

Сравнение однолистных поверхностей полученных при 3D сканировании

Natalya Dyshkant, Leonid Mestetskiy
Department of Computational Mathematics and Cybernetics
Moscow State University, Moscow, Russia
nfd3001@gmail.com, l.mest@ru.net

Реферат

В данной работе описывается метод решения задачи сравнения однолистных (или монотонных) поверхностей, заданных облаком точек. Под монотонной поверхностью понимается поверхность, для которой существует направление, относительно которого она является самонепересекающейся. Такие поверхности получаются при трехмерном сканировании объектов. Полученное облако точек можно рассматривать как функцию двух переменных, заданную на дискретной нерегулярной сетке. Предлагается подход к построению меры различия поверхностей, использующий триангуляции Делоне каждой из сеток, общую триангуляцию Делоне, построенную на обеих сетках, интерполяцию функций на основе локализации триангуляций друг в друге и сравнение функций на отдельных гранях общей триангуляции. Локализация триангуляций друг в друге осуществляется на основе их минимальных остовных деревьев.

Рассматриваются приложения алгоритма к задаче анализа трехмерных портретов человеческих лиц – сравнение лиц и оценка асимметрии.

Ключевые слова: Триангуляция Делоне, минимальное остовное дерево, нерегулярная сетка, интерполяция функций, локализация точки в триангуляции, сравнение поверхностей, асимметрия лица.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует способ получения поверхностей на основе 3D сканирования (<http://www.artec-group.com/#technology>). Эта поверхность может быть рассмотрена как однолистная двумерная функция относительно оси визирования.

Будем называть поверхность однолистной или монотонной по отношению к некоторой плоскости, если любая прямая, ортогональная этой плоскости, пересекает поверхность не более чем в одной точке. Таким образом, монотонная поверхность является самонепересекающейся относительно некоторой оси. Получаемые при сканировании поверхности монотонны по отношению к плоскости, перпендикулярной оси визирования.

Поверхность, полученная с помощью трехмерного сканирования, описывается в виде облака точек, которое можно рассматривать как функцию двух переменных, заданную на некотором дискретном множестве (рис.1).

В компьютерной графике существует необходимость в точных и эффективных алгоритмах вычисления меры различия поверхностей. При решении задач классификации поверхностей, восстановления общей поверхности по съемке

ее отдельных фрагментов и др. необходимо сравнивать поверхности между собой. Предлагается подход к построению метрики для поверхностей, заданных функциями двух переменных на разных дискретных множествах точек.

Известно несколько подходов к проблеме сравнения поверхностей. Использование карт кривизны (Curvature Maps) основывается на построении изолиний в окрестностях определенных точек поверхности с последующим сравнением поверхностей по этим картам (T.Gatzke, C.Grimm, M.Garland, S.Zelinka, 2005). Идея метода выделения главных компонент (Principal Component Analysis - PCA), заключается в разложении векторов изображения поверхности по системе собственных векторов, соответствующих наибольшим собственным значениям (T.Russ, 2006, С.Мсcool, 2006). Эти методы требуют значительного объема вычислений, что приводит к большим затратам процессорного времени.



Рис. 1: Получение трехмерной модели человеческого лица

Предложенный нами метод обеспечивает очень точное сравнение поверхностей, учитывая все их детали. В качестве метрики для оценки сходства поверхностей предлагается использовать объем разности между триангулированными поверхностями. Допускается также использование «взвешенного» объема. В этом случае сходство некоторых участков поверхностей будет иметь больший вес, чем сходство других. Пусть две поверхности заданы функциями $f(x, y)$ и $g(x, y)$ на дискретных множествах Ω_1 и Ω_2 соответственно, при этом оба множества содержатся внутри некоторого общего прямоугольника R ; функция $\mu(x, y)$ определяет вес различных фрагментов поверхности с точки зрения определения их сходства. Необходимо получить непрерывные на R аналоги функций $f(x, y)$ и $g(x, y)$ – функции $\hat{f}(x, y)$ и $\hat{g}(x, y)$. Тогда мера различия будет вычисляться в следующем виде:

$$\iint_R |\hat{f}(x, y) - \hat{g}(x, y)| \mu(x, y) dx dy.$$

Проблема заключается в построении непрерывных аналогов функций, задающих поверхности, по дискретным функциям, которые первоначально заданы на *разных* дискретных сетках. Основная идея предлагаемого подхода – *восполнение* каждой из функций на другой сетке через построение триангуляций и локализацию их друг в друге. При этом используются триангуляции Делоне.

Известные подходы к проблеме сравнения разных триангуляций, использующие хеширующие функции (Д.А.Петренко, А.В.Скворцов, Р.О.Куленов 2003) мало эффективны, так как требуют большого количества вычислений. Мы предлагаем метод, использующий локализацию каждой из сеток в триангуляции другой, слияние триангуляций и работу с заданными функциями на ячейках общей сетки.

Предлагаемый подход к вычислению метрики обладает достаточной гибкостью и может быть основой для создания более сложной метрики, подходящей для конкретного приложения. Помимо точности и качества сравнения поверхностей очень важна эффективность алгоритмов вычисления меры различия.

В качестве приложения, в данной работе рассматривается задача сравнения поверхностей человеческих лиц, получаемых с помощью систем машинного зрения в виде облаков точек. Такая задача, возникающая при биометрической идентификации по лицу, при оценке асимметричности человеческого лица, требует введения метрики для сравнения портретов.

Важным преимуществом нашего подхода является его высокая вычислительная эффективность, которая подтверждается в вычислительных экспериментах.

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

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая задача имеет следующее содержание.

Будем называть нерегулярной двумерной (плоской) сеткой G конечное множество точек из пространства \mathbb{R}^2 : $G = \{(x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2 \mid i = 1, \dots, N\}$. Пусть даны две нерегулярные двумерные сетки $G_1 = \{(x_1^i, y_1^i)\}_{i=1}^{N_1}$ и $G_2 = \{(x_2^i, y_2^i)\}_{i=1}^{N_2}$ с заданными на них функциями F_1 и F_2 .

Функции заданы наборами своих значений $\{f_1^i\}_{i=1}^{N_1}$ и $\{f_2^i\}_{i=1}^{N_2}$ в соответствующих точках: $f_1^i = F_1(x_1^i, y_1^i)$ и $f_2^i = F_2(x_2^i, y_2^i)$. При этом оба множества G_1 и G_2 содержатся внутри некоторого общего прямоугольника $R = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x \in [a_1, a_2], y \in [b_1, b_2]\}$. В вершинах этого прямоугольника значения функций F_1 и F_2 положим равными 0.

Требуется разработать эффективный метод сравнения функций, заданных таким образом.

3. АЛГОРИТМЫ

Наш метод решения задачи состоит в следующем:

- 1) на обеих сетках строятся триангуляции Делоне;
- 2) каждая из сеток локализуется в триангуляции другой сетки;
- 3) каждая из функций интерполируется по другой сетке;
- 4) строится общая триангуляция для двух сеток;
- 5) после этого в каждой точке общей сетки известны значения *двух* функций, и можно производить операцию сравнения на отдельных ячейках общей сетки, анализируя расположения пространственных треугольников, заданных функциями, относительно друг друга.

3.1 Построение триангуляций Делоне

Триангуляция является триангуляцией Делоне, если выполнено следующее условие: внутри окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, нет ни одной из N заданных точек триангуляции (см. рис.2).

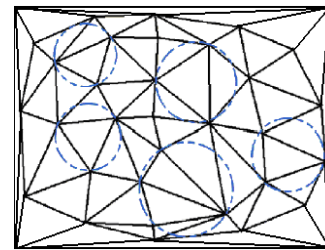


Рис. 2: Триангуляция Делоне

Для построения триангуляции используется алгоритм, 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 $O(N \log N)$.

3.2 Локализация точки в триангуляции

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 T 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, то точка Q не может заходить за границы T , 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 Q к M 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. На рисунке 3 треугольники, принадлежащие пути локализации, обведены.

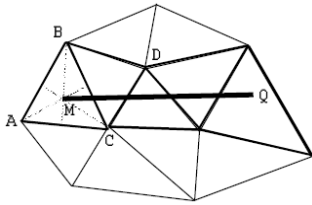


Рис. 3: Локализация точки в триангуляции: точка M выбрана как центр пересечения медиан начального треугольника

Трудоемкость локализации одной точки определяется количеством расположенных вдоль отрезка $[MQ]$ треугольников и составляет $O(\sqrt{N})$ в среднем и $O(N)$ в худшем случае.

3.3 Локализация сетки в триангуляции

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 заикнется и произведет локализацию абсолютно всех точек сетки.

Предлагаемый алгоритм сравнения однолистных поверхностей на одном из последующих этапов использует общую триангуляцию двух сеток, построенную методом слияния, предложенным и описанным в [1]. Этот метод использует минимальные остовные деревья (МОД) обеих сеток. Поэтому удобнее использовать при локализации сетки именно минимальное остовное дерево. Тогда пути локализации будут оптимальны.

Известно, что из триангуляции Делоне минимальный остов можно построить за линейное время. Линейное время достигается благодаря операции чистки, предложенной Черитоном и Тарьяном (Cheriton, R.E.Tarjan, 1976), и использованию структуры данных «фибоначчиева куча», введенной Фредманом и Тарьяном (Tarjan, 1987).

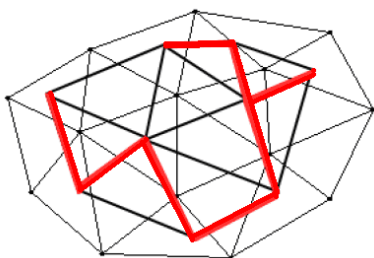


Рис. 4: Локализация сетки в триангуляции с помощью МОД

Экспериментальные оценки показали, что вычислительная сложность этапа локализации сетки в среднем есть $O(N)$.

С помощью описанного алгоритма каждая из сеток G_1 и G_2 локализуется в триангуляции другой сетки, и можно

рассмотреть задачу интерполяции функции, заданной на одной сетке, в точках другой сетки.

3.4 Интерполяция функций

Пусть точка $V_0(x_0, y_0)$ локализована в некотором треугольнике $\Delta(V_1(x_1, y_1), V_2(x_2, y_2), V_3(x_3, y_3))$, в точках которого задана функция F (см. рис.5а): $F(x_1, y_1) = f_1$, $F(x_2, y_2) = f_2$, $F(x_3, y_3) = f_3$.

Для интерполяции значения функции F в точке V_0 будем использовать линейную интерполяцию: $f_0 = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3$, где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \geq 0$ и

$$\begin{cases} x_0 = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \lambda_3 x_3 \\ y_0 = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2 + \lambda_3 y_3 \\ 1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \end{cases}$$

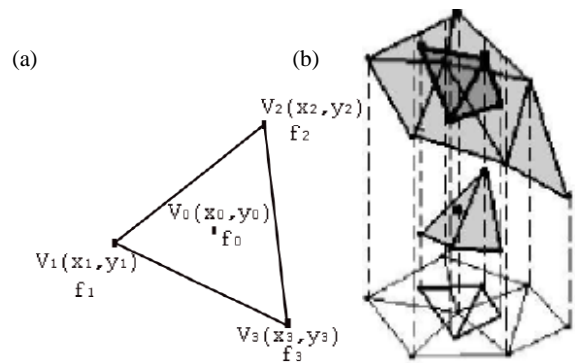


Рис. 5: Линейная интерполяция функций

Результаты работы данного метода показаны на рисунках 6-9. Красным цветом (сверху) изображена триангулированная поверхность, заданная функцией F_1 на сетке G_1 , зеленым цветом (снизу) – триангулированная поверхность, заданная функцией F_2 на сетке G_2 , а синим цветом (снизу) – поверхность, полученная с помощью интерполяции функции F_2 на сетку G_1 . Из рисунков видно, что триангуляции, изображенные зеленым и синим цветами, задают одну и ту же поверхность (нижнюю).

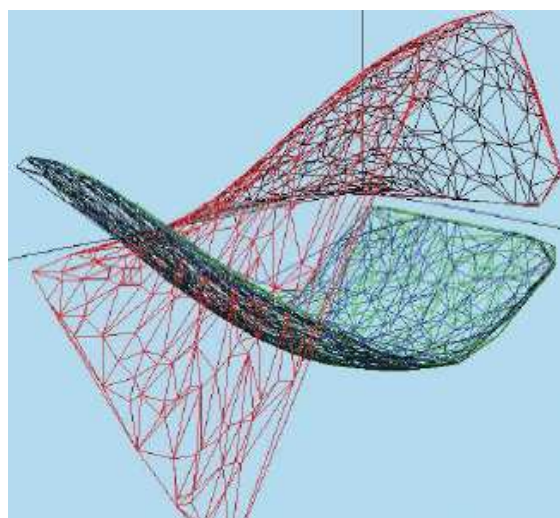


Рис. 6: Линейная интерполяция функций: $N_1 = N_2 = 1\ 000$

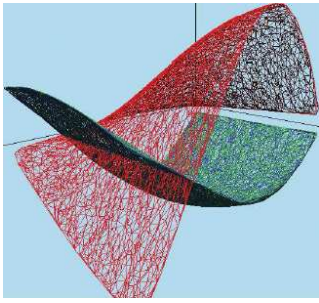


Рис. 7: Линейная интерполяция функций: $N_1 = N_2 = 10\ 000$
 Вычислительная сложность этапа интерполяции сетки есть $O(N)$.

С помощью описанного метода значения функции F_1 интерполируются во всех точках двумерной сетки G_2 , а значения функции F_2 – в точках сетки G_1 .

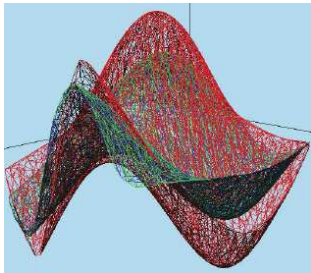


Рис. 8: Линейная интерполяция функций: $N_1 = N_2 = 10\ 000$

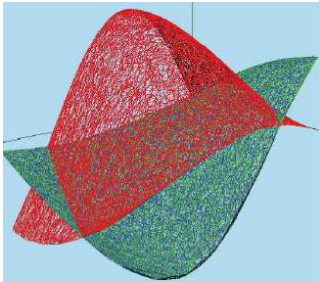


Рис. 9: Линейная интерполяция функций: $N_1 = N_2 = 15\ 000$

3.5 Сравнение функций на ячейках общей сетки

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

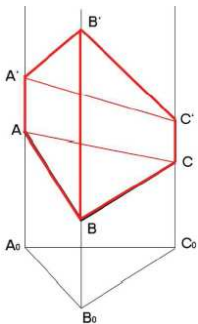


Рис. 10; $A_0B_0C_0$ – треугольник общей триангуляции, ABC и $A'B'C'$ – треугольники, такие что $AA' \parallel BB' \parallel CC' \parallel Oz$ и координаты их вершин по оси Oz равны значениям функций F_1 и F_2 в этих точках

Построим на точках обеих сеток общую триангуляцию Делоне. За счет того, что нам известна локализация точек

одной триангуляции в треугольниках другой, наиболее эффективным здесь оказывается использование алгоритма слияния триангуляций, описанного в [1].

На рисунке 10 изображен некоторый треугольник $A_0B_0C_0$ общей триангуляции. В качестве меры различия поверхностей будем использовать сумму объемов разности между призмами $A_0B_0C_0ABC$ и $A_0B_0C_0A'B'C'$ по всем треугольникам $A_0B_0C_0$ общей триангуляции.

Пусть a, b, c – разность координат по оси Oz точек A' и A, B' и B, C' и C соответственно. Все возможные случаи пространственного расположения треугольников показаны на рисунке 11. Для подсчета объема разности между призмами нужно считать либо объем пирамиды – треугольной или четырехугольной (см. рис.11a-c), либо объем двух треугольных пирамид (см. рис.11d), либо объем треугольной пирамиды и клина (см. рис.11e), при этом объем клина ищется в виде суммы объемов четырехугольной и треугольной пирамид (см. рис.11f).

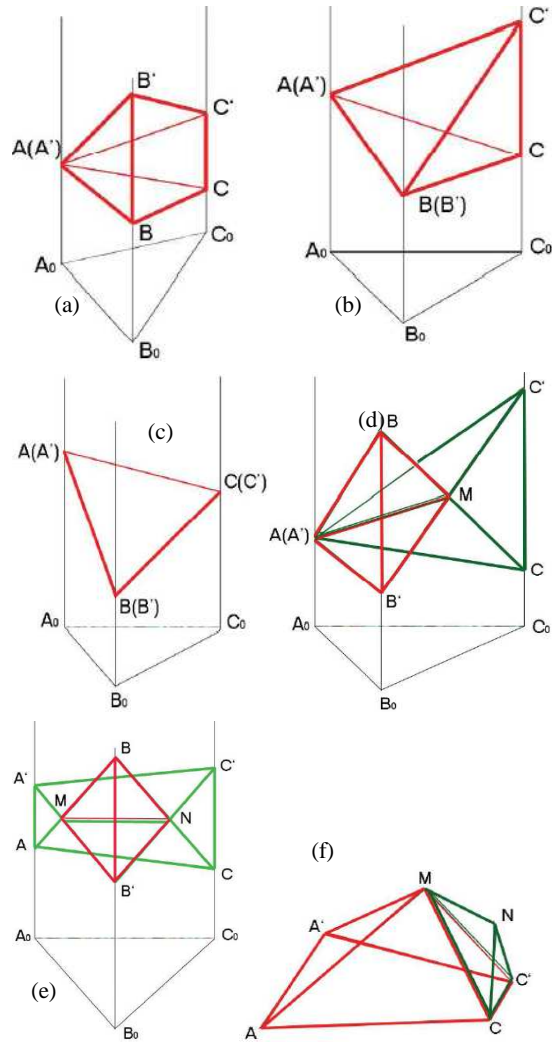


Рис. 11: Сравнение функций, заданных в трех точках: (a) $a = 0, b > 0, c > 0$; (b) $a = 0, b = 0, c > 0$; (c) $a = 0, b = 0, c > 0$; (d) $a = 0, b < 0, c > 0$; (e) $a > 0, b < 0, c > 0$; (f) объем клина как сумма объемов четырехугольной и треугольной пирамид.

4. ЗАДАЧА СРАВНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИЦ

Авторами были рассмотрены два приложения к описываемой задаче: сравнение трехмерных портретов при биометрической идентификации по лицу и оценка асимметрии человеческого лица по трехмерному портрету.

4.1 Сравнение трехмерных портретов

Известно, что получение качественной трехмерной модели лица возможно при использовании стереоскопической системы с применением структурированной подсветки (А.В.Мурнин, 2001; S.Y.Zhel'tov, 2005; Y.V.Vizilter, 2005). Такого рода системы компьютерного зрения интенсивно разрабатываются в настоящее время.

Трехмерный портрет лица можно получить с помощью системы машинного зрения в виде облака точек. Поверхность лица представляет собой однозначную функцию двух переменных $z = F(x, y)$ в некоторой системе координат, в которой ось Oz направлена вдоль оси визирования (см. рис.12). Тогда метрика для измерения сходства поверхностей основывается на сравнении двух функций, заданных на разных нерегулярных двумерных сетках.

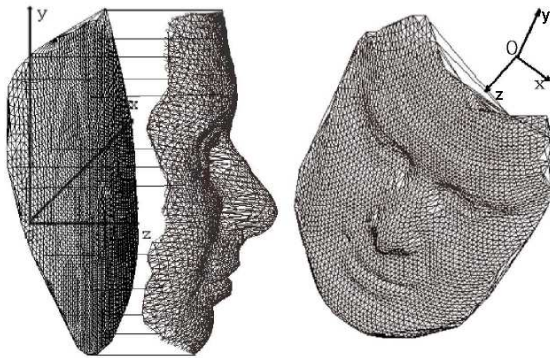


Рис. 12: Триангулированная поверхность лица

В таблице 1 приведены затраты времени для различных этапов алгоритма при сравнении поверхностей лиц. При этом использовались трехмерные портреты, состоящие примерно из 3000 точек. Вычислительные эксперименты проводились на машине с процессором AMD Athlon 2600+ и оперативной памятью 512 Мб.

Таблица 1: Расход времени на различные этапы алгоритма.

Этап алгоритма	Время (сек)
Построение триангуляций	0, 124
Построение МОД	0, 203
Локализация триангуляций	0, 015
Интерполяция функций	< 0, 001
Построение общей триангуляции	0, 109
Вычисление меры различия $\int F_1 - F_2 $	0, 031
Общее время	0, 497

Предложенный алгоритм сравнения оказывается эффективным, что позволяет искать положение, при котором маски совпадают наилучшим образом (см. рис. 13). С помощью элементарных преобразований одной из сеток –

сдвиг и поворот на малый угол можно значительно улучшить полученный результат.

Большинство подходов к задаче распознавания лиц используют определенные точки на лице, по координатам которых можно определить точки на черепе, по которым проводится классификация. И хотя количество таких точек – несколько десятков, сложность заключается в необходимости выполнения измерений с очень высокой точностью, а задача восстановления формы черепа подразумевает большой объем вычислений, что занимает много процессорного времени. Существуют подходы, использующие геометрические характеристики лица (Самаль, Старовойтов), марковские модели (Rabiner), сравнение эталонов (Brunelli, Poggio) – component-based face recognition (Huang, Heisele, Blanz, 2001), кривизну поверхности лица (G.Gordon, 1991), метод главных компонент (PCA) (M.Safari, 2004, K.Kim, 2006).

В нашем методе вычисления оценки различия возможно введение меры важности для разных участков поверхности. В этом случае объем разности будет интегрироваться по некоторой мере.

Как видно из таблицы 1, одно сравнение можно произвести менее чем за полсекунды, но этот результат можно улучшить за счет использования более быстрого процессора и возможности распараллеливания. Кроме того, если одна модель находится в базе, то общее время уменьшается вдвое.

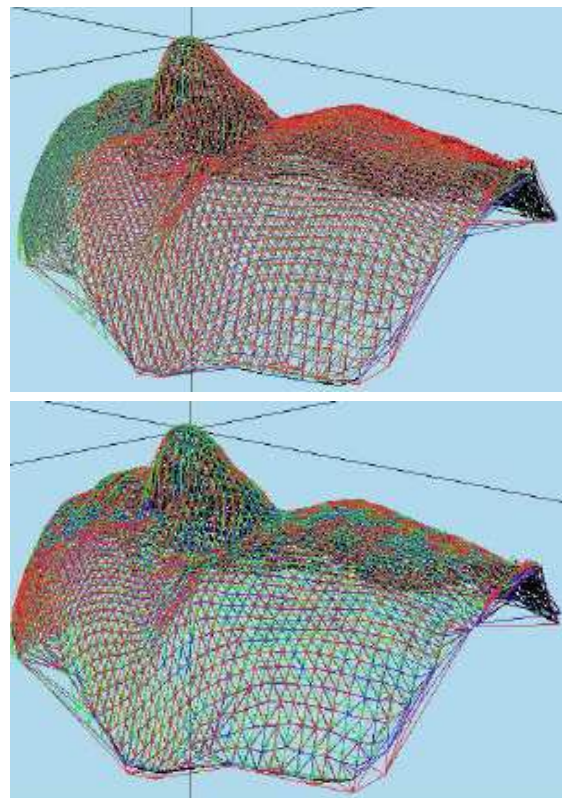


Рис. 13: Сравнение поверхностей лиц одного и того же человека: сверху – оценка, полученная предложенным методом, составляет $\approx 40\,000$ куб.ед., внизу – поверхности, полученные после смещения одной маски относительно другой, та же оценка составляет $\approx 10\,000$ куб.ед.

4.2 Оценка асимметрии лица

Известно, что человеческое лицо обладает лишь *приближенной* зеркальной (двусторонней) симметрией относительно плоскости, делящей его на правую и левую половины. Оценить степень асимметрии означает оценить степень такого приближения.

Задача оценки асимметрии лица возникает при профилактике аномалий зрения у детей (Y.F. Knizhnikov, 2005), в медицинских и психологических исследованиях, профотборе и в других приложениях. Кроме того, в последнее время появились попытки использовать асимметрию лица для решения задач идентификации личности ([19]), распознавания эмоций ([20], [21]), определения пола ([22]).

Используемые в работе модели лиц расположены таким образом, что ось Oz направлена вдоль оси визирования, начало координат соответствует кончику носа, а ось Oy проходит вдоль лица. За плоскость симметрии лица берется плоскость Oyz .

Решение задачи оценки асимметричности происходит в два этапа. Сначала строится симметричное отражение исходной маски относительно оси симметрии лица (см. рис. 14 – участки лица, на которых отраженная маска выше исходной, выделены более темным цветом), которое сравнивается с исходной маской описанным выше методом. Полученная мера различия будет начальной количественной оценкой асимметричности. На следующем этапе плоскость симметрии уточняется 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 координат на малые углы. Уточнение происходит с целью нахождения такого положения плоскости симметрии Oyz , при котором значение количественной оценки асимметричности 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 сканируются анфас. Минимизация будет происходить по трем оставшимся параметрам: сдвигу по оси Ox и поворотам вокруг осей Oy и Oz .

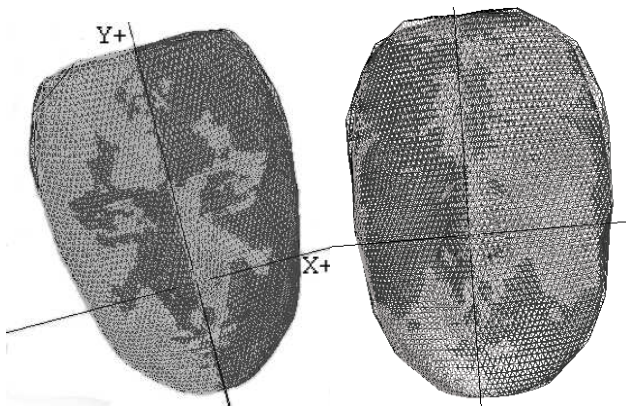


Рис. 14: Исходная маска и ее отражение относительно оси симметрии

Пусть T – общая триангуляция Делоне двух нерегулярных сеток, $F(A, B, C)$ – функция, возвращающая массив значений функции лица в точках A, B, C , $SF(A, B, C, x, \varphi, \psi)$ – функция, возвращающая массив значений функции лица, отраженного относительно оси Oy , сдвинутого на x по оси Ox , повернутого на угол φ вокруг оси Oz и на угол ψ вокруг оси Oy . Тогда общая триангуляция T будет зависеть от параметров сдвига $T = T(x, \varphi, \psi)$.

Требуется минимизировать следующую функцию:

$$\Phi(T) = \Phi(T(x, \varphi, \psi)) = \Phi(x, \varphi, \psi) = \sum_{\Delta A_0 B_0 C_0} |F(A_0, B_0, C_0) - SF(A_0, B_0, C_0, x, \varphi, \psi)| \rightarrow \min_{x, \varphi, \psi}$$

В данной формуле суммирование происходит по всем треугольникам $A_0 B_0 C_0$ общей триангуляции Делоне, а под модулем разности подразумевается объем разности между двумя соответствующими треугольниками, заданными исходной функцией и отраженной (см. рис. 10).

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

В качестве первоначального приближения бралась точка, соответствующая совпадению оси симметрии с осью Oy в исходной системе координат, т.е. точка

$$M(x_0, \varphi_0, \psi_0) = (0, 0, 0).$$

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

В таблице 2 приведены значения начальной количественной оценки асимметрии для 4 моделей лица одного и того же человека:

Таблица 2: Начальная количественная оценка асимметрии.

Номер модели	1	2	3	4
Начальная количественная оценка симметрии (куб.ед.)	47 466, 361	49 192, 110	43 473, 767	46 280, 040

В таблице 3 приведены значения оценки, полученной с помощью наилучшего уточнения оси симметрии для тех же самых моделей.

Таблица 3: Количественная оценка асимметрии.

Номер модели	1	2	3	4
Количественная оценка симметрии (куб.ед.)	24 072, 518	25 205, 272	24 421, 316	22 263, 813

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 объема разности функций F и SF на этом треугольнике к его площади. На рис. 15 изображена модель, каждая грань общей триангуляции которой окрашена в соответствии с нормированным значением этого отношения – наиболее светлые участки являются наиболее асимметричными.



Рис. 15: Зонная (локальная) асимметрия лица

5. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Описанный метод сравнения поверхностей был реализован, также были проведены многочисленные вычислительные эксперименты для всех этапов алгоритма.

Экспериментальные оценки показали, что каждый из этапов, за исключением построения триангуляций, выполняется за линейное по числу узлов в сетках время. Триангуляция выполняется за время $O(N \log N)$, которое является определяющим для вычислительной сложности предложенного подхода.

В таблицах 4-6 приведены затраты времени на построение минимального остова и этапы локализации и интерполяции функций.

Таблица 4: Время построения МОД на основе триангуляции Делоне алгоритмом Черитона и Тарьяна.

Количество точек	Время (сек)
20 000	0,906
40 000	1,812
60 000	2,562
80 000	3,531
100 000	4,468

Таблица 5: Время локализации одной сетки в треугольниках триангуляции другой.

Количество точек сетки $G_1(N_1)$	Время (сек)
10 000	0,031

25 000	0,093
50 000	0,171
75 000	0,234
100 000	0,312

Таблица 6: Расход времени на линейную интерполяцию обеих функций.

Количество точек сеток G_1 и G_2 ($N_1 + N_2$)	Время (сек)
50 000	0,015
100 000	0,031
150 000	0,046
200 000	0,062

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод имеет следующие преимущества: вычислительная эффективность, возможность распараллеливания. Кроме того, описанный подход обладает некоторой универсальностью по сравнению с другими, так как он подходит для сравнения любых поверхностей, заданных функциями на двумерных сетках. При этом предложенная метрика может быть адаптирована для каждого конкретного приложения, например, с помощью введения меры на поверхности.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mestetskiy L., Tsarik E., 2004. Триангуляция Делоне: рекурсия без пространственного разделения точек. In *Graphicon'2004, International Conference on computer graphics*, Moscow, 2004 (in Russian).
- [2] Cheriton D., Tarjan R.E., 1976, Finding minimum spanning trees, *SIAM J.Comput.*, 5(4), p.724-742 (Dec.)
- [3] Robert E.Tarjan, 1987. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. In *journal of the ACM*.
- [4] Michael L.Fredman and Robert E.Tarjan, 1989. *Data Structures and Network Algorithms*, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [5] 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.*
- [6] Mucke Ernst, Saias Isaak, Zhu Binhai. Fast Randomized Point Location Without Preprocessing in Two- and Three-dimensional Delauney Triangulation, *Los Alamos National Laboratory*, Los Alamos, New Mexico.
- [7] Charles Beumier, Mark Acheroy, 1999. "Automatic 3D Face Authentication Paper templates". Signal and Image Center, Belgium.

- [8] Gordon G.G., 1991, Face recognition based on depth maps and surface curvature. In *SPIE Geometric methods in Computer Vision*, San Diego.
- [9] Jennifer Huang, Bernd Heisele, Volker Blanz, 2003, Component-based Face Recognition with 3D Morphable Models. In *International Conference on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication (AVBPA-03)*, p. 27-34, 2003
- [10] A.Mohan, C. Papageorgiou, T. Poggio, 2001. Example-based object detection in images by components. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, April 2001.
- [11] Timothy Gatzke, Cindy Grimm, Michael Garland, Steve Zelinka, 2005. Curvature Maps for Local Shape Comparison,
- [12] Steve Zelinka, Michael Garland, 2004. Similarity-based surface modelling using geodesic fans, *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*.
- [13] Brunelli R., Poggio T. Face recognition: features versus templates, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993.
- [14] Mccool, C., Cook, J.,; Chandran, V.,; Sridharan, S., 2006 Feature Modelling of PCA Difference Vectors for 2D and 3D Face Recognition., 2006. In *Video and Signal Based Surveillance*, AVSS '06. IEEE International Conference on Nov. 2006 Page(s):57 – 57.
- [15] Ohbuchi, R.; Takei, T., 2003, Shape similarity comparison of 3D models using alpha shapes, *Computer Graphics and Applications, 2003. Proceedings. 11th Pacific Conference on Volume*, 2003.
- [16] A.B. Murynin, V.F. Krychenkov, I.A. Matveev, V.D. Kuznetsov, 2001. Estimation of Bilateral Facial Symmetry Deviation Using a Stereoscopic Computer Vision System, *Pattern Recognition and Image Analysis Vol.11No 2 pp 350-352*, 2001.
- [17] Y.F.Knizhnikov, R.N. Helman, V.F. Krychenkov, 2005, Применение цифровой фотограмметрии при диагностике патологии стереоскопического зрения. (in Russian).
- [18] S.Y. Zheltov, Y.V. Vizilter, M.V. Ososkov, S.L. Karateev, I.V. Beketova, 2005. «Автоматическое выделение на цветных цифровых изображениях лица человека и его характерных черт», *Вестник компьютерных и информационных технологий, N10, с.2-7*, 2005, (in Russian).
- [19] Y.V. Vizilter., Y.V. Morzeev S.L. Karateev, I.V. Beketova, 2005. «Методы биометрической идентификации человека по изображениям его лица», *Вестник компьютерных и информационных технологий. N11, с.2-10*, 2005, (in Russian).
- [20] S. Mitra, N. Lazar, Y. Liu, 2007. “Understanding the Role of Facial Asymmetry in Human Face Identification”, *Statistics and Computing, Vol. 17, pp. 57 – 70*, January, 2007.
- [21] K. Teng, Y. Liu “Expression Classification using Wavelet Packet Method on Asymmetry Faces”, *tech. report CMU-RI-TR-06-03, Robotics Institute, Carnegie Mellon University*, January, 2006.
- [22] S. Mitra, Y. Liu, “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.
- [23] Yanxi Liu, Jeff Palmer, “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.

COMPARISON OF ONE-SHEET SURFACES ACQUIRED BY 3D SCANNING

Natalya Dyshkant, Leonid Mestetskiy

Abstract

In this paper we address the problem of one-sheet (or monotone) surface comparison where surfaces are given as clouds of points. The monotone surface is understood as a surface for which there is such direction that the surface is non-selfintersecting relative to this direction. Such surfaces are acquired on basis of three-dimensional scanning of objects. The received cloud of points can be considered as the function of two variables given on the discrete nonuniform grid. We introduce an approach for disparity measure construction of such surfaces, using Delauney triangulations of each grid, general Delauney triangulation constructed on both grids, function interpolation on basis of location of triangulations in each other and function comparison on single faces of the general triangulation. Location of triangulations in each other is implemented on basis of their spanning trees.

We also consider applications of our algorithm to the problem of analysis of 3D human's face portraits - comparison of human faces and computing of facial asymmetry estimation.

Keywords: *Delauney triangulation, minimum spanning tree, nonuniform grid, function interpolation, point location in triangulation, surface comparison, facial asymmetry.*

Авторы

Дышкант Наталья Федоровна – студентка 5 курса кафедры математических методов прогнозирования факультета Вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.

Местецкий Леонид Моисеевич – доктор технических наук, профессор кафедры математических методов прогнозирования факультета Вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.