JIG
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS
主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
09
VOL.18
ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

城市交通规划 *P1197*

中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）

第18卷第9期（总第209期）
2013年9月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
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
邮政信箱 北京9718信箱
邮　　编 100101
电子信箱 jig@irsa.ac.cn
电　　话 010-64807995 010-82614429
网　　址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订　　购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
P.O.Box 9718, Bejing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@irsa.ac.cn
Telephone 010-64807995 010-82614429
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048,P.R.China))
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 50.00元

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

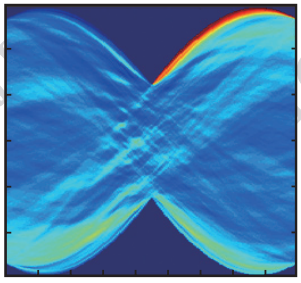
2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

© 中国图象图形学报版权所有

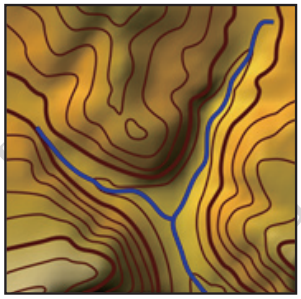
2013年9月 第18卷 第9期（总第209期）
中国图象图形学报
Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

目次

等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪(第1107页)



归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪(第1164页)



DEM保真精度定量化描述模型(第1206页)

综述

高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述
秦昆，陈一祥，甘顺子，冯霞，任文力 …… 1055
简缩极化SAR数据信息提取与应用
张红，谢镭，王超，张波，吴樊，汤益先 …… 1065

图像处理和编码

融合CCCTI码和谱系聚类的仿射配准
张桂梅，江少波，刘丕玉，张松 …… 1074
面向虚拟视点绘制的深度图滤波及上采样方法
高凯，陈贺新，赵岩，耿英楠，王钢 …… 1085

图像分析和识别

包空间多示例图像自动分类
王科平，杨艺，王新良 …… 1093
表情和姿态的双模态情感识别
闫静杰，郑文明，辛明海，邱伟 …… 1101
等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪
程旭，李拟珺，张索非，吴镇扬 …… 1107
改进后的TLD视频目标跟踪方法
周鑫，钱秋朦，叶永强，王从庆 …… 1115
多特征稳健主成分分析的视频运动目标分割
甘超，王莹，王向阳 …… 1124
融合全局最好和声搜索算法的模糊C均值聚类图像分割
崔兆华，高立群，欧阳海滨，李文娜 …… 1133
从运动中恢复目标结构的改进因子分解法
邱少华，文贡坚，回丙伟，张鹏 …… 1142

计算机图形学

并行扫描转换结构中的状态管理
殷诚信，韩俊刚，黄虎才 …… 1149

医学图像处理

3维颅骨表面模型的复杂孔洞修补
包佳蕊，梁荣华，吴福理，黄鲜萍，蒋莉，陈矛 …… 1156
归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪
李乔亮，李振宇，张会生，张小飞，陈昕，陈思平，汪天富 …… 1164

遥感图像处理

改进的多光谱双边滤波图像融合
吴川，杨冬 …… 1170
长度归一化扫描的合成孔径雷达图像船舶尾迹恒虚警率检测
南杰，张红，王超，吴樊，张波 …… 1176

地理信息技术

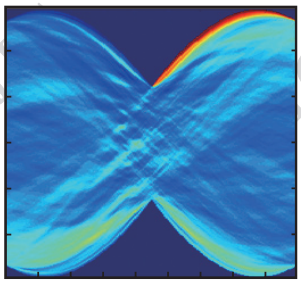
3D可视化输电线路中杆塔空间挂点计算
何国辉，周聪 …… 1184
地图符号服务与地图服务的耦合
焦东来，张海涛，闾国年，姜杰 …… 1190
不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响
段滢滢，陆锋 …… 1197
DEM保真精度定量化描述模型
张锦明，游雄 …… 1206

© 中国图象图形学报版权所有

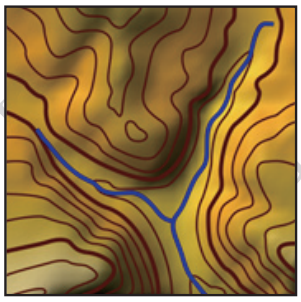
Volume 18, Number 9
Published September 16, 2013

CONTENTS
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization(P1107)



Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure (P1164)



Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy(P1206)

Review
Review on methods of spatial structural feature modeling of high resolution remote sensing images
Qin Kun, Chen Yixiang, Gan Shunzi, Feng Xia, Ren Wenli 1055
Information extraction and application of compact polarimetric SAR data
Zhang Hong, Xie Lei, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 1065

Image Processing and Coding
Affine registration based on CCCTI and hierarchical clustering
Zhang Guimei, Jiang Shaobo, Liu Piyu, Zhang Song 1074
Depth map filtering and upsampling method for virtual view rendering
Gao Kai, Chen Hexin, Zhao Yan, Geng Yingnan, Wang Gang 1085

Image Analysis and Recognition
Automatic classification of multiple-instance image based on the bag space
Wang Keping, Yang Yi, Wang Xinliang 1093
Bimodal emotion recognition based on body gesture and facial expression
Yan Jingjie, Zheng Wenming, Xin Minghai, Qiu Wei 1101
Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization
Cheng Xu, Li Nijun, Zhang Suofei, Wu Zhenyang 1107
Improved TLD visual target tracking algorithm
Zhou Xin, Qian Qiumeng, Ye Yongqiang, Wang Congqing 1115
Multi-feature robust principal component analysis for video moving object segmentation
Gan Chao, Wang Ying, Wang Xiangyang 1124
Improved fuzzy C-means clustering combined with the global best harmony search algorithm for image segmentation
Cui Zhaohua, Gao Liqun, Ouyang Haibin, Li Wenna 1133
Improved factorization method for structure from motion
Qiu Shaohua, Wen Gongjian, Hui Bingwei, Zhang Peng 1142

Computer Graphics
Efficient state management for parallel rasterization
Yin Chengxin, Han Jungang, Huang Hucai 1149

Medical Image Processing
Various hole repairing algorithm for 3D mesh surface models of human skull
Bao Jiarui, Liang Ronghua, Wu Fuli, Huang Xianping, Jiang Li, Chen Mao 1156
Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure
Li Qiaoliang, Li Zhenyu, Zhang Huisheng, Zhang Xiaofei, Chen Xin, Chen Siping, Wang Tianfu 1164

Remote Sensing Image Processing
Improved multispectral bilateral filter video fusion algorithm
Wu Chuan,Yang Dong 1170
Ship wake constant false alarm rate detection algorithm in synthetic aperture radar images based on length normalized scaning
Nan Jie, Zhang Hong, Wang Chao, Wu Fan, Zhang Bo 1176

Geoinformatics
Tower hanging point calculation for transmission line on three-dimensional visualization
He Guohui, Zhou Cong 1184
Coupling of map symbol web service and web map service
Jiao Donglai, Zhang Haitao, Lv Guonian,Jiang Jie 1190
The impact of different granularity representations on robustness evaluation of city road network
Duan Yingying, Lu Feng 1197
Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy
Zhang Jinming, You Xiong 1206

© 中国图象图形学报版权所有

E-mail: jig@irsa.ac.cn
Website: www.cjig.cn
Tel: 010-64807995

中国图象图形学报
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS
©中国图象图形学报版权所有

中图法分类号：TP391.41　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-8961(2013)09-1074-11

论文引用格式：张桂梅，江少波，刘丕玉，张松．融合 CCCTI 码和谱系聚类的仿射配准[J]．中国图象图形学报，2013，18(9)：1074-1084.[DOI：10.11834/jig.20130903]

融合 CCCTI 码和谱系聚类的仿射配准

张桂梅，江少波，刘丕玉，张松

南昌航空大学计算机视觉研究所，南昌　330063

摘　要：针对复杂场景中目标由于成像畸变、部分遮挡或局部缺失难于识别的问题，提出一种新的仿射配准算法。首先给出了 CCCTI 码(cyclic code of corner and tangent and inflexion points)的定义，该码易于确定模型和目标轮廓上关键特征点的对应关系；其次利用关键特征点对轮廓进行分段，根据对应子曲线段的两端点及其形心估算变换矩阵，再引入谱系聚类法对所有估算矩阵进行聚类，降低最终估算矩阵的误差，且使算法适用于部分遮挡或局部缺失，提高算法的鲁棒性；最后计算能够聚类的对应子曲线段的总形心，并利用总形心与对应子曲线段的两端点再次估算变换矩阵，提高配准的精度。理论分析和实验结果均表明，该算法能有效地进行仿射配准，并能处理部分遮挡或局部缺失。

关键词：仿射配准；谱系聚类；CCCTI 码；部分遮挡

Affine registration based on CCCTI and hierarchical clustering

Zhang Guimei, Jiang Shaobo, Liu Piyu, Zhang Song

Institute of Computer Vision, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, *China*

Abstract: It is difficult to recognize objects when they are distorted and partially occluded or broken. In order to solve this problem, a new registration algorithm is proposed in this paper. First, we define the CCCTI (cyclic code of corner and tangent and inflexion points) of a planar curve. This code can easily determine the corresponding relation of the key feature points between the model and target contour. Second, contours are segmented by using the key feature points, and the transformation matrix is estimated based on two endpoints of the sub-curve and its centroid. Then, all estimate matrices are clustered using hierarchical clustering method. This process can reduce the final error of the estimation matrix and improve the robustness of the algorithm, making the algorithm suitable for partial occlusions or broken objects. Finally, we calculate the total centroid of corresponding sub-curve segments, and estimate the transformation matrix again using the total centroid and two endpoints of the corresponding sub-curve segments, to improve the accuracy of the registration. The theoretical analysis and experimental results show that our algorithm can be effectively used for affine registration, and that it can deal with partial occlusions and broken objects.

Key words: affine registration; hierarchical clustering; cyclic code of corner and tangent and inflexion points (CCCTI); partial occlusion

收稿日期：2013-01-10；**修回日期**：2013-03-06

基金项目：国家自然科学基金项目(61063030，61263046，61165011)；国家重点基础研究发展计划(973)基金项目(2009CB320902)

第一作者简介：张桂梅(1970—　)，女，教授，2006 年于西北工业大学获计算机视觉专业博士学位，主要研究方向为计算机图形学，图形图像处理与模式识别。E-mail：guimei.zh@163.com

© 中国图象图形学报版权所有

0 引　言

数字图像的配准技术是指确定在不同时段、不同视角和不同传感器下拍摄的两幅或多幅图像间几何变换关系的处理技术，它是图像处理和计算机视觉领域比较基础的技术，被广泛应用于运动估计、视觉定位和测量、图像拼接、目标识别等方面。

目前，有关数字图像的配准方法大致可分为基于图像灰度和基于图像特征两大类[1]。基于图像灰度的方法[2-3]，其原理是通过比较两幅图像中像素点灰度的相似度来完成配准。该类方法只需对图像的灰度进行处理，可以避免因图像分割带来的额外误差，但同时也存在计算量大、速度较慢，且对图像的畸变和遮挡以及本身的灰度变化都比较敏感等缺点。而基于图像特征的方法可以克服这些缺点，它是通过提取参考图像和目标图像的一些共有特征（如角点、曲率、边缘以及块状区域等），建立特征之间的对应关系，寻找配准参数，从而实现图像的自动配准。文献[4]使用 Harris 算子提取红外和可见光图像中的角点，并以 Hausdorff 距离为相似性测度估计模型参数，当存在较多外点时该方法易失效；文献[5]首先提取图像中的干线对，再依据定义的相似性度量函数和优化方法计算干线对间的最优匹配参数，但干线对的定义对图像内容和图像形变都提出了较严格的要求，限制了算法的适用范围；文献[6]基于相位一致性变换和 Zernike 矩重构互相关函数，然后使用由粗至精的优化匹配策略实现多源遥感图像间的高精度配准，该方法的复杂度较高；文献[7]基于相位一致性模型提取两幅图像中视觉相似性的边缘结构，并采用多分辨率分析方法逐级逼近空间变换模型的最优参数值，有效地实现两图像的自动配准，但该方法不适用于部分遮挡图像。

随着图像分割、边缘检测等技术的发展，基于图像边缘轮廓和区域等特征的配准方法逐渐成为研究的热点。文献[8-9]利用边缘轮廓上的像素点，并使用遗传算法搜索 3 对对应点来求解仿射变换参数，实现仿射畸变图像的匹配，该类方法对像素点较少的轮廓具有较高的识别率，但对较多像素点的轮廓，计算量增加，识别率也会下降，且该类方法不适用于部分遮挡图像。文献[10]用证据积累对轮廓曲线上所选的对应控制点进行联合聚类，并用最小二乘法对能够聚类的控制点估算最优变换参数，该方法对发生刚体变换的曲线能较好地匹配，但不适用于仿射畸变或部分遮挡曲线。文献[11]提出 NRLCTI 码（normalized run length code of corner and tangent and inflexion points）来确定两轮廓曲线上关键特征点的对应关系，通过对子曲线段进行细分并确定细分点的匹配关系，能较好地匹配仿射变换曲线，但对于部分遮挡或缺失的曲线却无能为力。

在分析比较相关工作的基础上，提出一种利用边缘轮廓上的关键特征点（包括角点、切点和拐点），并结合谱系聚类法进行仿射畸变图像的配准识别。本文算法的主要贡献如下：

1）定义了一种新的 CCCTI 码（cyclic code of corner and tangent and inflexion points），该码易于获得模型和目标轮廓的最长相同子码，且对部分遮挡或局部缺失不敏感，便于确定两轮廓上关键特征点的对应关系。

2）引入谱系聚类法对所有估算的变换矩阵进行聚类，剔除聚类失败时所对应的最长相同子码，这段子码不必进行后续配准计算，从而减少了计算量；并去除聚类成功时误差较大或错误的估算矩阵，从而降低了最终估算变换矩阵的误差，且使算法适合于部分遮挡或局部缺失，提高了算法的鲁棒性。

3）利用能够聚类的对应子曲线段的总形心，与每条对应子曲线段的两端点再次估算变换矩阵，提高了估算仿射变换矩阵的精度，从而提高了配准的精度。

1 基本理论

1.1 谱系聚类法

谱系聚类法，又称作系统聚类法（hierarchical clustering method），该方法对样本进行聚类时不需要给定初始值。设样本集 $\boldsymbol{X}$ 有 n 个样本，谱系聚类法将 n 个样本按距离准则逐步聚类，类别由多到少，直至满足合适的分类要求为止。

谱系聚类法的示意图如图 1 所示，横坐标表示样本，纵坐标表示样本间的距离。随着距离的逐渐增大，各个样本逐级聚类，最终聚为一类。图 1 中 η 为距离阈值，表示距离不超过 η 的样本划分为虚线

© 中国图象图形学报版权所有

中国图象图形学报
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS
Vol. 18, No. 9, Sep. 2013

以下的类别数。

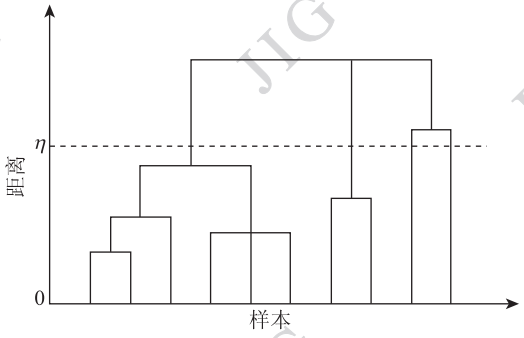


图 1　谱系聚类示意图

Fig. 1　Sketch map of hierarchical clustering

在谱系聚类中,每次迭代形成的聚类之间以及它们与各个样本之间的距离,有许多种不同的距离准则,本文采用最短距离法。假设 $\boldsymbol{X}_A$ 和 $\boldsymbol{X}_B$ 为两类样本,则两类样本间的最短距离定义为

$$D_{\boldsymbol{X}_A,\boldsymbol{X}_B}=\min\{d(x_a,x_b)\mid x_a\in\boldsymbol{X}_A,\ x_b\in\boldsymbol{X}_B\} \tag{1}$$

式中,$d(x_a,x_b)$ 表示 $\boldsymbol{X}_A$ 类中的样本 x_a 和 $\boldsymbol{X}_B$ 类中的样本 x_b 之间的距离。

采用谱系聚类法对模型和目标轮廓的对应子曲线段所估算的仿射变换矩阵进行聚类,进而判断模型和目标轮廓的配准关系,并得到较好的仿射变换矩阵。

1.2　仿射投影模型

摄像机的成像过程可以用透视投影模型来描述,但当摄像机离物体足够远,则可用仿射变换近似透视变换,约定当摄像机与物体之间的距离为物体尺寸的 10 倍时,即用仿射投影模型进行近似。如果 2 维模型点集 $\boldsymbol{R}$ 和 2 维目标点集 $\boldsymbol{O}$ 是成仿射对应的,则有

$$\boldsymbol{AR}=\boldsymbol{O} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}x_1 & \cdots & x_i & \cdots & x_n\\ y_1 & \cdots & y_i & \cdots & y_n\\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{O}=\begin{bmatrix}\hat{x}_1 & \cdots & \hat{x}_i & \cdots & \hat{x}_n\\ \hat{y}_1 & \cdots & \hat{y}_i & \cdots & \hat{y}_n\\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1\end{bmatrix},\ \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}a & b & e\\ c & d & f\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

仿射变换矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中有 6 个未知参数,故根据 3 对对应点即可确定仿射变换矩阵 $\boldsymbol{A}$。从而,若模型和目标轮廓曲线可认为近似存在仿射变换关系,那么在两轮廓曲线上由 3 对对应特征点就可以估算仿射变换矩阵 $\boldsymbol{A}$。

2　CCCTI 码的定义

在平面曲线的投影中,面积、弧长等量都会因投影而出现很大的变化,唯有平面曲线的关键特征点(角点、切点、拐点)是不变的,其具体定义和不变性的证明可参阅文献[12]。根据关键特征点的投影不变性,文献[11]定义了归一化的关键特征点游程码,即 NRLCTI 码。用 NRLCTI 码描述平面曲线的拓扑结构信息有两个优点:1)唯一性,即每一条平面曲线回路对应唯一的 NRLCTI 码;2)NRLCTI 码是投影不变量。但是 NRLCTI 码对部分遮挡(或缺失)很敏感,不利于获得两曲线中未发生变化的对应部分。NRLCTI 码的编码方式是在平面曲线上从某一关键特征点开始,沿逆时针方向,将连续的同类关键特征点个数一一记录。NRLCTI 码中在拐点后面加上(*),表示其前面一个编码为拐点编码。如图 2(a)曲线的 NRLCTI 码是为 221(*)1111,从点 E 开始记录连续的同类特征点个数为 2 角点 2 切点 1 拐点 1 角点 1 切点 1 角点 1 切点;同理,图 2(b)曲线的 NRLCTI 码为 31221(*),从点 A 开始记录,表示 3 角点 1 切点 2 角点 2 切点 1 拐点;它们的最长相同子码为 221(*)。事实上,图 2(b)为图 2(a)的部分遮挡情况,两曲线仅仅特征点 B 由切点变成了角点,其他特征点没有改变,它们应具有更长的相同子码。

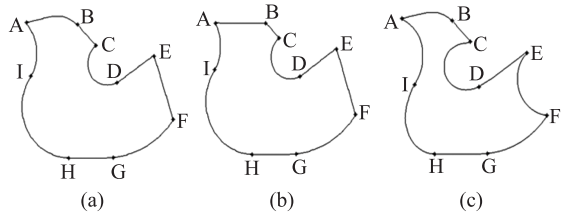


图 2　NRLCTI 码和 CCCTI 码

Fig. 2　NRLCTI and CCCTI

为此,定义一种关键特征点的循环游程码,即 CCCTI 码。用“0”表示角点,“1”表示切点,“2”表示拐点。该码没有起点和终点,不需要计算编码值,所有关键特征点编码构成一个封闭的“环”。该码具有 NRLCTI 码的两个优点,且能通过循环机制找到两条曲线未发生变化的对应部分。一条曲线对应顺时针和逆时针两个方向的 CCCTI 码,在此仅对沿顺时针方向的 CCCTI 码进行比较。图 2(a)的 CCCTI 码为→010100112→,图 2(b)的 CCCTI 码为→000100112→,编码中的“→”表示最后一位码指向

© 中国图象图形学报版权所有

第一位码，从而构成一个封闭的环。通过循环比较，可得它们的最长相同子码为 01001120。根据该最长相同子码确定未变化部分关键特征点的对应关系，如图 2(a)中特征点 C、D、E、F、G、H、I、A 和图 2(b)中特征点 C、D、E、F、G、H、I、A 是相对应的。

由于 CCCTI 码只考虑了平面曲线上关键特征点的特性和位置关系，所以只能用来初步确定两条平面曲线上关键特征点的对应关系。对于一些形状相近，而两关键特征点间的子曲线段曲率不同的平面曲线就不能达到有效配准。如图 2(a)和图 2(c)两曲线的 CCCTI 码均为“→010100112→”，但两曲线显然不能有效配准。因此，使用 CCCTI 码确定了两条曲线上关键特征点的对应关系后，还需要用其他方法进一步验证两条曲线的配准关系。

3　本文算法描述

本文将曲线配准问题描述为：当模型轮廓曲线和目标轮廓曲线之间可以近似为存在某个平面仿射变换时，如何有效地获得一个仿射变换矩阵 A，使得模型轮廓曲线经过矩阵 A 仿射变换后能够和目标轮廓曲线相配准。

一般情况下，曲线配准算法应包含以下主要内容：1)模型曲线和目标曲线的获取；2)特征点的提取及其对应关系的建立；3)变换参数的估算；4)曲线配准优劣程度的评价。

3.1　本文算法步骤

本文曲线配准算法的基本步骤如下：

1)对模型和目标轮廓曲线进行关键特征点的提取，并根据关键特征点对两曲线进行分段。

2)确定两轮廓曲线的 CCCTI 码，并比较得到它们的最长相同子码：如果最长相同子码不到总码长的一半，则认为两轮廓曲线不配准；否则根据最长相同子码确定特征点的对应关系，进而确定各子曲线段的对应关系。

3)根据对应子曲线段的两端点及其形心估算仿射变换矩阵 $\boldsymbol{A}_i$，$i=1,2,\cdots,N$(N 为估算矩阵的个数)，并用谱系聚类法对所有 $\boldsymbol{A}_i$ 进行聚类：如果聚类成功，则计算能聚类 $\boldsymbol{A}_i$ 所对应子曲线段的总形心；否则，判断是否还有最长相同子码未处理，若有则考察下一段最长相同子码，若没有则认为两轮廓曲线不配准。

4)利用总形心和每个对应子曲线段的两端点再次估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i'$，并用 $\boldsymbol{A}_i'$ 对模型轮廓进行仿射变换，计算变换后的映射曲线与目标轮廓之间的 LTS-HD(least trimmed square Hausdorff 距离)。

5)比较得到最小 LTS-HD 所对应的矩阵 $\boldsymbol{A}_i'$，即为配准后的最优估算矩阵。

本文曲线配准算法的整体流程如图 3 所示。

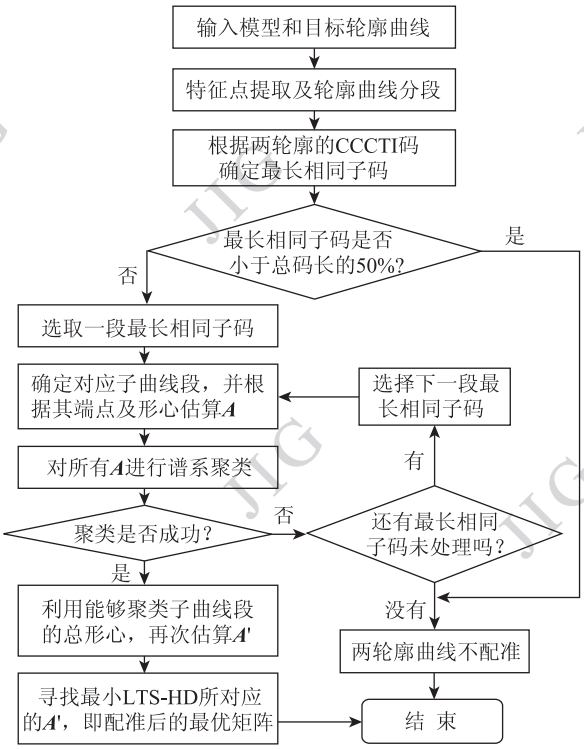


图 3　本文曲线配准算法流程图

Fig. 3　Flow chart of the curve registration algorithm

3.2　配准曲线的获取

配准曲线包括模型和目标两条轮廓曲线，采用经典的 canny 边缘检测算法获取配准曲线。但是由于噪声点的影响，用 canny 算子提取的图像边缘常常会出现间断点。为了消除间断点，先对模型和目标图像进行高斯平滑，再进行边缘检测，以得到较好的轮廓曲线。

3.3　特征点的提取及对应关系的确定

关键特征点是指轮廓曲线上的角点、切点和拐点，这些特征点具有仿射不变性。其提取方法详见文献[12]，但是这些方法提取的关键特征点仍然存在一些冗余。为了将轮廓曲线分成一些有意义的子曲线段，便于估算仿射变换矩阵，给定一个约束条件实现冗余特征点的剔除。约束条件[13]为：相邻两特征点之间的曲线弧长距离 d 必须大于最小距离阈值 d_0，即 $d>d_0$(以像素为单位)。最

© 中国图象图形学报版权所有

中国图象图形学报
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS
Vol. 18, No. 9, Sep. 2013

小距离阈值 d_0 没有一个特定标准,本文实验中将 d_0 设定为 6 像素。然后,沿着轮廓曲线的顺时针或逆时针方向,将相邻两特征点间的曲线进行分割,形成若干段子曲线。如图 4 所示。

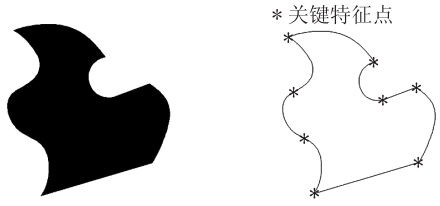


图 4 模型图像及其轮廓

Fig. 4 Model image and its contour

根据第 2 节的理论,对模型和目标轮廓曲线的关键特征点进行编码(模型和目标可能存在镜像,故对关键特征点进行顺时针和逆时针两个方向的编码),即得 CCCTI 码。然后,比较两轮廓曲线的 CCCTI 码得到它们的最长相同子码,如果最长相同子码的长度小于模型轮廓 CCCTI 码总长度的一半,则可以认为两轮廓曲线不配准,因为本文仅考虑不超过 50% 的部分遮挡或局部缺失;否则根据最长相同子码初步确定两轮廓曲线上特征点的对应关系,进而确定两轮廓的各子曲线段的对应关系。如果得到多段最长相同子码,应分别进行分析。

3.4 仿射变换矩阵的估计

利用形心的仿射不变性[12],首先求出每对应子曲线段的形心,再根据每对应子曲线段的形心及其两端点(形心和两端点共线的子曲线段除外),由式(2)估算仿射变换矩阵 $\boldsymbol{A}_i, i=1,2,\cdots,N$($N$ 为估算矩阵的个数);然后对所有估算的 $\boldsymbol{A}_i$ 进行谱系聚类。在进行谱系聚类时,若满足 $\|\boldsymbol{A}_i-\boldsymbol{A}_j\|_2\leqslant\eta$($i$ 和 j 为正整数),则认为第 i 个和第 j 个估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 和 $\boldsymbol{A}_j$ 是属于同一类,其中 $\|\cdot\|_2$ 表示取 2-范数,η 为距离阈值。不能聚类的 $\boldsymbol{A}_i$ 有两种情况:1)如果特征点的提取误差较大,或者对应子曲线段的 3 对特征点相距太近或接近共线,则由它们所估算的 $\boldsymbol{A}_i$ 误差会较大,不能聚类;2)由第 2 节可知,虽然由两轮廓 CCCTI 码的最长相同子码能够得到子曲线段的对应关系,但是可能存在部分遮挡、局部缺失以及对应子曲线段的曲率不同等因素,某些对应子曲线段并不满足仿射变换关系,则由它们所估算的 $\boldsymbol{A}_i$ 是错误的,不能聚类。

考虑到以上分析的估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 不能聚类的因素,对所有估算 $\boldsymbol{A}_i$ 的聚类情况进行统计,如果不少于 50% 的 $\boldsymbol{A}_i$ 能够聚类,则认为聚类成功;否则,聚类失败,继续判断是否还有最长相同子码未被处理,若有,则考察下一段最长相同子码,若没有,则认为两轮廓曲线不配准。在此,对聚类失败时所对应的最长相同子码不必进行后续的配准计算,从而减少了计算量。

反复试验可知,一般对应子曲线段的形心与两端点的距离相对较小或接近共线,其所估算的矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 误差会较大。然而,能够聚类 $\boldsymbol{A}_i$ 所对应的子曲线段的总形心也具有仿射不变性,且它与每段子曲线两端点的距离相对较大或接近共线的几率较小,有必要计算总形心,提高仿射变换矩阵的估算精度。

因此,当聚类成功时,剔除不能聚类的估算矩阵,计算能够聚类 $\boldsymbol{A}_i$ 所对应子曲线段的总形心。利用总形心和每个对应子曲线段的两端点再次估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i'$,并用 $\boldsymbol{A}_i'$对模型轮廓进行仿射变换,使用 LTS-HD 对变换后的映射曲线与目标轮廓曲线匹配的优劣进行评价,最小 LTS-HD 所对应的 $\boldsymbol{A}_i'$即为所估算的最优仿射变换矩阵。

3.5 配准优劣程度的评价

Hausdorff 距离是一种极大极小距离,主要用于描述两个点集的匹配程度,但它对噪声、部分遮挡或缺失很敏感。为此,使用 Hausdorff 距离的一种改进形式 LTS-HD[14],定义为

$$h_{\mathrm{LTS}}(\boldsymbol{P},\boldsymbol{Q})=\frac{1}{H}\sum_{i=1}^{H}d(p,\boldsymbol{Q})_i \tag{3}$$

式中,$H=h\times N_P$,$h\in[0.6,0.9]$,h 与图像受噪声、遮挡或缺失等因素的影响程度有关,N_P 为 $\boldsymbol{P}$ 中点的个数;$d(p,\boldsymbol{Q})_i$ 表示 $\boldsymbol{P}$ 中的每个点 p 到点集 $\boldsymbol{Q}$ 的距离从小到大排序后第 i 个值。由式(3)可以看出,点集 $\boldsymbol{P}$ 到点集 $\boldsymbol{Q}$ 的 LTS-HD 是对 $\boldsymbol{P}$ 中每个点到点集 $\boldsymbol{Q}$ 的距离排序后再求部分均值,从而在很大程度上克服了图像受噪声、部分遮挡或局部缺失的影响,很好地描述两个点集的匹配或配准程度。

使用估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i'$对模型轮廓进行仿射变换得到映射曲线,再计算映射曲线和目标轮廓曲线间的 LTS-HD,对估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i'$进行评价,进而评价模型和目标轮廓曲线配准的优劣程度。

4 实验结果与分析

本文实验所采用的计算机环境为:Pentium(R)

© 中国图象图形学报版权所有

D2.60 GHz CPU，1.0 G 内存，程序采用 Matlab2010a 实现。为了验证本文算法的有效性，分别从模拟图像和真实图像出发，进行仿射畸变和部分遮挡（或局部缺失）两种情况下的配准实验。

4.1　模拟图像实验

首先选择 4 个实际仿射变换矩阵 $\boldsymbol{A}_{\text{act}}$ 为

$$\begin{bmatrix} 0.4 & -0.2 & 84 \\ 0.3 & 0.6 & -10 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}、\begin{bmatrix} -0.3 & -0.7 & 419 \\ 0.5 & -0.4 & 186 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}、$$

$$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 3 \\ 0.2 & -0.8 & 389 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}、\begin{bmatrix} -0.6 & 0.4 & 294 \\ 0.3 & 0.8 & -6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

然后，用这 4 个矩阵对图 4（a）的模型图像分别进行畸变处理，得到图 5（a）—（d）4 幅仿射畸变图像，再对畸变图像进行部分遮挡或局部缺失处理，得到图 5（e）—（h）4 幅部分遮挡（或缺失）图像，从而模拟发生仿射畸变的目标以及既有畸变又有遮挡（或缺失）的目标。

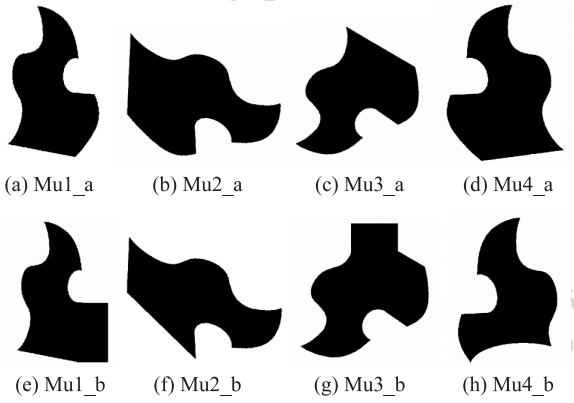


图 5　模拟图像

Fig. 5　Simulation images

4.1.1　仿射畸变的配准

为了验证本文算法对仿射畸变目标具有较好的配准效果，选用图 5 中仿射畸变目标（图 5（a）—（d））与图 4（a）进行配准，实验结果如图 6 所示。图 6（a）（b）中红色“＊”标记为关键特征点，蓝色“＊”标记为能够聚类的估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 所对应子曲线段的总形心；图 6（c）为对应的所有估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 的谱系聚类结果，红色线条表示距离不超过阈值 η 的聚类结果（η 取为 15）；图 6（d）中横纵坐标表示图片上每个像素的位置（以像素为单位），蓝色曲线为畸变目标的轮廓，红色曲线为模型轮廓经最优估算矩阵变换后的映射曲线。

从图 6（c）谱系聚类结果可以看出，大部分估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 均可聚类，为了减少误差的影响，剔除某些误差较大、不能聚类的 $\boldsymbol{A}_i$，仅选择能够聚类的 $\boldsymbol{A}_i$ 进行后续计算。由于存在轮廓曲线提取误差或数字化误差等因素，因此一般情况下求 LTS-HD 时 h 取为 0.9。从图 6（d）配准结果和 LTS-HD 数值上可以看出本文算法对仿射畸变目标具有较好的配准效果。

4.1.2　部分遮挡（或局部缺失）的配准

复杂场景中目标不但会发生成像畸变，而且往往存在部分遮挡或局部缺失，本文仅考虑轮廓曲线上不超过 50% 的部分遮挡或局部缺失的情况。

为了验证本文算法也较好地适用于部分遮挡或局部缺失目标的配准，选用图 5 中部分遮挡（或缺失）目标图 5（e）—（h）与图 4（a）的模型图像进行配准，实验结果如图 7 所示，图 7（c）（d）的横纵坐标含义同图 6。从图 7（c）谱系聚类结果可以看出，由于发生仿射畸变以及部分遮挡或局部缺失等因素，大部分估算矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 均可聚类，少数误差较大或错误的 $\boldsymbol{A}_i$ 不能聚类。为了降低误差，获得较好的最优估算矩阵，剔除不能聚类的 $\boldsymbol{A}_i$，选择能够聚类的 $\boldsymbol{A}_i$ 进行后续步骤。由于部分遮挡或局部缺失的存在，因此在求 LTS-HD 时取 h 为 0.7。从图 7（d）配准结果和 LTS-HD 数值上可以看出本文算法对既存在仿射畸变，又发生了部分遮挡或局部缺失的目标也具有较好的配准效果。

4.2　真实图像实验

为了进一步验证本文算法的有效性，选择真实纸卡图像进行实验，如图 8 所示。

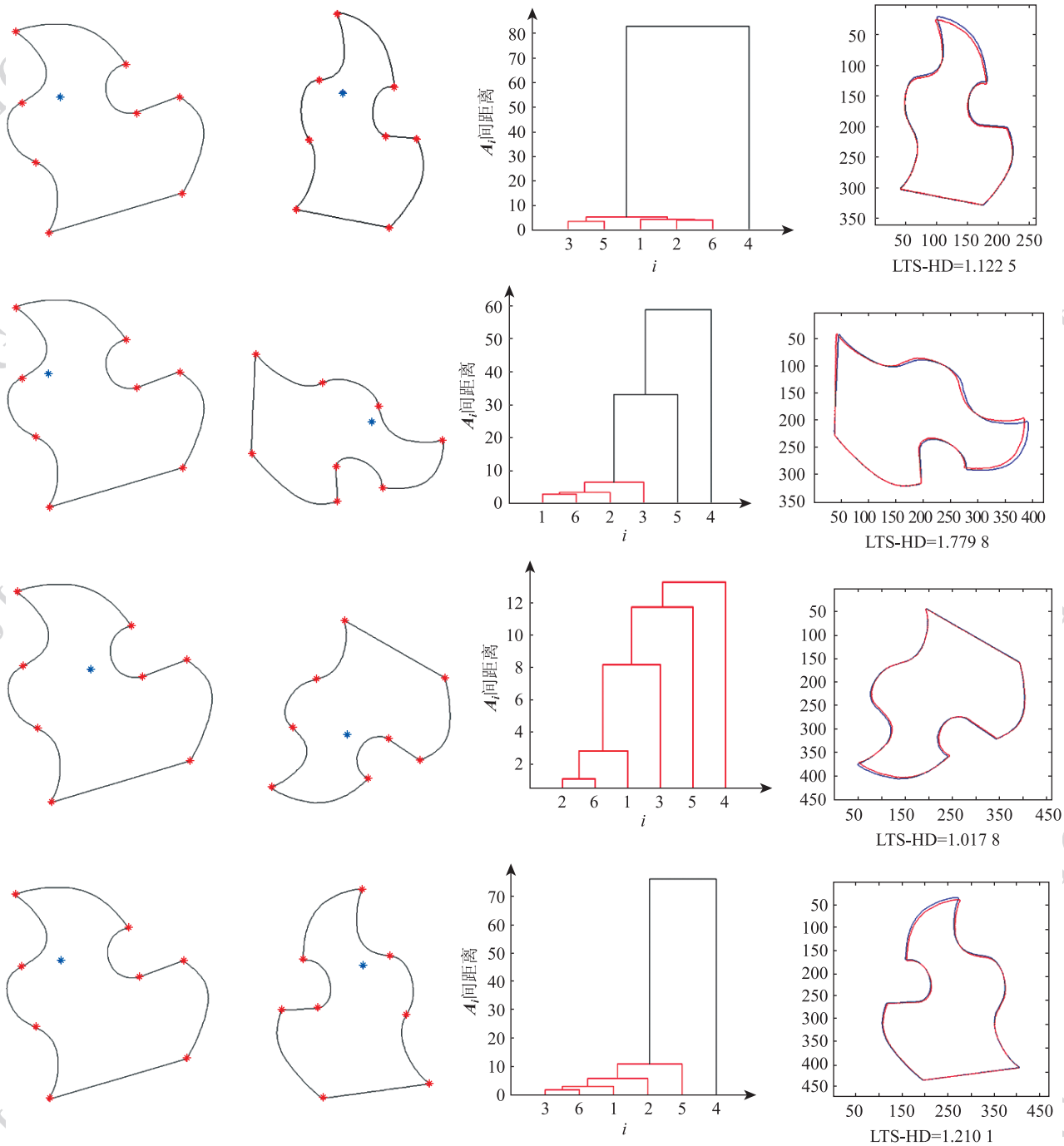
实验结果如图 9 和图 10 所示。图中横纵坐标均表示图片中像素的位置（以像素为单位），图中红色“＊”标记为所提取的关键特征点，蓝色“＊”标记为能够聚类子曲线段的总形心。从图 9 和图 10 中的配准结果和 LTS-HD 数值上可以看出本文算法不仅对在不同视点下拍摄形成的畸变目标具有较好的配准效果，而且能较好地配准发生部分遮挡或缺失的目标。

4.3　实验分析

理论上，存在仿射畸变的两轮廓曲线配准后的 LTS-HD 应为零，但在实际过程中，如上述模拟图像和真实图像两部分实验，配准后的 LTS-HD 却不为零，误差主要来源于以下几个方面：1）轮廓曲线的提取与数字化误差；2）关键特征点的提取误差；3）形

© 中国图象图形学报版权所有

中国图象图形学报
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS
Vol. 18, No. 9, Sep. 2013



(a) 模型轮廓曲线　(b) 目标轮廓曲线　(c) A_i谱系聚类结果　(d) 模型和目标轮廓曲线配准结果

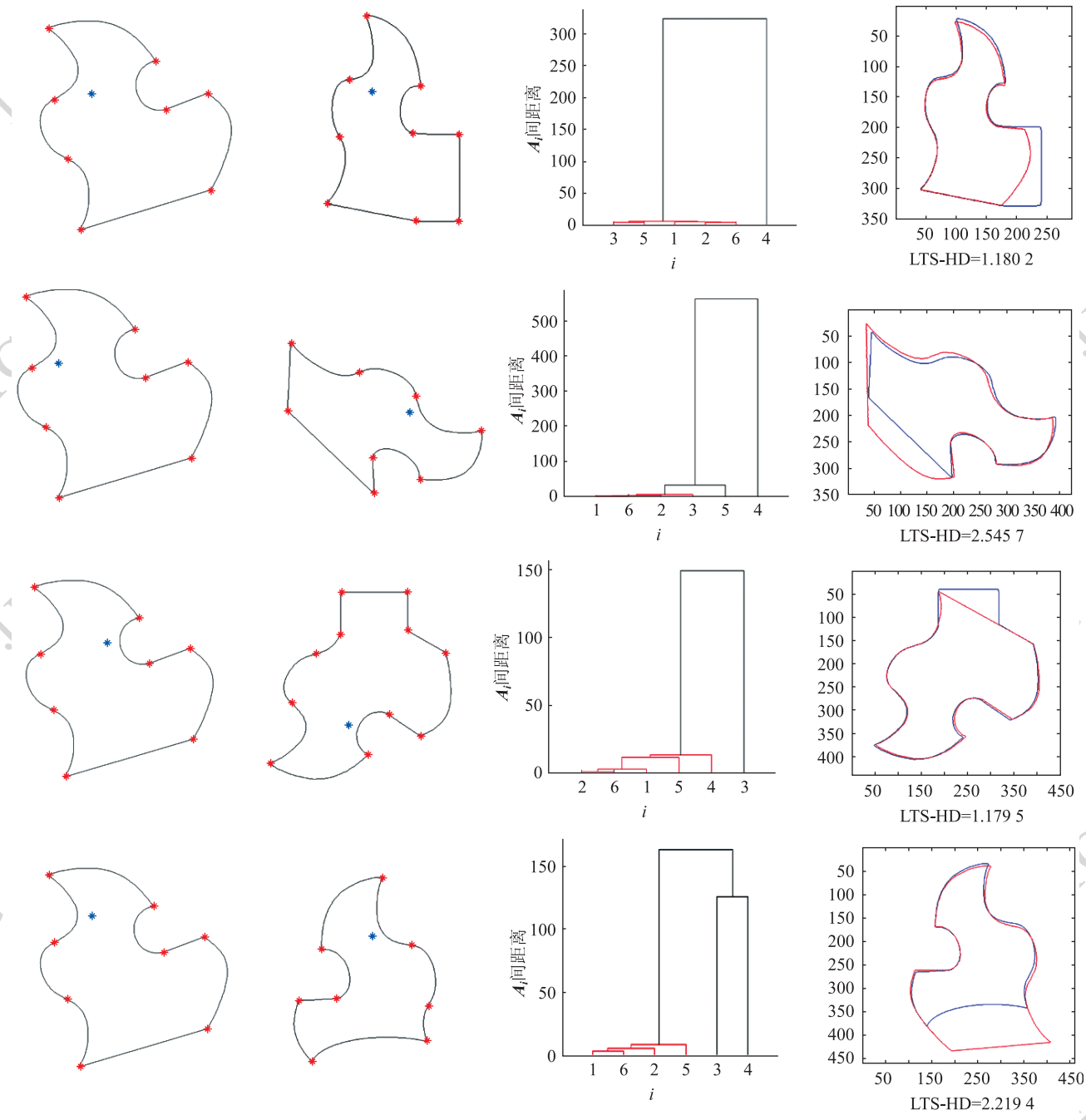
图 6　畸变目标的聚类与配准结果

Fig. 6　The clustering and registration of distorted targets

心的计算误差等。

为了验证本文算法的优越性，与文献[10]中使用的最小二乘法进行比较。最小二乘法进行配准的基本思想是：首先，根据模型和目标轮廓 CCCTI 码的最长相同子码确定关键特征点的对应关系；其次，根据对应的关键特征点和式(2)，直接使用非线性最小二乘法估计仿射变换参数(即矩阵 $\boldsymbol{A}$)；最后，用 LTS-HD 对配准的结果进行评价。使用最小二乘法进行配准，对仿射变换矩阵的估算与其初始值 $\boldsymbol{A}_0$ 的选取有较大的关系，若初始值 $\boldsymbol{A}_0$ 选取不当，则配准误差很大，甚至不能配准。另外，最小二乘法还有一个较大的缺陷，若对应的关键特征点中有错误的

© 中国图象图形学报版权所有



(a) 模型轮廓曲线　(b) 目标轮廓曲线　(c) A_i谱系聚类结果　(d) 模型和目标轮廓曲线配准结果

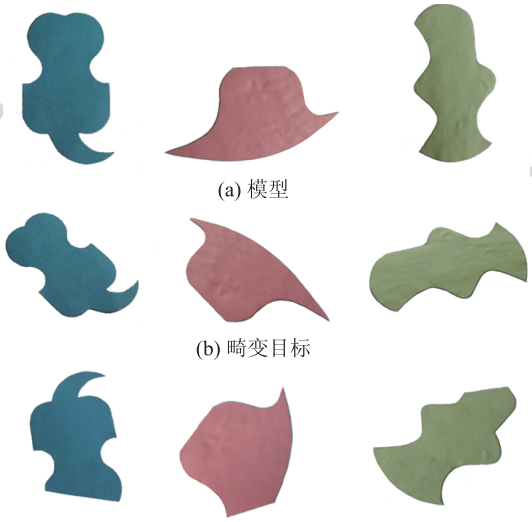
图 7　遮挡(或缺失)目标的聚类与配准结果

Fig. 7　The clustering and registration of partial occlusion or broken target

对应点,则估算的矩阵误差较大,配准效果不好。

将本文算法和最小二乘法对图 5 中的模拟图像进行配准,并对配准效果进行比较,结果如表 1 和表 2 所示,$\| \boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}_{\text{act}} \|_2$ 表示估算矩阵 $\boldsymbol{A}$ 与实际矩阵 $\boldsymbol{A}_{\text{act}}$之差。从表 1 和表 2 可以看出,最小二乘法的配准效果与估计仿射变换矩阵时初始值 $\boldsymbol{A}_0$ 的选取有关,当 $\boldsymbol{A}_0 = \boldsymbol{A}_{\text{act}}$时,畸变目标配准后的 LTS-HD 和变换矩阵的绝对误差都比较小,配准效果较好;当 $\boldsymbol{A}_0 = 0$ 时,畸变目标配准后的 LTS-HD 和变换矩阵的绝对误差都相当大,不能配准。在实际应用中,目标物体随拍摄视点的不同,拍摄的图像是随机发生仿射畸变的,因此在使用最小二乘法进行配准时,对变换矩阵初始值的选取是比较难的。另外,由于最小二乘法本身的缺陷,对遮挡(或缺失)目标配准后

© 中国图象图形学报版权所有



(a) 模型

(b) 畸变目标

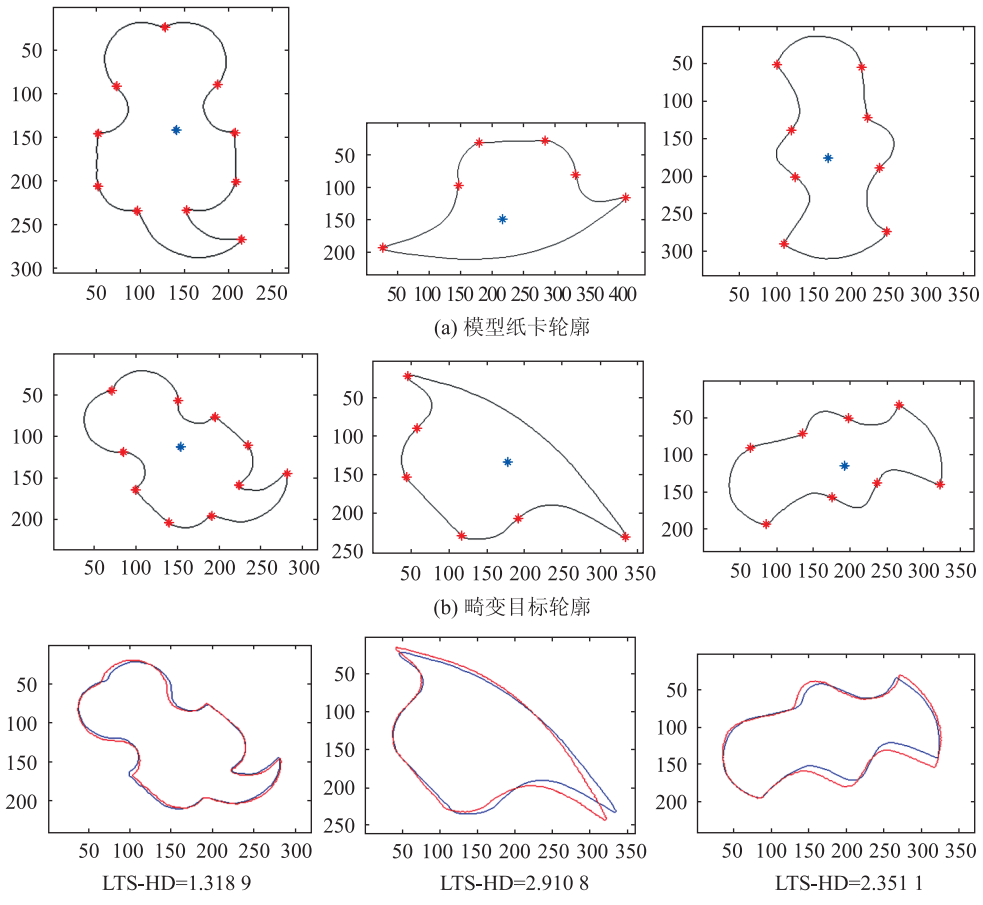
(c) 遮挡(或缺失)目标

图 8　纸卡图像

Fig. 8　Paper card images

的 LTS-HD 和变换矩阵的绝对误差都比较大，配准效果并不好，而本文算法在估算仿射变换矩阵时不需要选取初始值，适于随机畸变的目标。从表 1 和表 2 可以看出，本文算法对畸变目标和部分遮挡(或缺失)目标进行配准后的 LTS-HD 度量值和仿射变换矩阵的绝对误差都比较小，配准效果都比较好。

对模型和目标轮廓曲线进行了分段处理，用对应的子曲线段来估算仿射变换矩阵，因此本文算法也适用于较长的轮廓曲线。另外，本文算法由于引入了谱系聚类，对估算矩阵聚类不成功的情况，不需要进一步配准计算，减少了配准时间。由以上分析可知，本文算法优于最小二乘法，不但能配准发生仿射畸变的目标，而且对既有畸变又有遮挡或缺失的目标同样有效。



(a) 模型纸卡轮廓

(b) 畸变目标轮廓

(c) 配准结果

图 9　模型和畸变目标的配准结果

Fig. 9　The registration of models and distorted targets

© 中国图象图形学报版权所有

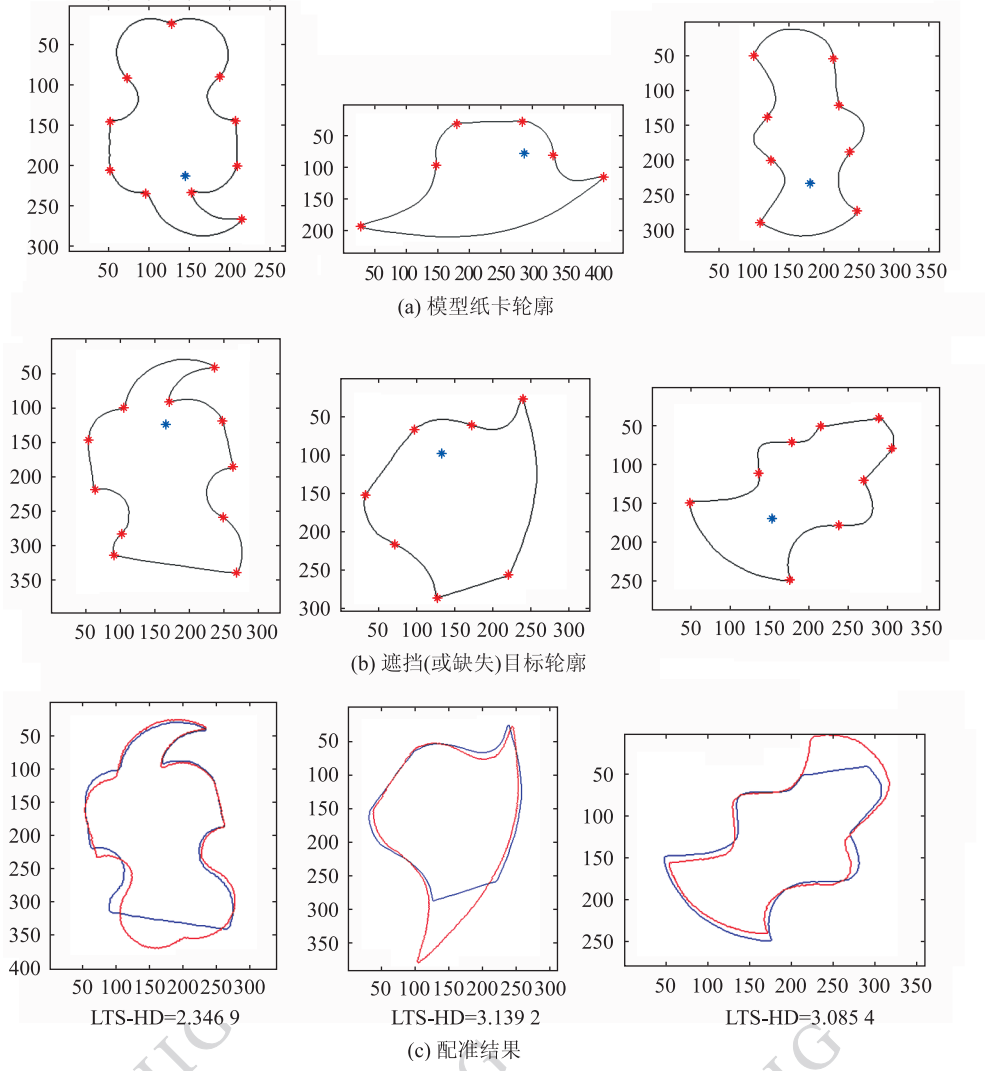


图 10　模型和遮挡(或缺失)目标的配准结果

Fig. 10　The registration of models and occlusion targets

表 1　对模拟图像配准后 LTS-HD 的比较

Table 1　Comparison of the LTS-HD for simulation images registration

算法		目标轮廓图 5							
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
最小二乘法	$\boldsymbol{A}_0=\boldsymbol{A}_{act}$	0. 458 6	0. 616 5	0. 488 9	0. 465 9	7. 333 2	15. 678 9	14. 225 1	11. 446 6
	$\boldsymbol{A}_0=\boldsymbol{0}$	21. 839 1	56. 654 6	43. 949 4	24. 917 2	29. 500 2	51. 735 7	46. 223 2	33. 763 9
本文算法		1. 122 5	1. 779 8	1. 017 8	1. 210 1	1. 180 2	2. 545 7	1. 179 5	2. 219 4

表 2　仿射变换矩阵绝对误差 $\|\boldsymbol{A}-\boldsymbol{A}_{act}\|_2$ 的比较

Table 2　Comparison of the affine transformation matrix absolute error $\|\boldsymbol{A}-\boldsymbol{A}_{act}\|_2$

算法		目标轮廓图 5							
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
最小二乘法	$\boldsymbol{A}_0=\boldsymbol{A}_{act}$	0. 870 0	1. 108 4	0. 932 4	0. 890 3	13. 703 2	25. 004 8	23. 191 6	19. 840 1
	$\boldsymbol{A}_0=\boldsymbol{0}$	193. 339 1	350. 249 0	305. 123 7	210. 203 0	198. 043 0	350. 246 6	305. 398 5	211. 241 2
本文算法		1. 854 3	3. 154 7	1. 664 8	2. 323 0	2. 151 5	4. 127 6	2. 135 1	3. 774 1

© 中国图象图形学报版权所有

中国图象图形学报
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS
Vol. 18, No. 9, Sep. 2013

5 结 论

提出了一种将 CCCTI 码和谱系聚类法相融合的仿射配准方法。CCCTI 码对部分遮挡或局部缺失不敏感,易于确定模型和目标轮廓上关键特征点的对应关系。引入谱系聚类法对所有估算的变换矩阵进行聚类,聚类失败时不必进行后续的配准计算,降低了算法的计算复杂度;剔除聚类成功时误差较大或错误的估算矩阵,降低了最终估算矩阵的误差并提高了算法的鲁棒性。利用能够聚类的对应子曲线段的总形心进一步估算变换矩阵,提高了配准精度。此外本文算法对轮廓曲线进行了分段处理,因而也适用于较长的轮廓曲线。通过分别用模拟图像和真实图像进行实验,并与最小二乘法的配准进行了比较,结果表明,本文算法不但能够进行仿射配准,而且适用于发生部分遮挡或局部缺失的情况,且在计算精度和鲁棒性方面均优于最小二乘法。不足之处是对关键特征点较少的轮廓曲线,本文算法效果不理想。

参考文献(References)

[1] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.

[2] Kim Y S, Lee J H, Ra J B. Multi-sensor image registration based on intensity and edge orientation information[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(11): 3356-3365.

[3] Lee J H, Kim Y S, Lee D, et al. Robust CCD and IR image registration using gradient-based statistical information[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(4): 347-350.

[4] Hrkac T, Kalafatic Z, Krapac J. Infrared-visual image registration based on corners and hausdorff distance[C]//Proceedings of Lecture Notes in Computer Sciences. Berlin: Springer-Verlag, 2007, 383-392.

[5] Gao F, Wen G J, Lv J J. An optimal algorithm for IR/visual image registration based on mainline-pairs[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(6): 1014-1021. [高峰, 文贡坚, 吕金建. 基于干线对的红外与可见光最优图像配准算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(6): 1014-1021.]

[6] Ling Z G, Liang Y, Cheng Y M, et al. A robust multi-source remote-sensing image registration method based on feature matching [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2892-2897. [凌志刚, 梁彦, 程咏梅, 等. 一种稳健的多源遥感图像特征配准方法[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2892-2897.]

[7] Lian L, Li G H, Zhang J, et al. An automatic registration algorithm of infrared and visible images based on optimal mapping of edges[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4): 570-581. [廉蔺, 李国辉, 张军, 等. 基于边缘最优映射的红外和可见光图像自动配准算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(4): 570-581.]

[8] Tsang P W M, Yuen T Y F. Affine invariant matching of broken boundaries based on an enhanced genetic algorithm and distance transform[J]. IET Computer Vision, 2008, 2(3): 142-149.

[9] Tsang P W M, Situ W C. Affine invariant matching of broken boundaries based on simple genetic algorithm and contour reconstruction[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31: 771-780.

[10] Zhao X P, Hu Z Y. A practical rough image curve matching method based on accumulation of evidence[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(3): 357-367. [赵训坡, 胡占义. 一种实用的基于证据积累的图像曲线粗匹配方法[J]. 计算机学报, 2005, 28(3): 357-367.]

[11] Zhang G M, Gao M T, Zeng J X. Recognizing planar curve based on NRLCTI and match sub-curve[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(2): 353-358. [张桂梅, 高满屯, 曾接贤. 基于 NRLCTI 码和匹配子曲线的平面曲线识别[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(2): 353-358.]

[12] Ren W, Zhang G M. Research on the principles and algorithms for recognizing curve object [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2009. [任伟, 张桂梅. 曲面物体的识别理论和方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2009.]

[13] Zhang G M, Ma K. Recognition of partially occluded and affine deformed object based on invariant moment[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(11): 4569-4581.

[14] Sim D G, Kwon O K, Park P H. Object matching algorithms using robust hausdorff distance measures[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3): 425-429.

© 中国图象图形学报版权所有