

ОЦЕНКА АСИММЕТРИИ ЛИЦА ПО ТРЕХМЕРНОМУ ПОРТРЕТУ

© Дышкант Н.Ф., Местецкий Л.М.

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА

ФАКУЛЬТЕТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И КИБЕРНЕТИКИ

ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ, МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА, 2-й УЧЕБНЫЙ КОРПУС, Г. МОСКВА, 119992, РОССИЯ

E-MAIL: nfd3001@gmail.com, L.mest@ru.net

Abstract. The estimate for the assymetry of a face of a man by its 3D model is proposed in the paper. It contains the detailed algorithm constructed for this estimate calculation. The used face modes are obtained by a methof of 3D scanning and are represented in the form of points cloud. The problem of detection of a face symmentry plane is solved. The algorithm was tested on 200 samples of face models. This testing shows the stability of the proposed estimate.

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие быстрого развития технологий трехмерного сканирования объектов появилась необходимость в умении анализировать полученные поверхности и сравнивать их между собой. В данной работе *предлагается оценка асимметрии человеческого лица по его трехмерной модели.*

Известно, что лицо человека обладает лишь *приближенной* зеркальной (двусторонней) симметрией относительно плоскости, делящей его на правую и левую половины. Предлагается мера, позволяющая оценивать степень такого приближения, т.е. *степень асимметрии.*

Задача оценки асимметрии лица возникает при профилактике аномалий зрения у детей (см. [1]), в медицинских и психологических исследованиях, профотборе и в других приложениях. *Изучение работ, посвященных рассматриваемой проблеме, показало, что тремя основными направлениями, в которых пытаются использовать асимметрию лица в последнее время, являются:*

1. *идентификация личности — распознавание по лицу ([2]);*
2. *распознавание эмоций ([3], [4]);*
3. *определения пола ([5]).*

Асимметрия объекта входит в его структурное описание, и оценка асимметрии не может быть получена с помощью каких-либо локальных критериев. Для получения такой оценки необходимо анализировать объект целиком и, кроме того, уметь определять *плоскость симметрии.* В работе показано, какое влияние оказывает определение плоскости симметрии на оценку, и *предложен алгоритм нахождения плоскости симметрии.* При этом решается экстремальная задача: делается предположение о том, что наиболее точно найденной плоскости соответствует наименьшая оценка.

В работе предлагается метрика для сравнения трехмерных моделей и алгоритм ее вычисления. При оценивании асимметрии лица производится сравнение исходной модели и модели, отраженной относительно плоскости симметрии.

В указанных выше работах ([2]–[5]) используются модели, приведенные к *регулярным* сеткам: поэтому в качестве оценки асимметрии в них предлагается вычислять сумму или среднее значение по всем разностям высот между исходной и отраженной моделями (левой и правой половинами модели). Рассматриваемые нами модели заданы на таких сетках, что точки, в которых известны значения поверхности лица, расположены несимметрично относительно плоскости симметрии модели. Такие сетки могут быть как регулярными, так и *нерегулярными*. Поэтому в данной задаче требуется введение более сложной оценки для вычисления количественного значения асимметрии.

Поверхность лица, полученная с помощью 3D сканирования, описывается в виде облака точек и является однолистной функцией двух переменных, заданной на некотором дискретном множестве — нерегулярной сетке. Сравнение двух моделей лиц сводится к сравнению соответствующих им функций F_1 и F_2 , заданных на разных нерегулярных сетках G_1 и G_2 . Основные этапы алгоритма сравнения таких функций приводились авторами в [6]; в основе предложенного алгоритма лежит идея *восполнения* значений каждой из них в узлах другой сетки через построение триангуляций Делоне и локализацию их друг в друге.

Целями данной работы являются: введение оценки асимметрии человеческого лица по его трехмерной модели и разработка алгоритма ее вычисления, обладающего высокой вычислительной эффективностью.

Авторы выражают благодарность сотрудникам «Artec Group company» (<http://www.artec-group.com>) за предоставленные модели лиц.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 08-01-00670, 08-07-00305-а).

1. БАЗА ДАННЫХ 3D МОДЕЛЕЙ

Трехмерные модели, которые мы использовали в данном исследовании, были получены с помощью 3D камеры, разработанной в «Artec Group company». Была собрана база, содержащая 191 модель лиц 8 разных людей. При этом съемка анфас происходила при нейтральном выражении лиц снимающихся.

Каждая модель представлена набором точек заданных своими координатами (x, y, z) в пространстве. Координаты точек предоставлены с точностью до 10^{-6} в масштабе 1 : 1, т.е. соответствуют реальным размерам лица человека. Количество точек в моделях варьируется от 1 000 до 3 000, а в среднем по базе составляет 1 500–2 000.

В системе координат модель расположена (нормализована) таким образом, что кончик носа соответствует началу координат, ось Oz направлена вдоль оси визирования, а ось Oy проходит вдоль лица (см. рис. 1). При таком расположении плоскость Oyz можно считать плоскостью симметрии модели. Следует отметить, что описанное расположение является приближенным и может быть уточнено с помощью преобразований системы координат — малых сдвигов и поворотов на малые углы.

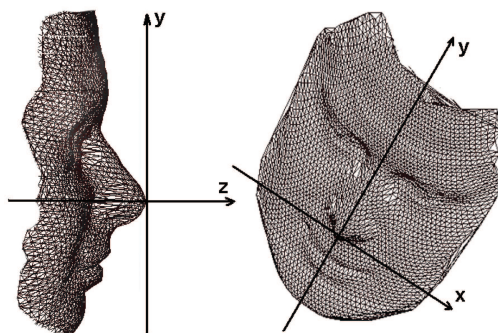


Рис. 1. Трехмерная модель лица

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поверхность лица, полученная методом трехмерного сканирования, представляет собой облако точек и может быть рассмотрена как однолистная функция двух переменных, заданная на некоторой нерегулярной сетке.

Определение 1. Нерегулярной двумерной (плоской) сеткой G называется конечное множество точек из пространства \mathbb{R}^2 :

$$G = \{(x^i, y^i) \in \mathbb{R}^2 \mid i = 1, \dots, N\}.$$

Приведем описание содержания математической задачи, решение которой будет использовано для оценки асимметрии модели. Пусть исходная маска задана функцией F_1 , а маска, полученная отражением исходной по отношению к плоскости Oyz — функцией F_2 . Сравнение двух моделей сводится к сравнению соответствующих им функций.

Пусть даны две нерегулярные двумерные сетки G_1 и G_2 :

$$G_1 = \{(x^i, y^i)\}_{i=1}^N, \quad G_2 = \{(-x^i, y^i)\}_{i=1}^N.$$

Пусть обе сетки заключены внутри некоторого общего прямоугольника R . Пусть в точках сетки G_1 задана функция F_1 , в точках сетки G_2 — функция F_2 . Таким образом, функции заданы наборами своих значений $\{f_1^i\}_{i=1}^N$, $\{f_2^i\}_{i=1}^N$ в соответствующих точках:

$$f_1^i = F_1(x^i, y^i), \quad f_2^i = F_2(-x^i, y^i).$$

Требуется разработать метод, позволяющий вычислять меру различия между двумя моделями в виде объема разности между ними, т.е. в следующем виде:

$$\iint_R |\hat{F}_1(x, y) - \hat{F}_2(x, y)| \mu(x, y) dx dy,$$

где \hat{F}_1 и \hat{F}_2 — непрерывные на R функции, аппроксимирующие функции F_1 и F_2 соответственно, а $\mu(x, y)$ — функция, определяющая вес различных фрагментов поверхности с точки зрения важности их сходства.

3. АЛГОРИТМЫ

Основные шаги предлагаемого подхода к решению задачи получения оценки асимметрии лица изображены на схеме (рис. 2).

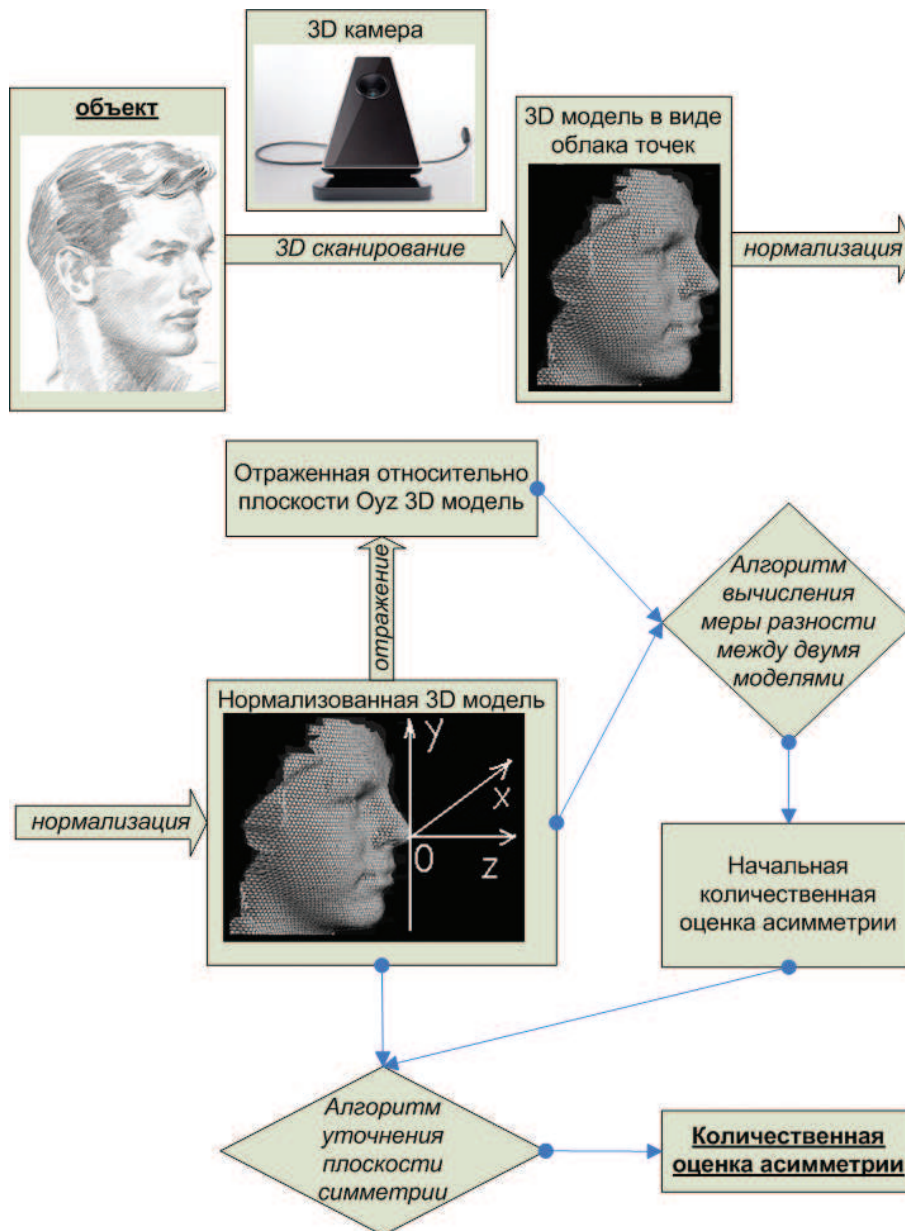


Рис. 2. Общая схема предлагаемого подхода

После нормализации модели в системе координат строится ее симметричное отражение относительно плоскости Oyz (см. рис. 3 — участки лица, на которых отраженная маска выше исходной, выделены более темным цветом).

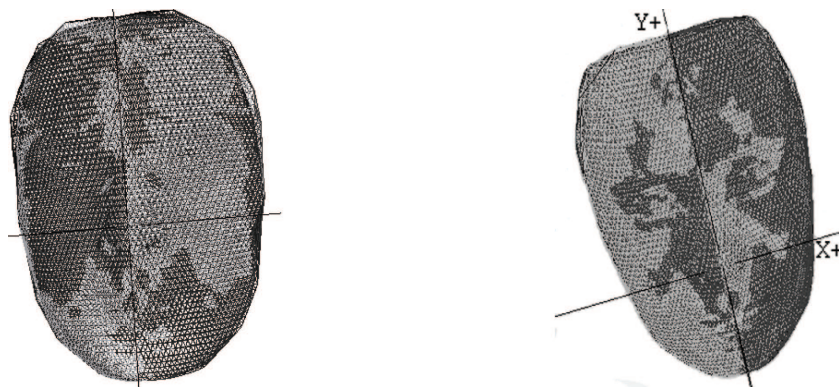


Рис. 3. Примеры разных исходных масок и их отражений относительно плоскостей симметрии

3.1. Получение начальной оценки асимметрии. Вначале на каждой из сеток G_1 и G_2 строится триангуляция Делоне. При этом используется алгоритм, описанный в [7] и [8], в основе которого лежит парадигма рекурсивной декомпозиции («разделяй и властвуй»): разделение исходного множества на два примерно равных подмножества, рекурсивное построение триангуляций этих подмножеств и слияние двух разделенных триангуляций. Вычислительная сложность данного алгоритма $O(N \log N)$.

После построения триангуляций следует этап локализации их друг в друге.

Локализовать точку Q в триангуляции Делоне T означает указать треугольник триангуляции, содержащий внутри себя эту точку. В тех случаях, когда точка Q совпадает с вершиной триангуляции или принадлежит одному из ее ребер, можно указать любой из инцидентных данной вершине или данному ребру треугольников. В рассматриваемой нами задаче точка Q , являющаяся вершиной одной триангуляции, локализуется в другой триангуляции T . Так как по условию обе триангуляции заключены в прямоугольник R , то точка Q не может заходить за границы R , и локализация всегда корректна.

Идея алгоритма, с помощью которого решается задача локализации точки, состоит в выборе некоторой начальной точки M , локализация которой в триангуляции известна, и постепенном переходе от M к Q вдоль прямой MQ . При этом на каждом шаге осуществляется переход на смежный (соседний по стороне) треугольник. Таким образом, в процессе локализации точки строится путь из треугольников триангуляции, каждый из которых (кроме начального) является смежным с предыдущим — *путь локализации* (см. рис. 4). Трудоемкость локализации одной точки определяется количеством треугольников, расположенных вдоль отрезка $[MQ]$, и составляет $O(\sqrt{N})$ в среднем и $O(N)$ в худшем случае.

Локализовать двумерную сетку в триангуляции означает локализовать все точки данной сетки в этой триангуляции.

Предлагается алгоритм локализации сетки, использующий *остовное дерево*, вершинами которого являются точки данной сетки. В этом случае пути локализации

проходят вдоль ребер остовного дерева. Так как остовное дерево не содержит в себе циклов и проходит через все узлы сетки G , алгоритм будет работать корректно: он не зациклится и произведет локализацию абсолютно всех точек сетки. На одном из последующих этапов предлагаемый подход использует общую триангуляцию двух сеток, построенную методом слияния, предложенным и описанным в [9]. Этот метод использует *минимальные остовные деревья* (МОД) обеих сеток. Поэтому удобнее использовать при локализации сетки именно *минимальное* остовное дерево. Тогда пути локализации будут оптимальны (см. рис. 5).

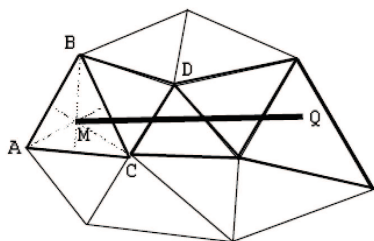


Рис. 4

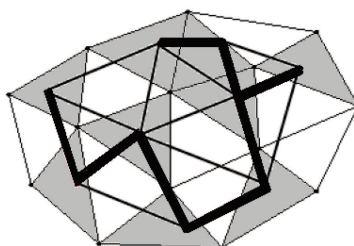


Рис. 5

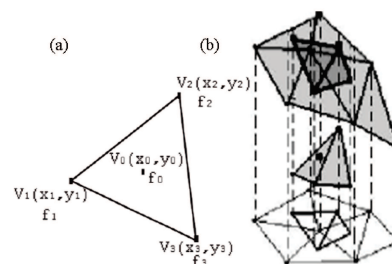


Рис. 6

Известно, что из триангуляции Делоне минимальный остов можно построить за *линейное* время. Линейное время достигается благодаря операции чистки, предложенной Черитоном и Тарьяном в [10], и использованию структуры данных «фибоначиева куча», введенной Фредманом и Тарьяном (см. [11], [12]).

Далее происходит *интерполяция функций* на основе локализации.

Пусть точка $V_0(x_0, y_0)$ локализована в треугольнике $\Delta (V_1(x_1, y_1), V_2(x_2, y_2), V_3(x_3, y_3))$. В точках этого треугольника задана функция F (см. рис. 6а):

$$F(x_1, y_1) = f_1; \quad F(x_2, y_2) = f_2; \quad F(x_3, y_3) = f_3.$$

Требуется проинтерполировать значение функции F в точке V_0 .

Будем использовать барицентрические координаты:

$$f_0 = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3, \quad \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \geq 0.$$

где

$$\begin{cases} V_0 = \lambda_1 V_1 + \lambda_2 V_2 + \lambda_3 V_3 \\ 1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_0 = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \lambda_3 x_3 \\ y_0 = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2 + \lambda_3 y_3 \\ 1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \end{cases}.$$

Вычислительные эксперименты показали, что сложность этапа интерполяции сетки составляет в среднем $O(N)$.

Указанным способом значения функции F_1 интерполируются во всех точках двумерной сетки G_2 , а значения функции F_2 — в точках сетки G_1 . После этого в каждой

точке обеих сеток известны значения двух функций: одно из них было задано, а второе получено в результате интерполяции.

Затем на точках обеих сеток строится общая триангуляция Делоне. За счет того, что нам известна локализация точек одной триангуляции в треугольниках другой, наиболее эффективным здесь оказывается использование алгоритма слияния неразделенных триангуляций, описанного в [9].

Оценка асимметрии вычисляется в виде суммы объемов разности функций F_1 и F_2 на каждом треугольнике общей триангуляции. Для этого рассматриваются все случаи взаимного пространственного расположения треугольников (см. рис. 7).

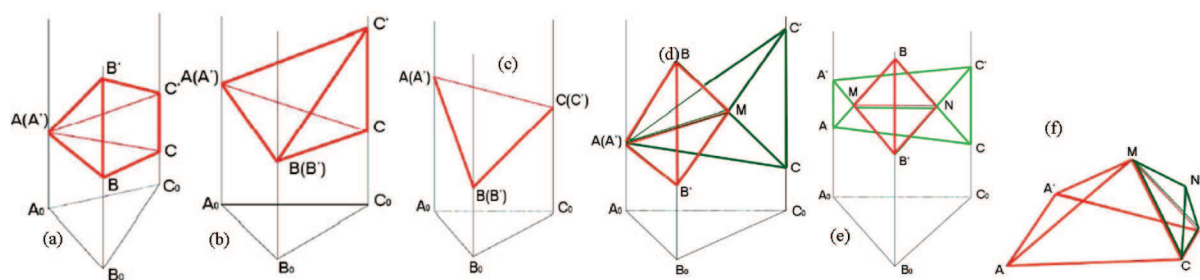


Рис. 7. Случаи пространственного расположения треугольников

Для подсчета объема разности между функциями на треугольнике необходимо считать либо объем пирамиды — треугольной или четырехугольной (см. рис. 7a-c), либо объем двух треугольных пирамид (см. рис. 7d), либо объем треугольной пирамиды и клина (см. рис. 7e), при этом объем клина ищется в виде суммы объемов четырехугольной и треугольной пирамид (см. рис. 7f).

Суммируя значения объемов разности по всем треугольникам общей триангуляции, мы получаем значение *начальной количественной оценки асимметрии*.

3.2. Нахождение плоскости асимметрии. Далее следует этап уточнения плоскости симметрии с помощью элементарных преобразований системы координат. Так как нормализация моделей в системе координат не является абсолютно точной, мы пробуем преобразовать координаты с помощью небольших сдвигов по осям координат и поворотов вокруг осей на малые углы. Уточнение происходит с целью нахождения такого положения плоскости симметрии Oyz , при котором значение количественной оценки асимметрии минимально (то есть, при котором две маски совпадают наилучшим образом). При этом минимизация будет происходить не по всем шести параметрам преобразований, а лишь по трем: сдвиги по осям Oy и Oz не будут давать вклад в оценку асимметрии, поворот вокруг оси Ox не рассматривается в силу того, что лица снимаются анфас. Минимизация будет происходить по трем оставшимся параметрам: сдвигу по оси Ox и поворотам вокруг осей Oy и Oz .

Пусть T — общая триангуляция Делоне двух нерегулярных сеток; A, B, C — вершины треугольника; $F_1(A, B, C)$ — функция, возвращающая массив значений функции лица в вершинах треугольника ΔABC ; $F_2(A, B, C, x, \varphi, \psi)$ — функция, возвращающая массив значений функции лица, отраженного относительно плоскости Oyz , сдвинутого на x по оси Ox , повернутого на угол φ вокруг оси Oy и на угол ψ вокруг оси Oz , в вершинах ΔABC . Тогда общая триангуляция будет зависеть от параметров сдвига $T = T(x, \varphi, \psi)$.

Поставим следующую оптимизационную задачу:

$$\Phi(T) = \Phi(T(x, \varphi, \psi)) = \Phi(x, \varphi, \psi) = \sum_{\Delta ABC} |F_1(A, B, C) - F_2(A, B, C, x, \varphi, \psi)| \rightarrow \min_{x, \varphi, \psi}$$

где суммирование ведется по всем треугольникам ΔABC общей триангуляции, а под модулем разности подразумевается объем разности между двумя пространственными треугольниками — заданными исходной функцией F_1 и отраженной F_2 в точках A, B, C .

Для минимизации функции Φ использовались два метода: метод градиентного спуска и покоординатного спуска. Метод покоординатного спуска с использованием метода золотого сечения обладает большей вычислительной эффективностью в данной задаче.

В качестве первоначального приближения берется точка, соответствующая совпадению плоскости симметрии с плоскостью Oyz в исходной системе координат, т.е. точка $M_0(x_0, \varphi_0, \psi_0) = (0, 0, 0)$.

При минимизации учитывается, что функция является овражной: изменение Δ переменных φ и ψ приводит к большему изменению значения функции, чем такое же изменение Δ переменной x .

В таблице приведены значения начальной количественной оценки асимметрии и оценки асимметрии после уточнения плоскости симметрии для 4 моделей лица одного и того же человека:

Таблица Объем разности между моделью и ее отражением (все значения приведены в кубических миллиметрах).

Номер модели	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
Начальная оценка асимметрии	47 466,361	49 192,110	43 473,767	46 280,040
Оценка асимметрии	24 072,518	25 205,272	24 421,316	22 263,813

Величина объема разности между исходной и отраженной моделями, измеренная в столовых ложках жидкости, составляет примерно полторы столовые ложки¹.

При этом оптимальный сдвиг по оси Ox для этих моделей составлял от 2,4 до 2,6 мм, а оптимальные углы поворота вокруг осей координат Oy и Oz — примерно 0,015 рад.

Используемый метод позволяет анализировать асимметрию модели локально. Таким образом можно определить, какие участки лица наиболее асимметричны с точки зрения предложенной оценки. Для этого для каждого треугольника общей триангуляции T вычисляется значение отношения интеграла модуля разности (метрика l_1)

¹Объем столовой ложки составляет 15 000 мм³.

функций F_1 и F_2 на этом треугольнике к его площади. На рис. 8 изображены по три модели лиц для двух разных людей. Каждая грань общей триангуляции моделей окрашена в соответствии с нормированным значением указанного отношения — наиболее светлые участки являются наиболее асимметричными.

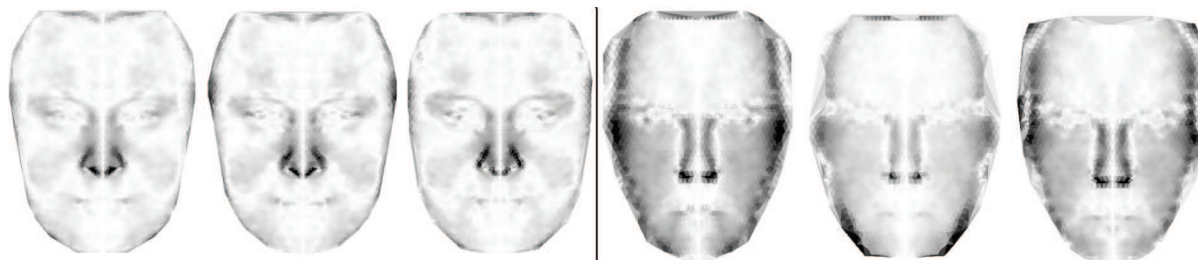


Рис. 8. Зонная (локальная) асимметрия лица

Слева: три разные модели лица одного человека, справа: три разные модели лица другого человека

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определена оценка для асимметрии лица человека по его трехмерной модели. Описаны алгоритмы вычисления данной оценки и определения плоскости симметрии модели.

Предложенный метод позволяет вычислять оценки с использованием меры важности асимметрии на каждом из участков лица. Таким образом, предложенная оценка может быть адаптирована для каждого конкретного приложения.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в понимании того, насколько предложенная оценка удовлетворяет гипотезе компактности с помощью проведения дальнейших вычислительных экспериментов на существующей базе 3D моделей и на базах большего объема, и в адаптации предложенной оценки с помощью введения меры на основе определения тех участков лица, которые наиболее важны с точки зрения асимметрии в задачах идентификации личности или медицинских приложениях.

Алгоритм вычисления оценки асимметрии допускает распараллеливание и обладает высокой вычислительной эффективностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Книжников Ю. Ф., Гельман Р. Н., Крыченков В. Ф. Применение цифровой фотограмметрии при диагностике патологии стереоскопического зрения, 2005.
2. Mitra S., Lazar N., Liu Y. 2007. Understanding the Role of Facial Asymmetry in Human Face Identification // Statistics and Computing, Vol. 17, pp. 57 - 70, January, 2007.
3. Teng K., Liu Y. Expression Classification using Wavelet Packet Method on Asymmetry Faces // tech. report CMU-RI-TR-06-03, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, January, 2006.
4. Mitra S., Liu Y. Local Facial Asymmetry for Expression Classification // Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'04), Vol. 2, pp. 889 - 894, June, 2004.

5. *Liu Y., Palmer J.* A Quantified Study of Facial Asymmetry in 3D Faces // Proceedings of the 2003 IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures, in conjunction with the 2003 International Conference of Computer Vision (ICCV '03), October, 2003.
6. *Дышкант Н.Ф., Местецкий Л.М.* Сравнение 3D портретов при распознавании лиц // доклады конференции «ММРО-13», 2007.
7. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия: введение // М.: Мир, Москва, 1989.
8. *Скворцов А.В., Костюк Ю.Л.* Эффективные алгоритмы построения триангуляции Делоне // Геоинформатика. Теория и практика. Вып. 1. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1998. 22-47.
9. *Местецкий Л.М., Царик Е.В.* Триангуляция Делоне: рекурсия без пространственного разделения точек // In Graphicon, International Conference on computer graphics, Moscow, 2004.
10. *Cheriton D., Tarjan R.E.* Finding minimum spanning trees // SIAM J.Comput., 5(4), p.724-742 (Dec.), 1976.
11. *Tarjan R.E.* Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms // In journal of the ACM., 1987.
12. *Fredman M.L., Tarjan R.E.* Data Structures and Network Algorithms // Society for Industrial and Applied Mathematics, 1989.

Статья поступила в редакцию 30.04.2008