

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、培训与社会公益事业。

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: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0546-07

论文引用格式: 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维. 融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 546-552

## 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

南方医科大学生物医学工程学院, 广州 510515

**摘要:** 提出一种基于图像特征的一致点漂移匹配方法进行3维形状点集对齐, 在匹配过程中结合点的几何空间信息和图像特征信息构造目标函数, 依据点之间的图像特征差异调整原始一致点漂移匹配方法中的高斯混合模型。使用3维前列腺和肝脏点集进行匹配的仿真实验, 结果表明本文方法可有效减少匹配误差, 其中肝脏点集匹配误差从1.84 mm降低到1.54 mm, 前列腺点集匹配误差从0.83 mm降低到0.60 mm。利用本文提出的形状点集对齐方法建立活动外观模型, 对3维前列腺CT图像进行分割, 分割精度有一定提高, 即体素正确覆盖率从88.7%提高到90.2%。

**关键词:** 活动外观模型; 点集匹配; 高斯混合模型; 特征信息

### Coherent point drift registration combined with image feature and its application

Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei

School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

**Abstract:** A key step of constructing an active appearance model is acquiring a set of appropriate training shapes with well-defined correspondences. In this paper, we introduce a new point correspondence method (FB-CPD), which can improve the accuracy of the coherent point drift (CPD) by using the image feature information. The objective function of the proposed method is defined by both of the geometric spatial information and the image feature information. The original Gaussian mixture model in the CPD is modified according to the image feature of the points. FB-CPD is tested on the three-dimensional prostate and liver point sets through the simulation experiments. The registration error can be reduced efficiently by FB-CPD. Moreover, the active appearance model constructed by FB-CPD can obtain fine segmentation, in three-dimensional CT prostate images. Compared with the original CPD, the overlap ratio of voxels was improved from 88.7% to 90.2% by FB-CPD.

**Key words:** active appearance model; point set registration; Gaussian mixture model; feature information

## 0 引言

近年来,用于图像解释与分析的活动外观模型(AAM)<sup>[1-3]</sup>是一种有效的方法,它能够通过控制模

型参数产生有效的表面来解释新的图像。构建活动外观模型,主要有以下几个步骤:1)形状表示,不同的图像获取方式有不同的形状表示方法,这是建立模型的基础,目前主流的是用标记点表示;2)找出训练形状之间的解剖对应关系;3)从训练样本中

收稿日期:2011-08-25;修回日期:2011-12-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)基金项目(2010CB732505);国家自然科学基金青年基金项目(30900380)

第一作者简介:张久楼(1988—),男,现为南方医科大学生物医学工程学院硕士研究生,主要研究方向为医学图像分析。E-mail:jiulou.zhang@gmail.com

获得平均形状和一组形状变换方式,这需要对训练样本进行对齐以及降维处理;4)提取图像的纹理特征建立外观模型;5)结合形状和外观模型建立活动外观模型。上述的所有步骤中,在训练样本中建立形状标记点之间的对应关系是构建活动外观模型最具有挑战性的部分,也是影响模型质量的主要因素。

研究人员已经提出了多种建立点集之间对应关系的方法,如最近邻点迭代法(ICP)<sup>[4-5]</sup>、软分配海盜算法<sup>[6]</sup>等等。在这些方法中,形状通常用数量不等的点集表示,并寻找最佳的相似变换。但相似变换对点集的形变进行了过度约束,对形状比较接近的训练集如骨骼等比较有用,匹配差异较大的形状则性能较差甚至错误。一致点漂移匹配方法(CPD)<sup>[7]</sup>采用不同的思路,不寻找相似变换,用于建立点集之间的对应关系效果良好。CPD方法中,点集的空间位置分布采用高斯混合模型表达,将两个点集的匹配视为一个最大后验概率问题。

一般的点集对齐方法,包括CPD,都仅利用形状中点的空间位置信息进行形状点集对齐。然而,活动外观模型解释图像不仅利用形状信息还利用了图像特征,如纹理信息。形状中对应点的图像特征实际上也具有一定的关联,相关信息可能有助于进行点集的对齐。同时利用空间位置信息和图像特征信息进行点集对齐,有可能会使最终的活动外观模型更加准确、紧凑。基于此,提出在一致点漂移匹配方法中融入图像特征信息,利用图像特征实现对高斯混合模型的调整,使得图像特征近似点的匹配概率相对变大,以期提高点集匹配的精度和最终活动外观模型的分割精度。

## 1 一致点漂移匹配

点集匹配的目标是找到两个点集之间的对应关系,即让其中一个点集映射到另一个点集。在图1中描述了一个简单的面部点集匹配问题。点集中的点一般都是从图像中获得的特征点,如形状边角位置、边界点或者凸出区域。

CPD方法认为两个点集的匹配是一个概率密度估计问题,其中一个点集用高斯混合模型(GMM)的形心来表示,另一个则用数据点表示。通过最大化似然估计将GMM形心匹配到数据点集,最终两

个点集对齐并且使用GMM后验概率获得点集之间的对应关系。

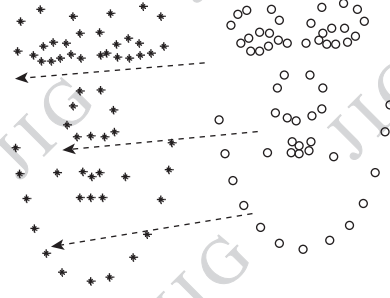


图1 面部点集匹配示意图

Fig.1 Schematic diagram of face point set registration

文中使用的部分数学符号进行说明如下:

- 1)  $D_1, D_2$  分别表示几何空间信息与图像特征信息维数;
- 2)  $N, M$  分别为  $X, Y$  点集中点的数量;
- 3)  $T(Y, \theta)$  为应用于  $Y$  的变换,  $\theta$  为一组变换参数;
- 4)  $\mathbf{1}$  是元素均为 1 的矩阵;
- 5)  $\mathbf{d}(a)$  是由向量  $a$  形成的对角矩阵;
- 6)  $\beta$  定义了正则化时高通滤波的宽度。

设点集  $Y$  为高斯混合模型形心,点集  $X$  作为高斯混合模型产生的数据点,高斯混合模型的概率密度函数表示为

$$p(x) = \sum_{m=1}^{M+1} P(m)p(x|m) \quad (1)$$

式中,  $p(x|m) = \exp(-\|x-y_m\|^2/(2\sigma^2))/(2\pi\sigma^2)^{D_1/2}$ 。为了近似解释点集中的噪声和异常值,将一项均匀分布  $p(x|M+1) = 1/N$  加入到混合模型中。对于高斯混合模型中的每个成分,使用相同的各向同性协方差  $\sigma^2$  以及相同的成员概率  $P(m) = 1/M$ 。如果视均匀分布的权重为  $\omega, 0 \leq \omega \leq 1$ ,那么混合模型的形式就可以写为

$$p(x) = \omega \left( \frac{1}{N} \right) + (1 - \omega) \sum_{m=1}^M \left( \frac{1}{M} \right) p(x|m) \quad (2)$$

使用一组参数  $\theta$  对高斯混合模型的形心位置重新进行参数化,并且通过最大似然函数或者最小负对数似然函数估算这些参数:

$$E(\theta, \sigma^2) = - \sum_{n=1}^N \lg \sum_{m=1}^{M+1} P(m)p(x_n|m) \quad (3)$$

规定两点  $x_n$  和  $y_m$  的对应概率为高斯混合模型形心

的后验概率,即

$$P(m | x_n) = P(m)p(x_n | m)/p(x_n)$$

参数  $\theta$  和  $\sigma^2$  的估算,可采用期望最大化算法。

第 1 步(E 步):估计出初始参数值(旧参数),并计算混合成分的后验概率分布  $P_{\text{old}}(m | x_n)$ 。第 2 步(M 步):新的参数值通过最小化负对数似然函数计算

$$Q = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} (P_{\text{old}}(m | x_n) \times \lg(p_{\text{new}}(m)p_{\text{new}}(x_n | m))) \quad (4)$$

E 步与 M 步交替迭代直到收敛为止。如果忽略与  $\theta, \sigma^2$  无关的常数,则可将上式重新写成:

$$Q(\theta, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} P_{\text{old}}(m | x_n) \|x_n - T(y_m, \theta)\|^2 + \frac{D_1 N_p}{2} \lg \sigma^2 \quad (5)$$

式中,  $T$  是  $Y$  点集的变换函数,

$$N_p = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P_{\text{old}}(m | x_n) \leq N, P_{\text{old}} \text{ 为后验概率:}$$

$$P_{\text{old}}(m | x_n) = \frac{\exp\left(-\frac{\|(x_n - T(y_m, \theta_{\text{old}}))\sigma_{\text{old}}\|^2}{2}\right)}{\sum_{k=1}^M \exp\left(-\frac{\|(x_n - T(y_k, \theta_{\text{old}}))\sigma_{\text{old}}\|^2}{2}\right) + c} \quad (6)$$

式中,  $c = (2\pi\sigma^2)^{\frac{D_1}{2}} \left(\frac{\omega}{1-\omega}\right) \frac{M}{N}$ 。

## 2 基于图像特征的 CPD

### 2.1 融合图像特征

用于构建外观模型的图像特征有很多种<sup>[8-9]</sup>, 主要分为两类:基于区域和基于边界的特征。本文采用基于边界特征:在图像中每个标记点的法线方向上按照适当的间隔进行取样,可以获得灰度值、梯度值或者两者的组合,如图 2 所示。在进行图像特征的取样时,由于相同解剖位置的周围组织都是一样的,即使采用不同间隔,每幅图像获得的特征值差别也比较小。因此间隔的大小对于最终的匹配结果并无太大影响,我们将在本文的第 3 部分根据仿真实验给出相应的结论。本文中图像特征采用灰度值,并且以间隔为 1 mm 于外部与内部均取 10 个点,加上边界点共 21 个。

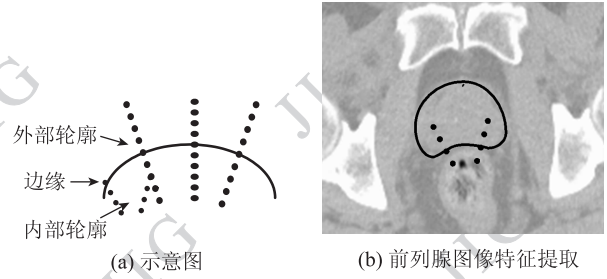


图 2 基于边界特征的选取  
Fig. 2 Choice of feature based on image boundary

一般情况下,医学图像中相同解剖位置的图像特征是比较相似的。在点匹配过程中添加图像特征信息,期望可以使点的对应关系更加准确。两个点的图像特征差异大,则这两个点是对应点的概率应较小,可以根据图像特征差异的大小调整特征信息在匹配过程中起的作用大小。这样,可在求解 CPD 高斯混合模型的后验概率时融入一个图像特征项:

$$\Gamma(n, m) = \exp(-\|F_{x_n} - F_{y_m}\|^2 / (2\rho\delta^2))$$

式中,  $F_{x_n}$  与  $F_{y_m}$  分别表示点  $x_n$  和  $y_m$  的图像特征,  $\rho$  表示特征权重,  $\delta$  是根据图像特征计算获得的一个常数。添加图像特征信息后的后验概率就变为

$$P_{\text{old}}(m | x_n) = \frac{\exp\left(-\frac{\|(x_n - T(y_m, \theta_{\text{old}}))\sigma_{\text{old}}\|^2}{2}\right) \Gamma(n, m)}{\sum_{k=1}^M \exp\left(-\frac{\|(x_n - T(y_k, \theta_{\text{old}}))\sigma_{\text{old}}\|^2}{2}\right) \Gamma(n, m) + c} \quad (7)$$

可以看出,点  $x_n$  和  $y_m$  图像特征差异较小时,式(7)中的后验概率值相对式(6)会有所增加。

### 2.2 正则化约束

设点集  $Y$  的形变函数(空间变换)为初始位置加上位移函数  $v$ :

$$T(Y, v) = Y + v(Y) \quad (8)$$

为了使邻近点倾向于一致的移动以保持点集的拓扑结构,需要对位移函数  $v$  进行正则化<sup>[10-11]</sup>约束。采用运动一致性理论<sup>[12]</sup>,在负对数似然项中添加正则项,可得

$$f(v, \sigma^2) = E(v, \sigma^2) + \frac{\lambda}{2} \phi(v) \quad (9)$$

$E(v, \sigma^2)$  为负对数似然估计函数式(3),  $\phi(v)$  是正则项,  $\lambda$  是平衡参数。下面介绍  $\phi(v)$  的具体形式。设再生核希尔伯特空间(RKHS)中  $v$  的范数为

$$\|v\|_{H^m}^2 = \int_{\mathbb{R}^D} \frac{|\tilde{v}(s)|^2}{\tilde{G}(s)} ds \quad (10)$$

式中,  $G$  是与 RKHS 相关的唯一核函数并且  $\tilde{G}$  是其傅里叶变换,  $\tilde{v}$  为函数  $v$  的傅里叶变换,  $s$  为频域变量。正则化理论使用函数的震荡属性描述其平滑性, 一个函数震荡的越小即它在高频有更小的能量则说明该函数越平滑。通过高通滤波可以过滤函数的高频成分而获得它的剩余能量。在式(10)中  $\tilde{G}$  表示同步正定低通滤波, 当  $\|s\| \rightarrow \infty$  时它接近于零, 因此可以将其视为位移函数的正则化项。为了方便, 正则化项写成  $\phi(v) = \|v\|_{H^m}^2 = \|Lv\|^2$ , 操作符  $L$  对函数的一部分即高频成份进行正则化<sup>[13]</sup>。

### 2.3 变分法求解

对位移函数进行正则化后的负对数似然估计可以写成

$$Q(\theta, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} (P_{\text{old}}(m | x_n) \|x_n - (y_m + v(y_m))\|^2) + \frac{N_p D_1}{2} \lg \sigma^2 + \frac{\lambda}{2} \|Lv\|^2 \quad (11)$$

使用变分法求解  $v$  的函数形式, 对式(11)进行最小化(M步)。因此, 位移函数  $v$  必须满足欧拉-拉格朗日微分方程:

$$\frac{1}{\sigma^2 \lambda} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (P_{\text{old}}(m | x_n) (x_n - (y_m + v(y_m))) \delta(z - y_m)) = \hat{L}Lv(z)$$

对于所有向量  $z$ ,  $\hat{L}$  是  $L$  的伴随算子。那么, 可以通过微分方程求解获得位移函数

$$v = \left( \frac{1}{\sigma^2 \lambda} \right) \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (P_{\text{old}}(m | x_n) (x_n - (y_m + v(y_m)))) G(z, y_m) = \sum_{m=1}^M W_m G(z, y_m) \quad (12)$$

式中,  $W_m = \left( \frac{1}{\lambda \sigma^2} \right) \sum_{n=1}^N P_{\text{old}}(m | x_n) (x_n - (y_m + v(y_m)))$ 。在  $y_m$  点计算式(12)可以获得系数  $W_m$

$$(G + \lambda \sigma^2 d^{-1}(\mathbf{P1})) \mathbf{W} = d^{-1}(\mathbf{P1}) \mathbf{P}\mathbf{X} - \mathbf{Y} \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{W}_{M \times D_1} = (W_1, \dots, W_M)^T$  是系数矩阵,  $\mathbf{G}_{M \times M}$  是元素为

$$g_{ij} = G(y_i, y_j) = \exp(-\|(y_i - y_j)/\beta\|^2/2)$$

的核矩阵,  $d^{-1}(\cdot)$  是对角矩阵的逆,  $\mathbf{P1}$  为后验概率  $\mathbf{P}$  与元素均为 1 的矩阵的乘积。转换后的  $y_m$  位置根据  $\mathbf{T} = \mathbf{T}(\mathbf{Y}, \mathbf{W}) = \mathbf{Y} + \mathbf{G}\mathbf{W}$  确定。通过使  $Q$  对应的微分等于零可以获得

$$\sigma^2 = \frac{1}{D_1 N_p} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \|x_n - T(y_m, \mathbf{W})\|^2 \quad (14)$$

通过上面的论述, 可以将基于特征的一致点漂移匹配(FB-CPD)算法的流程总结如下:

#### 1) 初始化

$$\mathbf{W} = \mathbf{0}, 0 \leq \omega \leq 1, \beta > 0, \lambda > 0, \rho > 0$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{D_1 MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \|x_n - y_m\|^2$$

$$\delta^2 = \frac{10^4}{D_2 MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \|F_{x_n} - F_{y_m}\|^2$$

#### 2) 构建 $\mathbf{G}$

$$g_{ij} = \exp(-\|(y_i - y_j)/\beta\|^2/2)$$

#### 3) 期望最大化, 重复下面过程直到收敛:

##### E步

计算后验概率  $\mathbf{P}, P_{mn} = P_{\text{old}}(m | x_n)$ 。

##### M步

$$(\mathbf{G} + \lambda \sigma^2 d(\mathbf{P1})^{-1}) \mathbf{W} = d(\mathbf{P1})^{-1} \mathbf{P}\mathbf{X} - \mathbf{Y}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}(\mathbf{Y}, \mathbf{W}) = \mathbf{Y} + \mathbf{G}\mathbf{W}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{D_1 N_p} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \|x_n - T(y_m, \mathbf{W})\|^2$$

#### 4) 匹配后位置为 $\mathbf{T} = \mathbf{T}(\mathbf{Y}, \mathbf{W}) = \mathbf{Y} + \mathbf{G}\mathbf{W}$

## 3 实验与结果分析

实验用到的肝脏 3 维 CT 图像为 2007 年 MICCAI 肝图像分割挑战赛中的训练数据集 (<http://www.miccai2007.org/workshops/>), 前列腺 3 维 CT 图像由南方医科大学南方医院提供。肝脏和前列腺轮廓由医学专家手动勾画得到, 使用 ISO2Mesh 网格生成算法 (<http://iso2mesh.sourceforge.net/cgi-bin/index.cgi>) 将脏器 3 维表面形状转化为 3 维点集数据。通过调整网格生成算法的参数获得数量不同的点集, 为了减小计算时间, 将点集中点的数量控制在 1 000 ~ 2 000 之间, 表 1 列出了实验中点的数目。每个点的图像特征为 21 维灰度剖面。进行仿真实验时,  $\mathbf{X}$  是由原始点集随机删除部分点, 待匹配点集  $\mathbf{Y}$  由原始点集经过绕 Y 轴旋转 15 度且添加均值为 0 方差为 0.2 的高斯噪声获得。并且  $\mathbf{Y}$  的图像特征在归一化后添加均值为 0 方差为 0.01 的高斯噪声。点集的匹配误差定义为匹配后对应点之间欧氏距离的平均值, 单位为 mm, 当两个对应点之间的欧氏距离小于 1 mm 时则认为这两个点匹配正确。算法使用 Matlab 实现, 在 Pentium4 CPU3.00 GHz 处理器、1.25 G 内存 PC 机上进行计算。

表 1 仿真实验数据信息

Table 1 Data information of the simulation experiment

点集编号	部位	点数量
1	前列腺	1 054
2	肝脏	1 887
3	前列腺	1 020

3.1 匹配结果对比

对肝脏、前列腺 3 维点集数据,分别采用一致点漂移匹配、经典 ICP 和本文提出的 FB-CPD 方法进行匹配。在前列腺点集(编号 1)匹配实验中,点集 X(红色)是从原始点集中随机删除 273 个点获得。图 3 为 FB-CPD 的迭代过程中点集 Y(蓝色)的空间变换。

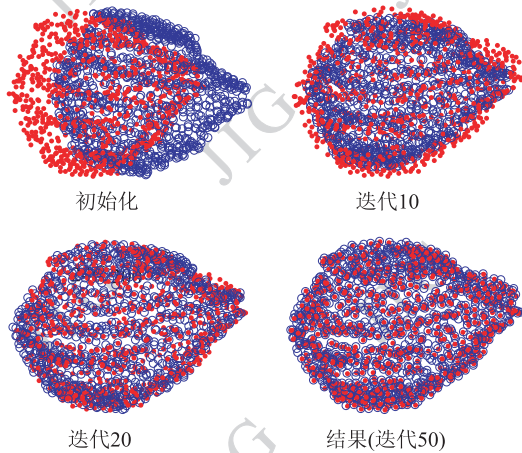


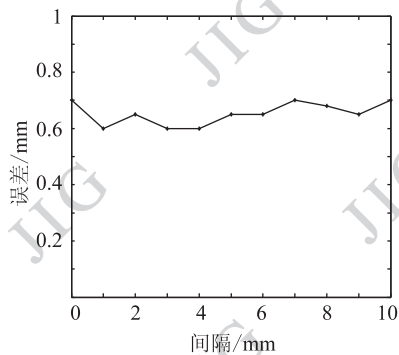
图 3 融合特征的一致点漂移匹配迭代过程  
Fig. 3 The iteration process of FB-CPD registration

同时,使用该前列腺点集(编号 1)讨论图像特征取样间隔以及参数  $\beta, \lambda$  对于 FB-CPD 算法性能的影响。从图 4 可以看出,当  $\beta$  在  $[2, 3.5]$ ,  $\lambda$  在  $[0.1, 4]$  之间取值时算法可得到比较好的效果;取样间隔的大小对匹配结果误差影响比较小。为了能够进行定量的分析,在后续仿真实验中均取  $\lambda = 3, \beta = 2$ 。

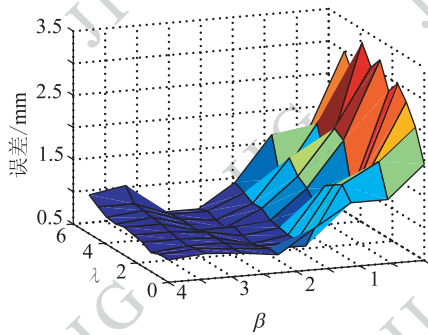
图 5 中使用肝脏数据点集(编号 2), Y(蓝色)匹配到 X(红色),其中 X 点集从原始点集随机删除 430 个点获得。当参数  $\rho$  调节至  $[10, 15]$  之间, FB-CPD 的匹配误差平均为 1.54 mm 比 ICP 减少近 3.5 mm, 比 CPD 减少近 0.3 mm;正确匹配点数量为 1 563 较 ICP 增加 798 点,较 CPD 增加 88 点。图 6 中使用的是前列腺数据点集(编号 3), Y(蓝色)匹配到 X(红色),其中 X 点集从原始点集随机删除 243 个点。当参数  $\rho$  调节至  $[15, 20]$  之间, FB-CPD 的匹配误差平均为 0.6 mm 比 ICP 减少近 1.4 mm, 比 CPD 减少近 0.23 mm;正确匹配点数量为 815 较 ICP 增加 449 点,较 CPD 增加 119 点。

3.2 分割结果对比

为比较使用不同形状点集匹配方法建立的活动外观模型的分割性能,使用了 3 组前列腺数据集进行实验。每组数据集包含特定病人在不同治疗时间段的 16 幅 CT 图像,其中 13 幅图像用于构建活动外观模型,剩余的 3 幅作为测试图像。点集对应关系分别采用 FB-CPD 与 CPD 建立,活动外观模型训练和分割的其他步骤均采用文献[9]的方法。构建活动外观模型以及用于分割的基本步骤为:1)对训练集中手工分割结果使用 ISO2Mesh 网格生成算法获得 3 维点集;2)任选一个 3 维点集作为模板,通过



(a) 取样间隔对算法的影响



(b) 参数  $\lambda$  与  $\beta$  对算法的影响

图 4 取样间隔以及参数  $\beta, \lambda$  对 FB-CPD 算法的影响

Fig. 4 The effect of FB-CPD by interval of sampling and  $\beta, \lambda$

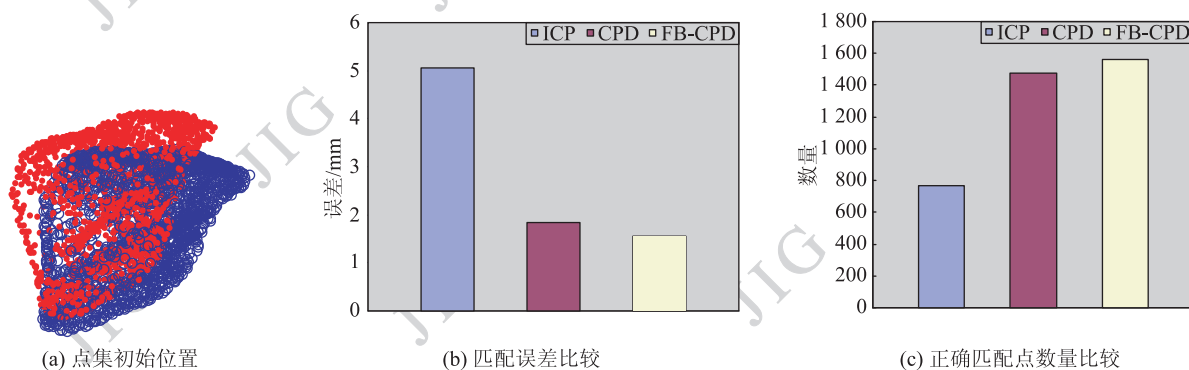


图5 肝脏点集不同匹配方法比较

Fig. 5 Comparison with different registration methods on liver point set

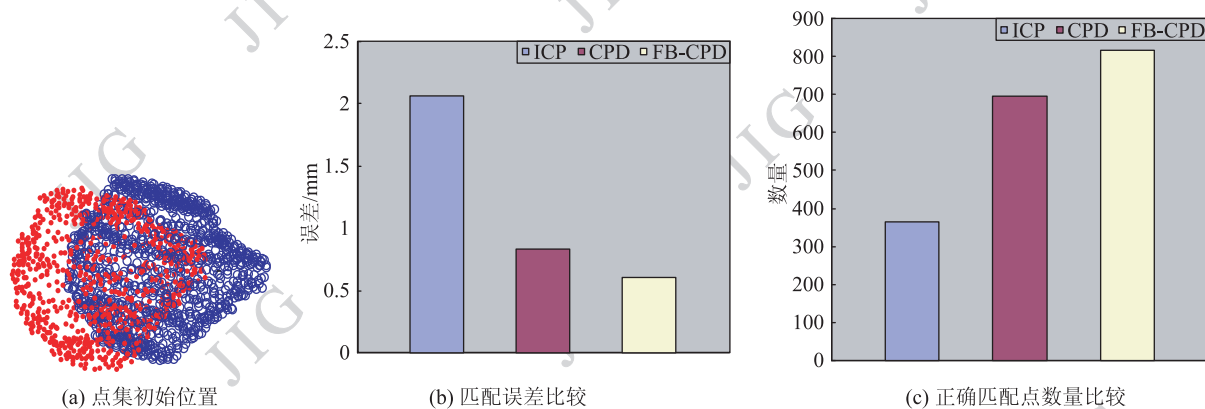


图6 前列腺点集不同匹配方法比较

Fig. 6 Comparison with different registration methods on prostate point set

FB-CPD 或 CPD 匹配到其他点集上获得解剖对应关系;3)使用主成分分析进行降维,并获得平均形状和形状变换方式,建立形状模型;4)建立纹理特征模型;5)结合形状模型以及纹理模型建立活动外观模型。

实验中采用表面平均距离(ASD)和体素错误覆盖率(OE)<sup>[7]</sup>两个度量评价分割的精度。表2列出了不同活动外观模型在3组前列腺图像数据上分割

表2 不同方法分割结果对比

Table 2 Contrast of segmentation results with different methods

Dataset	方法	Mean ± std/mm	Min/mm	Max/mm	OE/%
1	CPD	1.642 ± 1.194	0.002	5.421	11.3
	FB-CPD	1.647 ± 1.169	0.001 7	5.315	9.8
2	CPD	2.227 ± 2.220	0.004	6.866	14.8
	FB-CPD	2.201 ± 2.251	0.006	6.684	13.8
3	CPD	1.778 ± 1.438	0.000 8	5.588	8.2
	FB-CPD	1.714 ± 1.438	0.000 9	5.544	8

的精度。图7显示了典型的分割结果,FB-CPD 要比 CPD 方法更加接近专家勾画的轮廓。

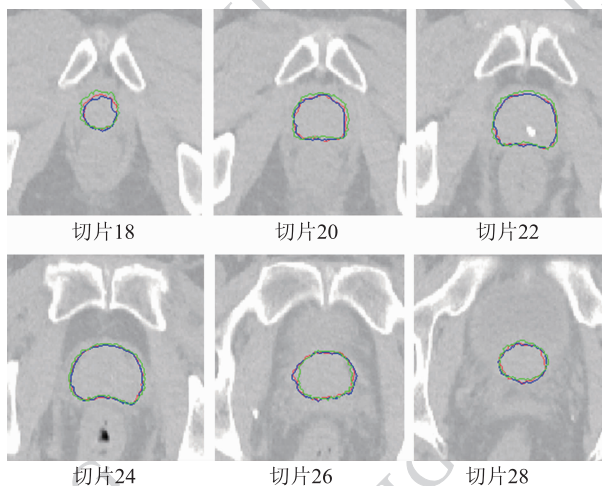


图7 第2组数据集第11幅图像的分割结果

Fig. 7 Contrast of segmentation results for 11th image of the second data set

## 4 结 论

本文提出了在一致点漂移匹配算法中融入图像特征信息,提高 3 维形状点集匹配的精度,建立更为合理的活动外观模型,以提高其分割性能。在肝脏和前列腺 3 维点集上进行仿真实验,结果表明本文方法可有效减小的匹配误差。由本文方法建立点集对应关系,进而训练活动外观模型对临床真实图像数据进行分割,分割的精度同样也能够得到提高。

从实验结果看,融入图像特征信息的一致点漂移匹配算法在一定程度上减少了匹配误差,但是算法参数需要根据经验来进行调节,以避免匹配陷入局部极小值点。依据点集数据和图像特征的特性自适应选取算法参数的方法,仍需要在后续的工作中进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Heimann T, Meinzer H P. Statistical shape models for 3D medical image segmentation: A review [ J ]. *Medical Image Analysis*, 2009, 13(4) : 543-563.
- [ 2 ] Cootes T F, Edwards G J, Taylor C. Active appearance models [ J ]. *IEEE Transactions Pattern Anal. Machine Intell.*, 2001, 23(6) : 681-685.
- [ 3 ] Du Z J, Wang Y S. Dynamic facial expression synthesis by active appearance model [ J ]. *Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics*, 2009, 21(11) : 1590-1594. [ 杜志军,王阳生. 利用主动外观模型合成动态人脸表情 [ J ]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(11) : 1590-1594. ]
- [ 4 ] Zhang Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces [ J ]. *Int'l J. Computer Vision*, 1994, 13(2) : 119-152.
- [ 5 ] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm [ J ]. *Proceedings Int'l Conference 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001 : 145-152.
- [ 6 ] Rangarajan A, Chui H, Bookstein F. The softassign procrustes matching algorithm [ C ] // *Proceedings of the 15th International Conference on Information Processing in Medical Imaging*. Vermont, USA: Springer Berlin, 1997 : 29-42.
- [ 7 ] Myronenko A, Song X B. Point set registration: coherent point drift [ J ]. *IEEE Transactions Pattern Anal. Machine Intell.*, 2010, 32(12) : 2262-2275.
- [ 8 ] Brejl M, Sonka M. Object localization and border detection criteria design in edge-based image segmentation: automated learning from examples [ J ]. *IEEE Transactions Medicine Imaging*, 2000, 19(10) : 973-985.
- [ 9 ] Feng Q J, Foskey M, Chen W F, et al. Segmenting CT prostate images using population and patient-specific statistics for radiotherapy [ J ]. *Medical Physics*, 2010, 37(8) : 4121-4132.
- [ 10 ] Chen Z, Haykin S. On different facets of regularization theory [ J ]. *Neural Computation*, 2002, 14(12) : 2791-2846.
- [ 11 ] Wang Y, Liang D N, Guo H W. SAR image enhancement using modified regularization method [ J ]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(9) : 1307-1309. [ 王岩,梁甸农,郭汉伟. 基于改进正则化方法的 SAR 图像增强技术 [ J ]. 电子学报, 2003, 31(9) : 1307-1309. ]
- [ 12 ] Yuille A L, Grzywacz N M. A mathematical analysis of the motion coherence theory [ J ]. *International Journal of Computer Vision*, 1989, 3(2) : 155-175.
- [ 13 ] Scholkopf B, Smola A J. *Learning with Kernels* [ M ]. Boston: MIT Press, 2002 : 87-122.