

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012  
Vol.17 No.

4

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年4月 第17卷 第4期(总第192期)

## 目次

### 综述

图像分割中的模糊聚类方法 ..... 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

### 图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 ..... 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 ..... 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 ..... 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 ..... 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨率重建中的应用 ..... 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 ..... 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 ..... 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

### 图像分析和识别

核空间散度阈值法 ..... 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 ..... 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 ..... 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 ..... 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 ..... 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

### 图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 ..... 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测 .....	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度 .....	朱新懿,耿国华,温超(568)

### 计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现 .....	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

### 虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制 .....	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

### 遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法 .....	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪 .....	杨萌,张弓(596)

---

第 18 届中国遥感大会征文通知 .....	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知 .....	封 2

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院  
**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
 中国图象图形学学会  
 北京应用物理与计算数学研究所  
**主 编** 李小文  
**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
 北京 9718 信箱 邮编 100101  
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
 电话:010-68407995 010-82614429  
 网 址:www.cjig.cn  
**印刷装订** 北京北林印刷厂  
**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号  
**总 发 行** 北京报刊发行局  
**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
 (中国国际书店)  
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences  
**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
 CAS China Society of Image and Graphics  
 Institute of Applied Physics and Computational  
 Mathematics  
**Chief editor** LI Xiaowen  
**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
 of Journal of Image and Graphics  
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
 E-mail: jig@irsa.ac.cn  
**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
 and Journals  
**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading Corporation  
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)  
**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

## 第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公共事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

## 第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

- 论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
  - 论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
  - 论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
  - 网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
  - 会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
- 会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

## Contents

### Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation ..... Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

### Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry ..... Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor ..... Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering ..... Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image  
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing ..... Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image ..... Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity ..... Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

### Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space ..... Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale  
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space  
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images  
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application  
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

### Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation  
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos ..... Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps  
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

### Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method  
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

### Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD  
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

### Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data  
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary  
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图法分类号: TP397.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0568-07

论文引用格式: 朱新懿, 耿国华, 温超. 利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 568-574

## 利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度

朱新懿, 耿国华, 温超

西北大学信息科学与技术学院, 西安 710127

**摘要:** 针对目前颅面相似性评估主要依靠主观验证、缺乏衡量相似度的物理量等问题, 提出一种 3 维颅面几何相似性评估方法。将颅面相似性评估看做是待比较颅面到数据库中其余颅面的弯曲变形, 计算出待比较颅面的 Principal Warps 作为新的基, 给出颅面间对应全局特征点的选择方法, 并利用薄板样条函数建立映射, 从而计算出相应的弯曲变形矩阵, 将该矩阵表示为基与系数矩阵的乘积。实现了在待比较颅面固定的情况下, 用系数矩阵来衡量颅面间的变形程度, 并在此基础上定义了颅面间几何相似性距离, 给出了具体比较方法。实验结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 颅面相似性; 颅面重构; 薄板样条; 特征点; 颅面距离

### Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps

Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao

School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China

**Abstract:** An approach of 3D craniofacial geometry shape similarity estimation is proposed to solve the problem that current approaches mainly rely on subjective assessment for the lack of related quantities. In our approach the cranioface, which is to be compared, is transformed into another one in the database and its principal warps are computed to be the base for the representation of the shape change. First, the global landmarks are selected from the two craniofaces and the thin-plate spline function is used to establish a map between them. Then, the corresponding bending transformation matrix is computed. This matrix can be represented by the product of the principal warps and one coefficient matrix, which is used to measure the deformation degree of the craniofaces. Finally, the geometry similarity distance is defined on the basis of the coefficient matrix. Experimental results demonstrate the feasibility and effectiveness of the approach.

**Key words:** craniofacial similarity; craniofacial reconstruction; thin-plate spline; landmark; craniofacial distance

## 0 引言

利用计算机辅助颅面重构是以法医学、人类学为基础, 通过医学图像或扫描数据重建 3 维目标颅骨, 复原颅骨上的软组织形成 3 维颅面, 最后添加五官的方法来估计面貌的技术。在颅面重构技术中, 如何判断计算机复原的 3 维颅面与真实颅面是否相

似、如何对两个颅面的差别进行比较分析等是颅面相似性评估亟需解决的问题。由于评估受到颅面几何形状和人脸五官等诸多因素的影响, 因而很难有一套简单合适的验证方案<sup>[1]</sup>, 至今还没有一套公认的客观分析方法, 因此, 颅面相似性评估仍是一个非常复杂且亟待解决的问题。

目前进行颅面相似性评估主要依靠主观验证<sup>[2-3]</sup>, 邀请专家或大量志愿者对重构颅面做出判

收稿日期: 2011-06-01; 修回日期: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736008); 陕西省教育厅自然科学基金研究项目(2010JK852)

第一作者简介: 朱新懿(1979—), 女, 讲师, 西北大学信息科学与技术学院计算机理论与软件博士研究生, 主要研究方向为计算机可视化、医学图像处理。E-mail: nwuzxy@163.com

断,但这种方法在一定程度上夹杂着评价者“个人”的主观认识和生活经验,缺乏普遍性和客观性。如果能够定义衡量颅面相似性的物理量,例如相似度距离,就可以比较重构误差,评价重构结果的准确性,为颅面重构方法的研究提供评价标准。在实际刑侦应用中,颅面相似度评估的作用是排除数据库中一些最不相似的颅面,并给出若干个计算相似的结果,从而辅助专家、案件目击者、被害人亲属进行比较判断。在颅面复原应用中,可以根据待复原颅骨的特点,选择一组较为相似的颅面构建统计颅面模型,从而提高复原结果的准确性。

虽然国内外有大量研究颅面重构方法的文献<sup>[1,4-5]</sup>,但是对颅面相似度进行分析评估的却比较少,而且研究方向都集中在考察颅面的几何相似度上。Vanezis 主要使用主观验证法来评价颅面相似度,同时也尝试使用普鲁克分析<sup>[3]</sup>来评估重构结果,结果显示在某些实验中,普鲁克分析得到的结果和志愿者得到的结果类似。该方法计算较为简单,计算时间较短,在使用少量样本进行计算时就已经出现了部分计算结果与主观验证法有较大出入的问题,因而该方法的可靠性还有待验证。Feng 等人提到利用相对角直方图方法(RACD)<sup>[6]</sup>对两个颅面模型进行比较。该方法将两个颅面模型比较结果的取值范围限制在 $[0,1]$ 区间内,0表示不相似,1表示最相似,但是计算结果往往数值接近,一般至少需要计算到小数点后3、4位才能进行相似度比较。另外,该方法在计算每个模型的相对角直方图时需要花费较长时间,一旦模型的相对角直方图计算完毕,则模型相似度比较所花费的时间就非常短。李楠以3维颅面测量为基础,结合ICP算法和相对角直方图算法,提出一种颅面相似度的计算方法<sup>[7]</sup>。但该方法相对于RACD算法更加复杂,颅面比较计算时间更长。

Bookstein 提出利用 Principal Warps<sup>[8]</sup>来研究两幅2维图像中同构特征点间的变形问题。他利用薄板样条函数对两组同构特征点建立映射,该映射可以分解为仿射变换部分与一组 Principal Warps 的叠加,这些 Principal Warps 能够反映出不同尺度下的变形情况,因此不同图像中同构特征点的形状比较可以通过 Principal Warps 来描述和度量。与普通的正交分解(如K-L变换或者傅里叶变换)不同的是,普通的正交分解是对图像本身进行分解,而 Principal Warps 是图像间变形的正交成分,可作为

描述形状变化的基。因此 Principal Warps 可应用在图像分析、分析物体变形、辅助选择特征点等诸多方面,例如 Bookstein 利用该方法比较分析了上颌骨发育畸形儿童与正常儿童面部骨骼发育的不同。

本文将 Principal Warps 扩展到两个3维物体同构特征点间的形状变形分析,进而将两个颅面的几何相似度评估看做是一个颅面(参考颅面)到另一个颅面的弯曲变形,弯曲变形程度越小说明两个颅面越相似。首先提出了选择颅面特征点的方法,然后以薄板样条函数为基础,计算两个颅面对应特征点的弯曲变形矩阵  $W$ ,用参考颅面的 Principal Warps 为基来表示  $W$ ,在此基础上定义了颅面相似度的距离公式,从而实现了对3维颅面模型几何相似度的评估。实验结果表明了该方法的有效性。

## 1 Principal Warps

在3维笛卡儿坐标系中,假设有  $n$  个特征点构成的  $n \times 3$  阶矩阵为

$$V = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}$$

式中, $V$ 的第  $i$  行代表一个特征点  $v_i$  的坐标  $(x_i, y_i, z_i)$ 。这  $n$  个特征点经过变形后组成了新的  $n \times 3$  阶矩阵为

$$V' = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_i & y'_i & z'_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_n & y'_n & z'_n \end{bmatrix}$$

式中, $V'$ 的第  $i$  行代表一个和  $v_i$  对应的特征点  $v'_i$ ,其坐标为  $(x'_i, y'_i, z'_i)$ 。

那么薄板样条函数可用来描述  $V$  到  $V'$  的空间变换关系

$$f(V) = V' = QA + KW \quad (1)$$

式中, $Q$ 为  $n \times 4$  矩阵, $Q = [1 \ V]$ ;  $K$ 为  $n \times n$  阶 TPS 核矩阵,它的每一行为  $n$  维向量  $K(v_i)$ ,对应每个  $v_i$ ,每个分量  $K_j(v_i) = |v_i - v_j|^2 \log(|v_i - v_j|^2)$ ;  $A$ 、 $W$  为  $4 \times 3$  系数矩阵,矩阵  $A = [A_x \ A_y \ A_z]$ ,其中  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  表示  $A$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分量; $n \times 3$  阶矩阵

$W = [W_x \ W_y \ W_z]$ , 其中  $W_x, W_y, W_z$  表示  $W$  在  $x, y, z$  方向的分量。定义  $n+4$  阶方阵

$$L = \begin{bmatrix} K & Q^T \\ Q & O \end{bmatrix}$$

通过方程

$$\begin{bmatrix} V' \\ O \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} W \\ A \end{bmatrix} \quad (2)$$

即可求得系数矩阵  $A, W$ 。

从式(1)可以看出,薄板样条函数有一个良好的性质,即函数  $f$  被分解成两部分变换:仿射变换  $QA$  和弯曲变换  $KW$ 。因此,如果需要考查点集矩阵  $V$  到  $V'$  的弯曲变形程度,那么只需考虑其弯曲变换  $KW$ 。考虑函数  $f$  的弯曲能

$$I_f = \text{tr}(W^T KW) \quad (3)$$

$I_f$  仅仅与  $KW$  有关,当系数矩阵  $W=0$  时,  $I_f=0$ ,  $f(x, y, z)$  成为平面。考察矩阵<sup>[4]</sup>

$$W^T KW = V'^T L_n^{-1} K L_n^{-1} V' = V'^T (L_n^{-1} K L_n^{-1}) V' \quad (4)$$

式中,  $L_n^{-1}$  是  $L^{-1}$  左上角  $n \times n$  子矩阵。

对矩阵  $L_n^{-1} K L_n^{-1}$  求特征值和特征向量

$$(L_n^{-1} K L_n^{-1}) \Phi_k = \lambda_k \Phi_k \quad (5)$$

式中,  $\lambda_k$  是  $L_n^{-1} K L_n^{-1}$  的第  $k$  个特征值,满足  $\lambda_k \neq 0$ ,  $\lambda_{k-1} > \lambda_k$ 。

对于某个  $\lambda_k (1 \leq k \leq m, m \leq n)$  对应的特征向量  $\Phi_k = [\varphi_1^{(k)}, \dots, \varphi_i^{(k)}, \dots, \varphi_n^{(k)}]$ , 可将  $\varphi_i^{(k)}$  看做是一条新的薄板样条函数的系数,该薄板样条函数可表示为  $K(v_i) \Phi_k^T$ 。另外,对于  $W$  在  $x, y, z$  方向的分量  $W_x, W_y, W_z$  也可看做3条薄板样条函数的系数,可分别表示为  $K(v_i) W_x, K(v_i) W_y, K(v_i) W_z$ 。从而,弯曲变换  $KW$  可以用特征向量  $\Phi_k$  重新表示为

$$KW = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \vdots \\ \Phi_k \\ \vdots \\ \Phi_m \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} p_{x1} & p_{y1} & p_{z1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{xk} & p_{yk} & p_{zk} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{xm} & p_{ym} & p_{zm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \vdots \\ \Phi_k \\ \vdots \\ \Phi_m \end{bmatrix}^T P \quad (6)$$

式中,  $P$  是  $m \times 3$  阶矩阵。

从式(6)可以看出,特征向量  $\Phi_k$  仅仅取决于特征点集  $V$ , 而与  $V'$  无关,并且与全局仿射变换无关,可看做反映弯曲变形的基,即 Principal Warps<sup>[7]</sup>。

在  $V$  确定的情况下,不同的弯曲可以用相同的特征向量表示,但系数  $P$  不同,  $P$  反映了弯曲的剧烈程度。结合  $\Phi_k$  对应的特征值  $\lambda_k$ , 可定义  $P$  的范数为

$$\|P\| = \sum_{k=1}^m \lambda_k (p_{xk}^2 + p_{yk}^2 + p_{zk}^2) \quad (7)$$

## 2 计算颅面几何相似度

### 2.1 选择颅面特征点

由于颅面点云数量巨大,因此需要选取特征点来进行具体计算。本文将颅面特征点分为两类。

一类是传统特征点,如鼻尖点、下眼眶缘点等。这些点具有明显的解剖学定义,其位置和数目的选择方法<sup>[2,3,9]</sup>比较多。

另一类是全局特征点,在颅面上均匀分布,数量大,可以较为准确的反映颅面的大小和几何形状。图1所示为某个颅面左前部的55、307、1347个全局特征点,可以看出,特征点数的增加会逐步显示出颅面的细节的特征。

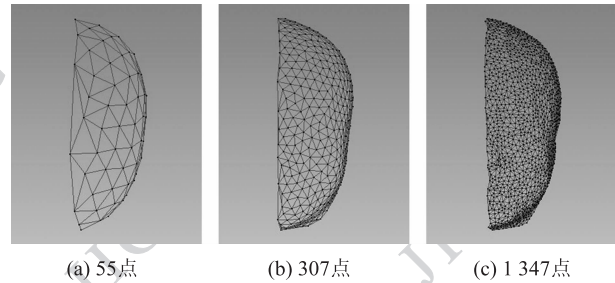


图1 颅面左前部的全局特征点

Fig. 1 Global landmarks of a left frontal cranioface

在实际操作中比较容易通过手工方法定位传统特征点,但这些点分布在颅面上若干特定位置,数目较少,不能很好地反映颅面的全局特征。在颅面相似度评估中,绝大多数志愿者认为判断颅面相似首先要看颅面的外形轮廓是否相似,其次才是颅面上五官位置等细节特征。所以本文使用全局特征点作为计算颅面相似度的参考特征点。

选择全局特征点的方法为:设有一个参考颅面  $RF$ ,  $N$  个样本颅面  $\{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ , 对  $RF$  进行均匀采样,将采样后的点集作为  $RF$  的全局特征点,对每一个样本颅面  $F_i$ , 将  $RF$  全局特征点与  $F_i$  距离最近的点作为  $F_i$  的全局特征点。

### 2.2 颅面相似度的距离公式

系数矩阵  $A$  表示了点的仿射变换,考虑到在颅面复原的数据采集阶段都需要将采集得到的数据统一到同一坐标系下,所以这里主要分析弯曲变换  $KW$  对变形的影响。

当考察两个颅面模型  $RF, F_1$  是否相似时,模型的整体形状、整体尺寸首先应该一致。基于以上考虑,选择  $RF$  作为参考颅面,将  $F_1$  看做目标颅面,用薄板样条函数计算  $RF$  上颅面特征点到  $F_1$  上颅面特征点之间的映射。根据第1部分的分析,由  $RF$  可以计算出仅与  $RF$  相关的  $\Phi_k (k=1, 2, \dots, m)$ ,  $RF$  到  $F_1$  的弯曲可以用矩阵  $P_{F_1}^{RF}$  表示。本文提出用式(7)中  $\|P_{F_1}^{RF}\|$  来衡量  $RF$  到  $F_1$  的弯曲程度,进行颅面间的相似性度量,颅面间的距离可描述为

$$d(RF, F_1) = \alpha \|P_{F_1}^{RF}\| \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为系数。两个颅面间的距离越小,就代表相似度越大。并且有

$$\|P_{RF}^{RF}\| = 0 \quad (9)$$

假设需要比较一个参考颅面  $RF$  和数据库中的  $N$  个样本颅面  $\{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ 。由于颅面相似度比较主要应用在刑侦、考古等领域,所以仅仅给出与  $RF$

最相似的一个颅面并不具有应用价值。本文设置一个阈值,称为可接受数  $\gamma, 0 \leq \gamma \leq N$ , 将算法计算出的前  $\gamma$  个样本作为可接受的结果,即与  $RF$  较相像的颅面。

### 3 实验结果与讨论

本文实验环境为 CeleronM 1.6 GHz CPU, 2 GB 内存, Windows XP, Matlab 7.0.1。实验数据来自包含 41 套 3 维颅面模型的 3 维颅面数据库,这些颅面模型均重构自 CT 医学图像数据,每个模型约有 5 000 个点。所有模型均调整到正面姿态,并使用 ICP 算法<sup>[9]</sup> 对齐。实验过程如下:

1) 每次实验均随机从 41 个样本的数据库中挑选 10 个样本,选取一个样本作为参考颅面  $RF$ , 其余 9 个颅面作为被比较颅面,以便于进行主观验证时志愿者能够快速从 9 个颅面中寻找出与  $RF$  较为相似的颅面。

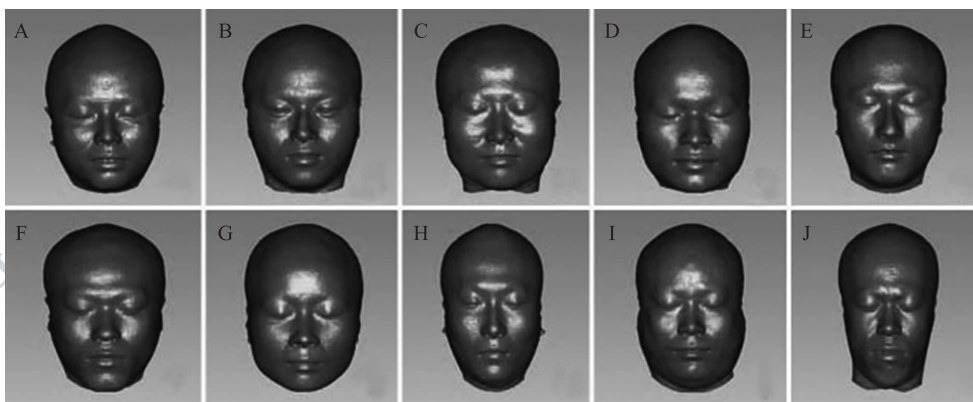


图2 样本颅面

Fig. 2 Craniofacial samples

2) 进行主观验证,以此结论作为一个参考。

3) 分别从击中率、运算时间方面对本文算法和 RACD 算法进行实验比较。

最后对全局特征点的选择问题进行讨论。

#### 3.1 主观验证法

随机挑选出如图 2 所示的 10 个样本颅面进行实验,选取样本 A 作为参考颅面  $RF$ , 颅面 B—J 作为比较颅面。

邀请 36 名大学一年级学生作为志愿者,请志愿者按照与 A 相似程度按从高到低的顺序对 9 个颅面进行排序,统计出 B—J 9 个颅面在某一个顺位被选择的次数,表 1 为统计结果。

根据表 1 的统计结果可以看出,在第 1 顺位被选择次数最多的是颅面 B,有 16 位志愿者认为颅面

B 与 A 最像,按照此方法对颅面 B—J 按照与 A 相似程度做一个排序,即 BFGDCEI HJ。设置可接受数  $\gamma=5$ ,将颅面 B—J 分为两类,与 A 相似的有 B、F、G、D、C;与 A 不相似的有 E、I、H、J。

表 1 主观验证法的统计结果

Table 1 Statistical results from subjective assessment

顺位	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	16	0	2	2	10	5	0	1	0
2	9	2	7	0	14	1	1	2	0
3	5	2	7	5	4	9	0	4	0
4	2	9	12	2	3	6	0	2	0
5	2	7	4	5	3	9	1	4	1
6	0	5	4	10	2	3	3	8	1
7	0	6	0	11	0	1	9	7	1
8	0	1	0	1	0	1	21	5	6
9	0	4	0	0	0	2	1	3	27

3.2 本文算法和 RACD 算法的比较

1) 运算结果与主观验证法的比较

选取 10 个样本颅面的左前部进行相似度计算,按照图 1 所示分别选择 55、307、1 347 个全局特征点。

表 2 所示为用本文算法和 RACD 算法分别计算参考颅面 *RF* 和全部 10 个颅面的相似度,本文

算法的参数  $\alpha$  在表 2 中具体给出,计算结果越小表明两个颅面越相似;RACD 算法的参数为  $\delta = \frac{\pi}{36}$ ,  $N = 55, N = 307, N = 1\ 347, \rho = 1$ , 该算法运算结果取值范围是  $[0, 1]$ , 1 表示最相似, 0 表示最不相似, 计算结果数值越大表明两个颅面越相似。

表 2 两种算法的运算结果  
Table 2 Computational results

特征点数	算法	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
55	本文 $\alpha = 10^5$	0	1.246 4	1.347 9	1.321 5	1.152 5	1.400 8	1.215 5	1.231 3	1.483 0	1.247 6
	RACD	1	0.873 5	0.872 9	0.873 3	0.874 9	0.873 6	0.873 2	0.873 3	0.872 7	0.873 2
307	本文 $\alpha = 10^6$	0	4.484 7	5.171 0	4.631 0	6.170 3	3.977 1	4.710 7	7.020 2	10.101 0	5.356 1
	RACD	1	1	0.997 4	0.999 6	0.998 2	1	0.999 9	0.993 6	0.610 8	0.999 7
1 347	本文 $\alpha = 10^3$	0	1.637 0	1.920 6	1.881 4	2.200 3	1.668 4	1.797 7	2.220 9	3.403 7	2.090 0
	RACD	1	0.918 6	0.205 4	0.192 6	0.193 0	0.960 8	0.910 0	0.848 6	0.174 9	0.890 4

从表 2 可以看出,两种算法均计算出与颅面 A 最相似的仍然是 A,将其余样本的计算结果按照最像到最不像进行排序,设置  $\gamma = 5$ ,得到表 3。

表 3 两个算法的比较结果  
Table 3 Comparison results

特征点数	算法	相似	不相似
55	本文算法	E G H B J	D C F I
	RACD	E F B D H	G J C I
307	本文算法	F B D G C	J E H I
	RACD	B F G J D	E C H I
1 347	本文算法	B F G D C	J E H I
	RACD	F B G J H	C E D I

从表 3 可以看出,两种算法对 55 个特征点运算的结果与 307、1 347 个特征点运算的结果差异较大,而对于 307、1 347 个特征点运算的结果,两种算法都计算出了 B、F、G 是与 A 相似的结果,E、I 是不像的结果,这与主观验证法的统计结果一致;两种算法对颅面 C、J、D 的结果有差别,与主观验证法对比,C 是处于 9 个颅面排序的中间位置,

既可作为与 A 相似的结果,也可作为不相似的结果。但是 RACD 算法对 D、J 的运算结果与主观验证法差别较大,本文的分类与主观验证法较为吻合。

2) 击中率的比较

在可接受数  $\gamma$  一定的情况下,可定义  $\chi$  为某一算法计算结果与主观验证法吻合的个数,该算法的击中率为

$$R = \frac{\chi}{\gamma} \times 100\% \quad (10)$$

当  $\gamma = 5$ ,特征点个数为 1 347 时,本文算法的击中率为 100%,RACD 算法的击中率为 60%。

以上实验是针对单个颅面的情况,对数据库中的 41 个样本逐个进行上述实验,挑选一个样本作为 *RF*,随机从数据库中选取 9 个样本颅面作为被比较颅面,逐一进行主观验证,用本文算法和 RACD 算法分别计算颅面相似度,选取 1 347 个全局特征点,参数设置同上,并计算击中率,如图 3 所示。图 4 为两个算法针对 41 个样本的击中率直方图比较。从图 4 可以计算出,本文算法和 RACD 算法的平均击中率分别为 0.707 3、0.682 9,本文算法的击中率要高于 RACD 算法。

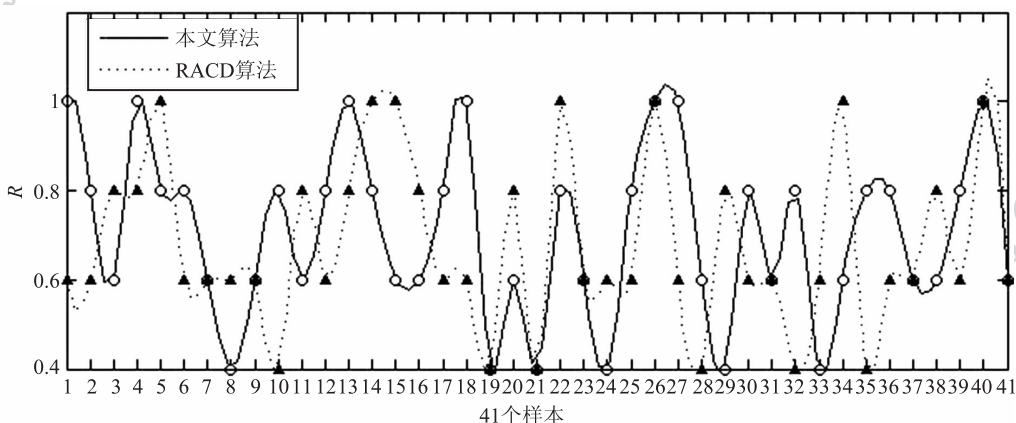


图3 两种算法41个样本的击中率

Fig.3 41 samples' hit-rates

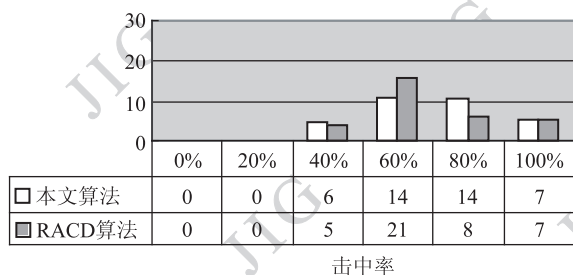


图4 两种算法击中率直方图比较

Fig.4 Comparison of hit-rate histograms

3) 运算平均时间比较

表4是两种算法运算参考颅面与一个样本颅面相似度的平均时间比较。

表4 运算平均时间比较

Table 4 Comparison of average calculating time

特征点数	运算时间/s	
	本文算法	RACD
55	0.093	0.718
307	2.281	22.063
1 347	196.98	476.59

由表4可见,随着特征点数目的增大,算法运行

时间也不断增长。对于不同数目的特征点,本文算法在运算时间上均优于 RACD 算法。

3.3 全局特征点的选择

从表3分析出,两种算法对55个特征点运算的结果与307、1 347个特征点运算的结果差异较大,这也说明了较少的特征点数无法反映出颅面的特征,影响了计算结果。当特征点数目增多时,计算结果与主观验证法的统计结果较为一致。

为了验证传统特征点的加入对本文算法的影响,本文选择将如图5所示的34个传统特征点<sup>[2]</sup>加入55、307、1 347个特征点中,用表2的参数重新计算针对颅面A的相似度,表5显示了计算结果。

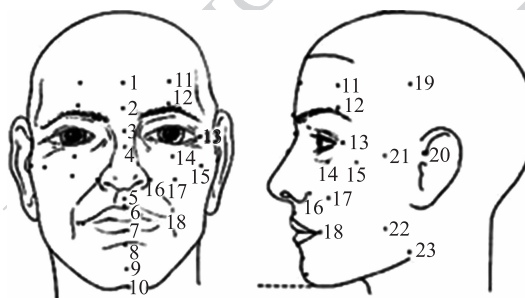


图5 34个传统特征点

Fig.5 34 traditional landmarks

表5 加入传统特征点的运算结果

Table 5 Computational results with traditional landmarks

特征点数	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
89	0	1.295 1	1.451 9	1.354 9	1.349 0	1.355 1	1.338 0	1.300 2	1.521 7	1.341 4
341	0	4.421 6	5.102 5	4.622 9	6.098 2	4.001 3	4.704 8	6.999 5	10.120 4	5.269 7
1 381	0	1.636 6	1.930 6	1.856 9	2.189 5	1.668 2	1.783 3	2.204 8	3.458 2	2.105 2

由表 5 按照 89、341、1 381 个特征点的计算结果对颅面 B—J 按照最像到最不像进行排序,依次为 BHGJEDFCI、FBDGCJEHI、BFGDCJEHI。通过与表 2、3 对比可知,加入传统特征点对 307、1 347 个特征点的运算影响不大,而对 55 个特征点影响很大。由此进一步验证了较少的特征点数无法反映出颅面的整体特征,随着特征点数量的增多,这些点能够反映出颅面的整体特征,所以传统特征点的加入对实验结果影响不大。

## 4 结 论

对颅面重构结果的相似度评估是颅面形态学研究中的重要环节,目前研究颅面相似性的文献较少,因此未能确立客观的评估标准,故颅面复原的相似度评估方法是一个值得研究的内容。

本文将颅面的相似度评估看做是待比较颅面到数据库中其余颅面的弯曲变形,利用弯曲变形的剧烈程度作为衡量颅面相似度的依据,将弯曲变形用待比较颅面的 Principal Warps 表示。通过该表示下不同的系数矩阵来衡量颅面间变形剧烈程度。在此基础上定义了颅面间几何相似度距离,最后给出了具体比较方法。

由于本文使用的样本有限,所以仍然需要更多的样本来对这个方法加以检验和修正;本文仅仅选择了颅面的弯曲作为两个颅面是否相似的衡量标准,未来需要选择更多颅面特征来进行颅面相似度比较。如果需要进行  $M$  个颅面和  $N$  个颅面的比较,那么按照本文方法就需要分别计算  $M$  个颅面的 Principal Warps,然后分别与  $N$  个颅面进行相似度计算,如果能够寻找一个标准参考面,用这个标准参考面计算出其到所有颅面的矩阵  $P$ ,那么计算量会大大降低,这将是未来的主要工作方向。另外,选择多少全局特征点进行颅面相似度计算即可满足计算的需要,这也是未来需要探讨的问题。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Claes P, Vandermeulen D, Greef D S, et al. Statistically deformable face models for cranio-facial reconstruction [ J ]. Journal of Computing and Information Technology, 2006, 14: 21-30.
- [ 2 ] Vanezis M. Forensic Facial Reconstruction Using 3-D Computer Graphics: Evaluation and Improvement of its Reliability in Identification [ D ]. Glasgow: University of Glasgow, 2008.
- [ 3 ] Claes P, Vandermeulen D, Greef D S, et al. Craniofacial reconstruction using a combined statistical model of face shape and soft tissue depths: Methodology and validation [ J ]. Forensic Science International, 2006, 159: 147-158.
- [ 4 ] Starbuck M J, Ward E W. The affect of tissue depth variation on craniofacial reconstructions [ J ]. Forensic Science International, 2007, 172: 130-136.
- [ 5 ] Zhou M Q, Geng G H, Fan J B. Computer aided forensic facial reconstruction [ J ]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1997, 27(5): 10-13. [ 周明全, 耿国华, 范江波. 计算机辅助的颅骨面貌复原技术 [ J ]. 西北大学学报: 自然科学版, 1997, 27(5): 10-13. ]
- [ 6 ] Feng J, Horace H S, Lap Y L, et al. Robust point correspondence matching and similarity measuring for 3D models by relative angle-context distributions [ J ]. Image and Vision Computing, 2008, 26(6): 761-775.
- [ 7 ] Li N. Research and implementation of three-dimensional craniofacial measurement and similarity assessment [ D ]. Xi'an: Northwest University, 2011. [ 李楠. 三维颅面测量及其相似度评估方法的研究与实现 [ D ]. 西安: 西北大学, 2011. ]
- [ 8 ] Bookstein L F. Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(6): 567-585
- [ 9 ] Li K. Research on the Technique of Face Modeling Based on Skeletal Remains and Appliance to Forensic Facial Reconstruction [ D ]. Xi'an: Northwest University, 2006. [ 李康. 基于颅骨的人脸建模技术研究及在法医面貌复原中的应用 [ D ]. 西安: 西北大学, 2006. ]
- [ 10 ] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.