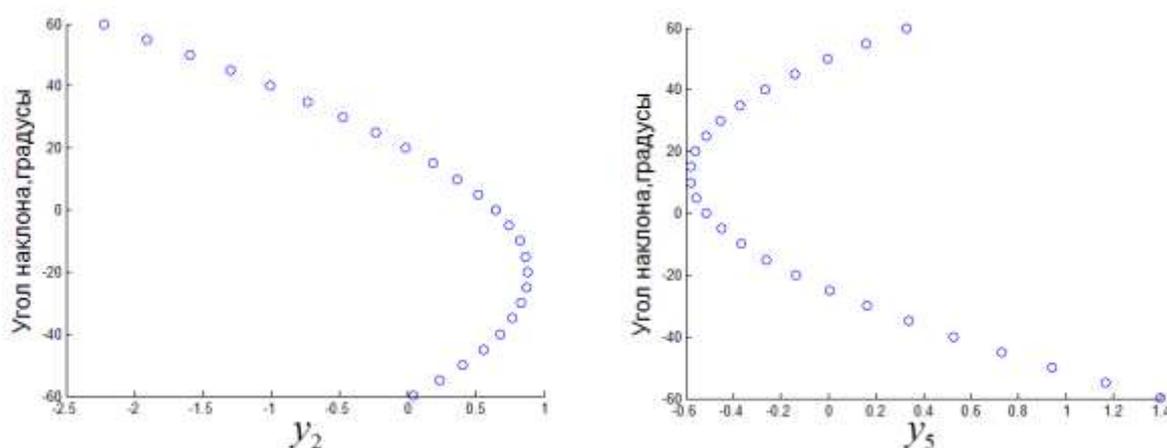


Рис. 2. Примеры зависимостей угла наклона от компонент вектора признаков

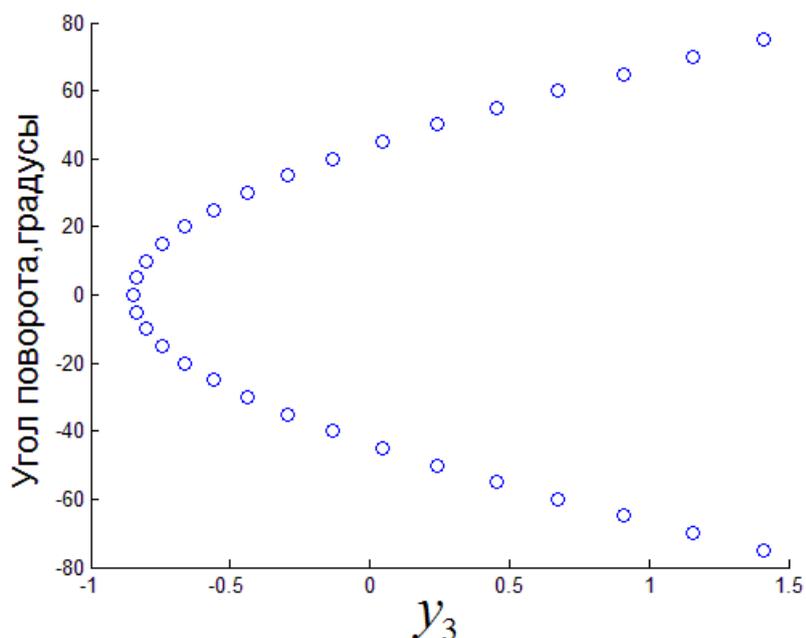


Рис. 3. Пример зависимости угла поворота от компоненты вектора признаков

Таблица 2. Значения коэффициентов множественной регрессии для моделей (2) и (3)

i	0	1	2	3	4	5
a_i	-0,01	$-6 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-14}$	-0,5	0,03	$9 \cdot 10^{-14}$
b_i	0,8	$-7 \cdot 10^{-17}$	$7 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-15}$	$4 \cdot 10^{-16}$	-0,6

i	6	7	8	9	10
a_i	$2 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-13}$	-0,7	-0,04
b_i	-0,17	$1 \cdot 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$-7 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-15}$

Так как лишь пять коэффициентов a_i и три коэффициента b_i оказались значимыми, была произведена соответствующая коррекция моделей (2) и (3):

$$\varphi = a_0 + a_3 y_2 + a_4 y_2^2 + a_9 y_5 + a_{10} y_5^2; \quad (4)$$

$$\psi = b_0 + b_5 y_3 + b_6 y_3^2. \quad (5)$$

Результаты повторного расчета коэффициентов моделей (4, 5) не отличаются от соответствующих значений, приведенных в таблице 2.

Уравнения (1, 4, 5) задают модель взаимосвязи координат КТ лица и значений углов ракурса. Максимальные и средние абсолютные погрешности восстановления углов ракурса с использованием данной модели для всех 775-ти сочетаний углов наклона и поворота приведены в таблице 3. В качестве допустимой погрешности восстановления углов ракурса целесообразно использовать значение 5 градусов, которое задается стандартом в качестве допустимого отклонения углов ракурса от нулевых значений для фронтальных изображений лица [1].

Таблица 3. Погрешности восстановления углов наклона и поворота для «средней» модели лица

Угол ракурса	Диапазон изменения углов ракурса, градусы	Максимальная абсолютная погрешность, градусы	Средняя абсолютная погрешность, градусы
Угол наклона	от -60 до +60	0,23	0,11
	от -45 до +45	0,04	0,02
	от -20 до +20	0,007	0,004
Угол поворота	от -75 до +75	8	2,1
	от -45 до +45	5	1,5
	от -20 до +20	2,1	0,8

Результаты показывают, что уменьшение диапазона возможного изменения углов ракурса приводит к существенному уменьшению погрешности их восстановления. Для максимального диапазона изменения углов ракурса средняя абсолютная погрешность восстановления углов наклона составила около 0,1 градуса, углов поворота – 2,1 градуса. Таким образом, по координатам КТ лица, в пределе, возможно определение ракурса с высокой точностью.

2. Исследование влияния индивидуальной формы лица, мимических изменений, числа КТ и погрешности их локализации на точность оценки углов ракурса

Полученные выше результаты свидетельствуют о возможности восстановления углов ракурса с высокой точностью по координатам КТ для «среднего» лица, задаваемого «средней» моделью лица CANDIDE-3. В связи с этим, необходимо определить, как влияет индивидуальная форма лица, мимика и погрешность локализации КТ на точность оценки углов ракурса. Кроме набора из 113 КТ, исследования были проведены также на наборах, содержащих 28 и 5 КТ (таблица 4). Данные наборы содержат наиболее важные антропометрические точки и сформированы с учетом возможностей существующих программных комплексов по автоматическому их поиску на изображении лица [4, 9, 10]. Набор из 28 КТ аналогичен использованному в работе [5]. Для каждого из указанных наборов КТ были построены модели взаимосвязи координат КТ и значений углов ракурса, аналогичные (1), (4) и (5).

Таблица 4. Идентификаторы и наименования используемых 28 КТ и 5 КТ (отмечены звездочкой)

Идентификатор	Наименование КТ
23	Внутренний угол правого глаза
20*	Внешний угол правого глаза
19	Середина верхней границы правого глаза
24	Середина нижней границы правого глаза
56	Внутренний угол левого глаза
53*	Внешний угол левого глаза
52	Середина верхней границы левого глаза
57	Середина нижней границы левого глаза
31*	Правый угол внешнего контура губ
64*	Левый угол внешнего контура губ
66	Угол верхнего контура губы, левее середины
7	Середина верхнего контура губы
33	Угол верхнего контура губы, правее середины
86	Середина нижнего контура губы между её центром и левым углом
8	Середина нижнего контура губы
85	Середина нижнего контура губы между её центром и правым углом
48	Внешний угол левой брови
51	Середина левой брови
50	Внутренний угол левой брови
15	Внешний угол правой брови
18	Середина правой брови
17	Внутренний угол правой брови
58	Верхняя точка левого крыла носа
25	Верхняя точка правого крыла носа
69	Нижняя точка носа
38*	Вершина носа
112	Нижний левый край левого крыла носа
111	Нижний правый край правого крыла носа

Изменению формы лица соответствует изменение параметров ЕФ модели CANDIDE-3. В таблице 5 приведены максимальные и средние абсолютные погрешности восстановления углов наклона и поворота для разных наборов КТ после изменения ЕФ. Каждая строка таблицы показывает значения погрешностей при изменении одной указанной ЕФ в максимально возможном диапазоне.

Как следует из полученных данных, использование для оценки углов ракурса полного набора КТ модели CANDIDE-3 приводит к существенной зависимости погрешности оценки от ряда ЕФ. В случае использования наборов из 28 и 5 КТ, изменение ЕФ модели лица незначительно влияет на погрешность восстановления углов ракурса; средние абсолютные погрешности восстановления углов наклона и поворота не превышают 5°.

Таблица 5. Погрешности восстановления углов ракурса лица в зависимости от изменения ЕФ модели лица и числа КТ (k)

Название ЕФ лица (Shape Unit)	Средняя / максимальная абсолютные погрешности для угла наклона, градусы			Средняя / максимальная абсолютные погрешности для угла поворота, градусы		
	$k = 113$	$k = 28$	$k = 5$	$k = 113$	$k = 28$	$k = 5$
«Средняя» форма лица	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Head height	3,6 / 5	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Eye brows vertical position	1,4 / 1,8	1,9 / 5	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Eyes vertical position	0,6 / 1,1	0,17 / 0,4	2,7 / 7	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Eyes, width	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,5 / 6	2,3 / 7	4 / 8
Eyes, height	0,36 / 0,6	0,21 / 0,64	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Eye separation distance	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	11 / 19	3,6 / 7	4 / 8
Cheeks z	0,25 / 0,7	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Nose z-extension	0,8 / 1,6	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Nose vertical position	4 / 4,5	0,7 / 2	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Nose, pointing up	0,6 / 0,8	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Mouth vertical position	0,7 / 1,3	0,5 / 2,4	2,4 / 7	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Mouth width	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,6 / 6	2,3 / 8	2,9 / 6
Eyes vertical difference	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	3,6 / 10	3,9 / 8	5 / 13
Chin width	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,3 / 7	2,1 / 8	2,1 / 8

В таблице 6 приведены максимальные и средние абсолютные погрешности восстановления углов наклона и поворота для разных наборов КТ после изменения параметров основных АЕ модели CANDIDE-3. Каждая строка таблицы показывает значения погрешностей при изменении одной указанной АЕ в максимально возможном диапазоне.

Таблица 6. Погрешности восстановления углов ракурса лица в зависимости от изменения АЕ модели лица и числа КТ (k)

Название АЕ лица (Animation Unit)	Средняя / максимальная абсолютные погрешности для угла наклона, градусы			Средняя / максимальная абсолютные погрешности для угла поворота, градусы		
	$k = 113$	$k = 28$	$k = 5$	$k = 113$	$k = 28$	$k = 5$
«Средняя» форма лица	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Upper lip raise	0,4 / 1,4	1,3 / 4	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Jaw drop	1,5 / 4	0,3 / 0,8	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Lip stretcher	1,4 / 3,5	1,7 / 4	7 / 12	2,2 / 8	2,3 / 7	2,7 / 7
Brow lowerer	0,3 / 1,2	3 / 7	0,11 / 0,23	2,1 / 9	2,1 / 11	2,1 / 8
Lip corner depressor	0,4 / 0,9	1,4 / 5	3,5 / 11	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Outer brow raiser	0,6 / 1,9	0,5 / 1,2	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Eyes closed	0,12 / 0,5	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Lid tightener	0,12 / 0,4	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Nose wrinkler	0,15 / 0,7	0,12 / 0,5	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Lip presser	0,11 / 0,27	0,22 / 0,8	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
Upper lid raiser	0,11 / 0,29	0,11 / 0,3	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8

Как следует из полученных данных, в случае использования наборов из 113 и 28 КТ, изменение АЕ модели лица незначительно влияет на погрешность восстановления углов ракурса; средние абсолютные погрешности восстановления углов наклона и поворота не превышают 5°.

При использовании алгоритмов автоматической локализации КТ лица в определяемых координатах неизбежно присутствует погрешность. В таблице 7 приведены максимальные и средние абсолютные погрешности восстановления углов наклона и поворота в зависимости от СКО приведенной к расстоянию между центрами глаз погрешности локализации КТ. Каждая строка таблицы показывает значения погрешностей оценки углов ракурса при добавлении к координатам всех КТ случайных значений, полученных выборкой из нормального распределения с нулевым средним значением и указанного в таблице СКО приведенной погрешности.

Таблица 7. Погрешности восстановления углов ракурса лица в зависимости от погрешности локализации КТ и их числа КТ (k)

СКО приведенной погрешности локализации КТ	Средняя / максимальная абсолютные погрешности для угла наклона, градусы			Средняя / максимальная абсолютные погрешности для угла поворота, градусы		
	$k = 113$	$k = 28$	$k = 5$	$k = 113$	$k = 28$	$k = 5$
0	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	0,11 / 0,23	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
0,001	0,11 / 0,24	0,11 / 0,27	0,13 / 0,5	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 8
0,01	0,14 / 0,53	0,3 / 1,1	0,4 / 1,2	2,1 / 8	2,1 / 8	2,1 / 9
0,02	0,25 / 1,1	0,5 / 0,8	1,3 / 4	2,2 / 8	2,3 / 8	3 / 10
0,03	0,6 / 1,8	1,2 / 3	9 / 18	2,2 / 8	2,3 / 7	2,3 / 9
0,04	0,25 / 0,7	0,6 / 2,4	6 / 21	2,4 / 7	2,8 / 9	2,1 / 10
0,05	0,23 / 0,8	0,8 / 2,4	4 / 16	2,1 / 9	3 / 10	4 / 7

Как следует из полученных данных, в случае использования наборов из 113 и 28 КТ, увеличение СКО приведенной погрешности до значений 0,05 (что, например, при расстоянии между центрами глаз лица в 60 пикселей соответствует диапазону значений погрешности, определяемому 97,5 и 2,5 %-ми точками ее распределения, ± 6 пикселей), слабо влияет на погрешность восстановления углов ракурса: средние погрешности восстановления не превышают 5°.

Заключение

В данной работе построена модель взаимосвязи координат КТ лица и значений углов ракурса и определена зависимость погрешностей оценки углов ракурса от индивидуальной формы лица, мимических изменений, числа КТ и погрешности их локализации.

В результате проведенного моделирования были получены следующие результаты:

- средняя погрешность восстановления угла наклона составила около 0,1 градуса, угла поворота – 2,1 градуса для «средней» модели лица CANDIDE-3;

- при использовании набора из 28-ми КТ изменение ЕФ и АЕ модели лица, а также значительная погрешность локализации КТ не приводят к заметному увеличению погрешности восстановления углов ракурса;
- наложение ограничений на допустимый диапазон изменения углов ракурса приводит к существенному снижению погрешности их восстановления.

Таким образом, геометрический метод оценки углов ракурса лица на 2D изображениях, основанный на моделях (1, 4, 5) и наборе из 28-ми КТ, обеспечивает надежное определение углов ракурса в широком диапазоне изменений формы лица, мимических изменений и значительных погрешностей локализации КТ на изображении.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-5-2006. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 5. Данные изображения лица. М.: Стандартинформ, 2006. 68 с.
2. Murphy-Chutorian E., Trivedi M.M. Head pose estimation in computer vision: a survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2009. Vol. 31, no. 4. P. 607-626. DOI: [10.1109/TPAMI.2008.106](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.106)
3. Wang J-G., Sung E. EM enhancement of 3D head pose estimated by point at infinity // Image and Vision Computing. 2007. Vol. 25, no. 12. P. 1864-1874. DOI: [10.1016/j.imavis.2005.12.017](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2005.12.017)
4. Бобе А.С., Жиденко М.В., Прояев П.О. Система автоматического контроля доступа на основе анализа изображений лица // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 1. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/533152.html> (дата обращения 01.12.2015).
5. Петрук В.И., Прояев П.О. Исследование алгоритма определения ракурса лица по 2D изображению // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 8. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/608607.html> (дата обращения 01.12.2015).
6. Ahlberg J. CANDIDE-3 - an updated parameterized face. Report No. LiTH-ISY-R-2326. Dept. of Electrical Engineering, Linkoping University, Linkoping, Sweden, 2001. 16 p.
7. Ferrario V.F., Sforza C., Serrao G., Grassi G., Mossi E. Active range of motion of the head and cervical spine: a three-dimensional investigation in healthy young adults // Journal of Orthopaedic Research. 2002. Vol. 20, no. 1. P. 122-129. DOI: [10.1016/S0736-0266\(01\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0736-0266(01)00079-1)
8. Аугамбаев М., Иванов А.З., Терехов Ю.И. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента / под ред. Г.М. Рудакова. Ташкент: Укитувчи, 2004. 336 с.

9. Поставнин В.И., Буданов С.А., Черкашина И.И. Применение компьютерных технологий при производстве портретной экспертизы: методические рекомендации. М.: ЭКЦ МВД России, 2006. 24 с.
10. Open computer vision library // Intel: website. Режим доступа: <http://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html> (дата обращения 01.12.2015).

Development and Study of a Head Pose Estimate Method Based on Landmark Point Co-ordinates of 2D Facial Image

V.S. Kumov^{1,*}, A.V. Samorodov¹

*slava.kumov@rambler.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: head pose, facial image, facial landmarks

When providing a photo quality control and person's identity, defining the mimic changes, and conducting the anthropometrical researches a head pose estimate is required. If an image resolution is sufficient for localization of facial landmarks (FL) the most advantageous among the head pose estimate methods are geometrical ones.

The paper presents a model built to show an interrelation between the coordinates of facial landmarks and the head pose angles. To create this model using analysis of principal components was carried out a transition from the coordinates of a set of the landmarks to the vector of small-sized features, the elements of which contain the maximum volume of information. Then, using a regression analysis a model of interrelation between the elements of this vector of features and the head pose angles was built. To solve the abovementioned tasks, was used the parametrical model of a face CANDIDE-3. It was found that the feature vector to estimate the head pose should consist of five elements.

In the works using geometrical methods there is no information about the dependencies of pose angle errors on the individual shape of the face, the mimic changes, the number of facial landmarks and their localization error that does not allow to define the limiting possibilities of these methods and to predict the results of their use in a specific task. This work using the model of a face CANDIDE-3 examines the dependencies of the pose angle errors on the individual shape of the face, the mimic changes, the number of facial landmarks and their localization error. In addition to a set of 113 landmarks, the conducted research activities used also the sets of 28 and 5 landmarks. These sets contain the most important anthropometrical facial landmarks and are created taking into account a capacity of the software packages available for their automatic facial image search.

Results of modeling have shown that it is expedient to use a set of 28 facial landmarks. Thus, in a wide range of shape and mimic changes as well as with significant localization errors of facial landmarks on the image the average error of defining pose angles does not exceed 5°.

References

1. GOST R ISO/MEK 19794-5-2006. *Avtomaticheskaya identifikatsiya. Identifikatsiya biometricheskaya. Formaty obmena biometricheskimi dannymi. Chast' 5. Dannye izobrazheniya litsa* [State Standard of RF ISO / IEC 19794-5-2006. Automatic identification. Biometrics. Biometric data interchange formats. Part 5. Face image data]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 68 p. (in Russian).
2. Murphy-Chutorian E., Trivedi M.M. Head pose estimation in computer vision: a survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 607-626. DOI: [10.1109/TPAMI.2008.106](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.106)
3. Wang J-G., Sung E. EM enhancement of 3D head pose estimated by point at infinity. *Image and Vision Computing*, 2007, vol. 25, no. 12, pp. 1864-1874. DOI: [10.1016/j.imavis.2005.12.017](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2005.12.017)
4. Bobe A.S., Zhidenko M.V., Proyaev P.O. System of automated access control based on analysis of facial images. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 1. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/533152.html> , accessed 01.12.2015. (in Russian).
5. Petruk V.I., Proyaev P.O. Research of algorithm for determining of angle of face using 2D image. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 8. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/608607.html> , accessed 01.12.2015. (in Russian).
6. Ahlberg J. *CANDIDE-3 - an updated parameterized face. Report No. LiTH-ISKY-R-2326*. Dept. of Electrical Engineering, Linkoping University, Linkoping, Sweden, 2001. 16 p.
7. Ferrario V.F., Sforza C., Serrao G., Grassi G., Mossi E. Active range of motion of the head and cervical spine: a three-dimensional investigation in healthy young adults. *Journal of Orthopaedic Research*, 2002, vol. 20, no. 1, pp. 122-129. DOI: [10.1016/S0736-0266\(01\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0736-0266(01)00079-1)
8. Augambaev M., Ivanov A.Z., Terekhov Yu.I. *Osnovy planirovaniya nauchno-issledovatel'skogo eksperimenta* [Fundamentals of planning of research experiment]. Tashkent, Ukituvchi Publ., 2004. 336 p. (in Russian).
9. Postavnin V.I., Budanov S.A., Cherkashina I.I. *Primenenie komp'yuternykh tekhnologii pri proizvodstve portretnoi ekspertizy: metodicheskie rekomendatsii* [Employment of computer technologies in the production of portrait expertise: guidelines]. Moscow, Publ. of Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of RF, 2006. 24 p. (in Russian).
10. *Open computer vision library*. Intel: website. Available at: <http://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html> , accessed 01.12.2015.