

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 8
Vol.17 No.

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8月 第17卷 第8期(总第196期)

目次

综述

可计算图像美学研究进展 王伟凝, 蚁静斌, 贺前华(893)

图像处理和编码

利用混沌 PSO 或分解的 2 维 Tsallis 灰度熵阈值分割 吴一全, 吴诗嫻, 张晓杰(902)

H. 264 并行编码中负载均衡方法 侯兴松, 刘大齐, 盛凯, 赖玉洁(911)

提升细节捕捉能力的非下采样轮廓波变换 郭洪, 李雪军(919)

SVD 域的图像高斯噪声强度估计 柳薇(923)

图像扩散去噪模型的分析与改进 傅绪加, 刘峰, 王信松(934)

小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用 李军, 潘峰, 杨晓元, 刘镇(946)

图像分析和识别

抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别 张荣, 王让定(953)

云的自适应阈值检测方法 黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷(960)

煤矸区分中的间隔灰度压缩扩阶共生矩阵 于国防(966)

离群样本划分的半监督模糊学习策略 宋晓宁, 杨静宇, 杨习贝(971)

多相 Chan-Vese 模型的直接对偶方法 刘存良, 潘振宽, 郑永果, 王国栋, 丁洁玉(979)

利用梯度信息快速提取直线边缘特征 夏军营, 徐小泉, 熊九龙(987)

2 维双树复小波不确定度加权融合的人脸识别 王仕民,叶继华,邓涛,王明文(995)

图像理解和计算机视觉

流形学习与非线性回归结合的头部姿态估计 范进富,陈锻生(1002)

计算机图形学

角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配 曾接贤,刘秀朋,符祥(1011)

弹性二次曲面模型下的 3 维形状表现与平滑 郝世杰,蒋建国,郭艳蓉,詹曙(1021)

医学图像处理

主动学习的白细胞图像自动分割 崔凤,潘晨,吴向平,徐军(1029)

遥感图像处理

Bregman 交替迭代遥感图像复原方法 徐焕宇,孙权森,罗楠,夏德深(1035)

基于各向异性 Markov 随机场的遥感影像亚像元尺度建筑物提取 李晓冬,凌峰,杜耘(1042)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 8 期

2012 年 8 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:010-64807995 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

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 8 August 2012

Contents

Review

Review for computational image aesthetics Wang Weining, Yi Jingjian, He Qianhua (893)

Image Processing and Coding

Two-dimensional Tsallis gray entropy image thresholding using chaotic particle swarm optimization or decomposition
..... Wu Yiquan, Wu Shihua, Zhang Xiaojie (902)

Load balancing for H. 264 parallel encoding Hou Xingsong, Liu Daqi, Sheng Kai, Dun Yujie (911)

Non-subsampled contourlet transform algorithm to promote detail information capturing ability Guo Hong, Li Xuejun (919)

Gaussian noise level estimation in SVD domain for images Liu Wei (923)

Analysis and improvement of image diffusion denoising models Fu Xujia, Liu Feng, Wang Xinsong (934)

Design of minimizing embedding impact function in DWT domain and its applications in steganography
..... Li Jun, Pan Feng, Yang Xiaoyuan, Liu Zhen (946)

Image Analysis and Recognition

Anti-compression approach to distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics
..... Zhang Rong, Wang Rangding (953)

Adaptive threshold approach for night-sky cloud inspection Huang Qian, Wang Shaolong, Xu Daolei, Liao Tingting (960)

Expanded order co-occurrence matrix to differentiate between coal and gangue based on interval grayscale compression
..... Yu Guofang (966)

Semi-supervised fuzzy learning strategy by using a way of partitioning the outlier instances
..... Song Xiaoning, Yang Jingyu, Yang Xibei (971)

Direct dual method of Chan-Vese model for multiphase segmentation
..... Liu Cunliang, Pan Zhenkuan, Zheng Yongguo, Wang Guodong, Ding Jieyu (979)

Fast line edge feature extraction using image gradients Xia Junying, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong (987)

Two-dimensional dual-tree complex wavelet transform uncertainty weighted fusion in face recognition
..... Wang Shimin, Ye Jihua, Deng Tao, Wang Mingwen (995)

Image Understanding and Computer Vision

Combining manifold learning and nonlinear regression for head pose estimation Fan Jinfu, Chen Duansheng (1002)

Computer Graphics

Representation and matching for planar curve based on corner distance matrix and concentric circles
..... Zeng Jiexian, Liu Xiupeng, Fu Xiang (1011)

Three-dimensional shape representation and smoothing with elastic quadratic patch model
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu (1021)

Medical Image Processing

White blood cell image segmentation based on active learning Cui Feng, Pan Chen, Wu Xiangping, Xu Jun (1029)

Remote Sensing Image Processing

Bregman alternating iterative method for remote sensing image restoration Xu Huanyu, Sun Quansen, Luo Nan, Xia Deshen (1035)

Building extraction at the sub-pixel scale from remotely sensed images based on anisotropic Markov random field
..... Li Xiaodong, Ling Feng, Du Yun (1042)

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)08-1011-10

论文引用格式: 曾接贤, 刘秀朋, 符祥. 角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(8): 1011-1020.

角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配

曾接贤¹, 刘秀朋², 符祥¹

1. 南昌航空大学软件学院, 南昌 330063; 2. 南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063

摘要: 曲线匹配对于物体识别、目标跟踪、碎片拼接等有着重要的意义。针对曲线匹配的效率和鲁棒性问题, 提出了一种基于角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配算法。该算法分为粗略匹配和精确匹配两个阶段。粗略匹配阶段首先采用角点距离矩阵来描述曲线; 然后通过子矩阵的方法来匹配曲线。精确匹配阶段首先采用同心圆划分的方法描述曲线; 然后通过两条曲线同心圆描述集的差异度量函数来度量他们的相似性。算法不仅具有平移、旋转、缩放不变性, 而且具有较强的鲁棒性, 可用于遮挡物体的匹配以及基于轮廓的图形拼接。实验结果表明了该算法的有效性和可行性。

关键词: 曲线描述; 曲线匹配; 角点距离矩阵; 子矩阵; 同心圆

Representation and matching for planar curve based on corner distance matrix and concentric circles

Zeng Jiexian¹, Liu Xiupeng², Fu Xiang¹

1. School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: Curve matching plays a significant role in object recognition, target tracking and fragment reassembling. An algorithm for planar curves based on corner distance matrix and concentric circles is presented. The algorithm includes two steps, namely rough matching and exact matching. The curves are represented using corner distance matrices in the rough matching stage, and then they are matched with a sub-matrix. As for exact matching, first, the representation of the curve uses concentric circles and then measures their similarity through two curve representation sets of concentric circles. The algorithm is robust to translation, rotation, and scaling. It can be used to match block objects and reassemble the graphic. The experiment results show the effectiveness and feasibility of algorithm.

Key words: curve representation; curve matching; corner distance matrix; sub-matrix; concentric circles;

0 引言

物体的轮廓信息(边缘)是物体最基本、最直观的特征。曲线是物体轮廓(边缘)的重要组成部分。如何对曲线进行快速、准确的匹配一直是模式识别、机器视觉和图像理解中的一个重要研究课题。曲线匹配在目标识别与跟踪、考古研究中

文物碎片的拼接与检索、图形的拼接、自动装配等领域有着广泛的应用。因此,提高轮廓曲线的匹配速度与精度具有重要的实用价值与理论意义。

在曲线匹配中,曲线的描述直接影响到曲线匹配的性能,一个好的曲线描述方法不仅应当具有平移、旋转、缩放不变性,而且还应具有一定的鲁棒性。曲线描述的方法有很多,总体上可以分为基于全局

收稿日期:2011-10-18;修回日期:2012-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(61165011);江西省自然科学基金项目(2008GZS0034)

第一作者简介:曾接贤(1958—),男,教授,1997年于西北工业大学获工学硕士学位,主要研究方向为图像处理和计算机视觉。E-mail:

zengjx58@163.com

特征的方法和基于局部特征的方法。基于全局特征的曲线描述方法,最常见的是链码。1961年, Freeman 引入链码的概念来描述曲线,其思想是用一些指定好方向和长度的直线段形成相连的线段序列来表征曲线。但是传统的直线链码方法不能够保证旋转和缩放不变性。后来,又出现了改进的链码,如夹角链码^[1]、Beamlet 夹角链码^[2]等。但这些改进的链码曲线描述方法,在确定线段长度时具有较高的时间复杂度。基于局部特征的曲线描述方法主要是采用关键点来描述曲线,如拐点、切点、角点^[3]等。这种基于关键点的匹配方法的优点是不需要提取出完整的物体轮廓,从而可以大大提高曲线匹配的效率,但是仅仅利用关键点来描述曲线,将会丢掉曲线平滑部分的有用信息。

曲线的匹配方法有很多,从曲线匹配的完整性看,可分为曲线的整体匹配和局部匹配。常见的曲线整体匹配方法有:文献[4-5]采用动态规划的方法以达到匹配曲线的目的,其中文献[4]是利用相应的特征点来匹配曲线,但是仅用到局部信息,忽略了全局信息,而且对噪声比较敏感;文献[5]则是采用曲线弧长和曲率的方法来匹配曲线,但采样率直接决定了匹配的效果,仍有较大的改进空间;文献[6]提出的曲线粗略匹配方法虽然提高了运算效率,但是只适用于开曲线之间的匹配,而且误匹配率较高;文献[7]采用了由粗到细的曲线匹配方法,目的是在保证匹配精度的基础上,减小曲线匹配的计算量,但由于在子曲线的描述时,采用面积阈值的方法,不具有缩放不变性,而且在关键点的描述部分并没有考虑噪声问题,这影响了匹配的鲁棒性;文献[8]提出了用曲线树来描述匹配曲线,其实质是从不同的尺度来描述曲线,但是在确定曲线起始点和构造曲线树时,时间复杂度很高。常见的曲线局部匹配算法有:文献[9]提出了一种平面曲线的部分匹配算法,该算法采用子矩阵匹配的方法来确定匹配区域,减少了搜索时间,但是误匹配率较高;文献[10]采用最长公共子序列的方法来实现碎片的自动拼接,但是受最长公共子序列算法的限制,出现误匹配的概率较大;文献[11]采用变换空间中的概率分布来完成曲线的局部匹配,但是计算量与精度呈现指数关系,对于精度要求高的情况,计算量过大;文献[12]采用由粗到细的曲线局部匹配算法,但该算法并不具有缩放不变

性,而且在精确匹配阶段采用等弧长采样并计算其曲率的方法,增大了该算法的时间复杂度;文献[13]提出的基于同心圆的曲线描述和匹配方法,仅仅适用于简单的开曲线之间的匹配,而且不具有缩放不变性。

针对曲线匹配的效率与鲁棒性问题,提出了一种基于角点距离矩阵和同心圆的曲线匹配算法。该算法分为粗略匹配和精确匹配两个阶段。粗略匹配阶段采用角点距离矩阵方法来描述曲线;然后通过子矩阵的方法来匹配曲线。精确匹配阶段首先采用同心圆划分的方法描述曲线;然后通过两条曲线同心圆描述集的差异度量函数来度量他们的相似性。基于同心圆划分的曲线描述集是由同心圆的相对半径和 3 组角度组成。这种描述方法在实际应用中可以根据曲线描述与匹配精度的需要来调整同心圆的个数,同心圆的个数越多,对曲线的描述也就越精确,相应的计算复杂度也有所提高。算法总体流程如图 1 所示。

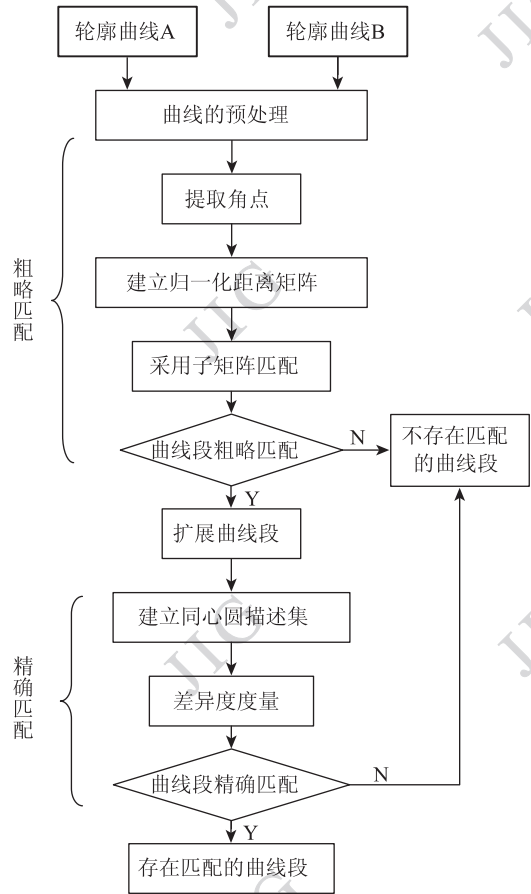


图 1 本文算法的流程图

Fig. 1 The algorithm process of the paper

1 基于角点距离矩阵的粗略匹配方法

为了提高曲线匹配的速度,同时又保证曲线匹配的准确性,提出将曲线匹配分为粗略匹配和精确匹配两个阶段。在粗略匹配阶段采用角点距离矩阵方法描述与匹配曲线,其基本思想是:首先提取轮廓曲线的角点信息,并建立归一化角点距离矩阵;然后对两条曲线的归一化角点距离矩阵采用子矩阵的方法进行匹配;最后对匹配得到的子曲线进行扩展从而得到粗略匹配后的结果。

1.1 轮廓曲线的提取及预处理

为了准确提取目标物体的轮廓曲线,经比较各种边缘检测算法的效果,采用 Canny 算子进行边缘提取,得到目标物体的轮廓曲线。但 Canny 算子提取得到的轮廓曲线可能存在不连续的像素点,本文用文献[14]方法来定位、度量轮廓上的间断点,并将其填充到轮廓中去,从而得到无间断点的轮廓曲线。

1.2 归一化角点距离矩阵

粗略匹配阶段,首先需要提取轮廓的角点信息,并建立归一化角点距离矩阵。文献[15]给出了基于多尺度空间的轮廓曲线的角点提取方法。该方法可以有效地抵御轮廓曲线数字化带来的影响,准确地反映轮廓曲线形状特征,而且具有较强的鲁棒性,同时还具有运算量小、定位准确的优点。因此,采用

文献[15]的方法提取轮廓曲线的角点。

对于一条曲线,角点距离矩阵反映了该曲线的轮廓信息。角点距离矩阵是由角点之间的欧氏距离所建立的 N 维方阵,其行是某一角点与其余所有角点之间的欧氏距离。角点距离矩阵具有平移、旋转不变性,通过归一化处理还具有缩放不变性。

定义 1 假设一条曲线有 $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n$ 个角点,其对应的角点坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 则定义归一化角点距离矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1}/d_{k,l} & d_{1,2}/d_{k,l} & \dots & d_{1,n}/d_{k,l} \\ d_{2,1}/d_{k,l} & d_{2,2}/d_{k,l} & \dots & d_{2,n}/d_{k,l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n,1}/d_{k,l} & d_{n,2}/d_{k,l} & \dots & d_{n,n}/d_{k,l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \dots & \phi_{1,n} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \dots & \phi_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n,1} & \phi_{n,2} & \dots & \phi_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,

$$d_{k,l} = \max(\sqrt{(x_k - x_l)^2 + (y_k - y_l)^2}) \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n$$

$$\phi_{i,j} = d_{i,j} / d_{k,l} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$$

由于该距离矩阵没有设定起始点,如果选择 (x_1, y_1) 为起始点,得到式(1)表示的矩阵 D ; 如果选择 (x_k, y_k) 为起始点,则得到矩阵 \tilde{D} 。

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} d_{k,k}/d_{k,l} & d_{k,(n-k+1)}/d_{k,l} & \dots & d_{k,1}/d_{k,l} & \dots & d_{k,(k-1)}/d_{k,l} \\ d_{(n-k+1),k}/d_{k,l} & d_{(n-k+1),(n-k+1)}/d_{k,l} & \dots & d_{(n-k+1),1}/d_{k,l} & \dots & d_{(n-k+1),(k-1)}/d_{k,l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{1,k}/d_{k,l} & d_{1,(n-k+1)}/d_{k,l} & \dots & d_{1,1}/d_{k,l} & \dots & d_{1,(k-1)}/d_{k,l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{(k-1),1}/d_{k,l} & d_{(k-1),(n-k+1)}/d_{k,l} & \dots & d_{(k-1),1}/d_{k,l} & \dots & d_{(k-1),(k-1)}/d_{k,l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{k,k} & \phi_{k,(n-k+1)} & \dots & \phi_{k,1} & \dots & \phi_{k,(k-1)} \\ \phi_{(n-k+1),k} & \phi_{(n-k+1),(n-k+1)} & \dots & \phi_{(n-k+1),1} & \dots & \phi_{(n-k+1),(k-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{1,k} & \phi_{1,(n-k+1)} & \dots & \phi_{1,1} & \dots & \phi_{1,(k-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{(k-1),1} & \phi_{(k-1),(n-k+1)} & \dots & \phi_{(k-1),1} & \dots & \phi_{(k-1),(k-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

显然,矩阵 \tilde{D} 可以由 D 通过行循环上移 $(k-1)$ 行,列循环左移 $(k-1)$ 列得到。因此,起始点的选取不会对匹配产生影响。

1.3 子矩阵匹配

设 $\kappa_1^A, \kappa_2^A, \dots, \kappa_m^A$ 是曲线 A 上的 m 个角点, $\kappa_1^B, \kappa_2^B, \dots, \kappa_n^B$ 是曲线 B 上的 n 个角点,采用式(4)的方

法,分别建立归一化角点距离矩阵 D^A 和 D^B 。约定 $\frac{0}{0} = 1$,理论上,如果曲线 A, B 存在部分匹配,并且匹配部分对应的 u 个角点分别为 $\kappa_p^A, \kappa_{p+1}^A, \dots, \kappa_{p+u}^A$ 和 $\kappa_q^B, \kappa_{q+1}^B, \dots, \kappa_{q+u}^B$, 则有

$$\Phi = \{\phi_{ij}\} = \begin{bmatrix} \frac{\phi_{p,p}^A}{\phi_{q,q}^B} & \frac{\phi_{p,(p+1)}^A}{\phi_{q,(q+1)}^B} & \dots & \frac{\phi_{p,(p+u)}^A}{\phi_{q,(q+u)}^B} \\ \frac{\phi_{(p+1),p}^A}{\phi_{(q+1),q}^B} & \frac{\phi_{(p+1),(p+1)}^A}{\phi_{(q+1),(q+1)}^B} & \dots & \frac{\phi_{(p+1),(p+u)}^A}{\phi_{(q+1),(q+u)}^B} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\phi_{(p+u),p}^A}{\phi_{(q+u),q}^B} & \frac{\phi_{(p+u),(p+1)}^A}{\phi_{(q+u),(q+1)}^B} & \dots & \frac{\phi_{(p+u),(p+u)}^A}{\phi_{(q+u),(q+u)}^B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

理想情况下子矩阵 Φ 的各因子应等于 1,但是实际情况中,矩阵各因子并不等于 1,而是一个约等于 1 的数值。因此实际应用中,可通过设置阈值来控制其匹配程度。

定义 2 为了判定曲线的相似程度,将

$$w = \sqrt{\sum (1 - \phi_{ij})^2} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, u; j = 1, 2, \dots, u$$

定义为对应归一化角点距离矩阵的曲线段的相似度。 w 越小,说明此距离矩阵对应的曲线部分的相似度越高。

子矩阵匹配:首先建立归一化角点距离矩阵 D^A 和 D^B ,并在 D^A 里取维数为 λ 的子矩阵 D_λ^A ;然后给定一个阈值 ε_1 ,将 D_λ^A 沿矩阵 D^B 主对角线遍历,计算每一次的 w 。若 $\min(w_\lambda) > \varepsilon_1$,则认为对应的曲线不匹配;如果 $\min(w_\lambda) < \varepsilon_1$,则 $\lambda = \lambda + 1$,重复上述遍历,直至找到满足 $\min(w_\lambda) < \varepsilon_1$ 的最大的 λ 。最大 λ 下的子矩阵 D_λ^A 所对应的曲线段被选为候选匹配子曲线。这里的 λ 表示子矩阵的维数。一般情况下,选取初值 $\lambda \geq 2$ 。如果 λ 的取值过大,可能会漏掉曲线上一些匹配的部分。

1.4 子矩阵匹配后的扩展

采用子矩阵匹配方法得到的匹配曲线,其首尾点都是角点,这就可能遗漏一些两角点之间的平滑曲线段。如图 2 所示,实际上,曲线 1 的 s_1, s_2, s_3 与曲线 2 的 s'_1, s'_2, s'_3 是对应匹配的,但是假如

只采用子矩阵匹配,得到的匹配曲线段就只有曲线段 s_2, s_3 和 s'_2, s'_3 ,而曲线段 s_1 和 s'_1 就会被漏掉。因此在子矩阵匹配完成后,要对匹配的曲线进行扩展,其方法是:分别对采用子矩阵所得的匹配曲线的起始匹配点和结束匹配点向外以等弧长采样,得到相同个数的采样点,并计算得到扩展后每个采样点的曲率。采样弧长各自按照 $\frac{d_{k,l}}{50}$ 选取, $d_{k,l}$ 由式(2)计算得到。曲线上任意一点的曲率为

$$k(u) = \frac{|x(u)y'(u) - x'(u)y(u)|}{(x(u)^2 + y(u)^2)^{1.5}} \quad (7)$$

定义 3 定义曲率误差为

$$\delta(i) = \sqrt{(k_a(i) - k_b(i))^2} \quad (8)$$

式中, $k_a(i)$ 表示曲线 A 上像素点 i 的曲率, $k_b(i)$ 表示曲线 B 上像素点 i 的曲率。

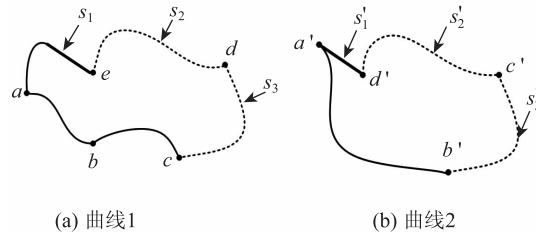
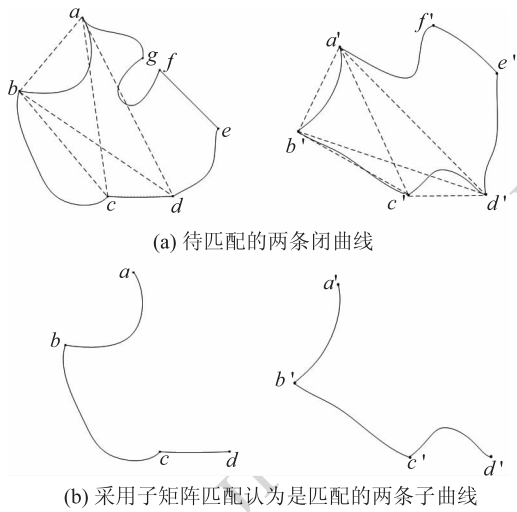


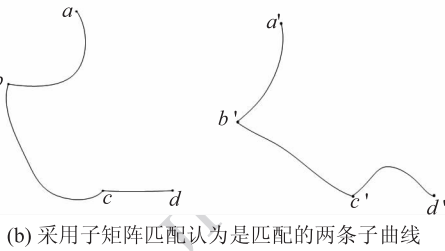
图 2 子矩阵匹配后遗漏的曲线段 (s_1 和 s'_1)
Fig. 2 The missing curve segments after matched by sub-matrix (s_1 and s'_1)

设定阈值 ε_2 , i 取 1,若 $\delta(i) < \varepsilon_2, i = i + 1$,直到 $\delta(i) \geq \varepsilon_2, (1 \leq i \leq \text{采样点数目})$ 时停止。将子矩阵匹配后的曲线端点扩展到该采样点处,作为待匹配的子曲线。

粗略匹配采用子矩阵匹配,不但计算简单,匹配快,而且还具有平移、旋转和缩放不变性。但由于粗略匹配是采用角点信息来描述曲线,必然会丢失角点之间的平滑部分,因此仅仅采用粗略匹配得到的结果并不一定是正确的匹配结果。如图 3(a)所示, a, b, c, d, e, f, g 和 $a', b', c', d', e', f', g'$ 分别是两曲线的角点,而且 $d_{a,b} = d_{a',b'}, d_{a,c} = d_{a',c'}, d_{a,d} = d_{a',d'}, d_{b,c} = d_{b',c'}, d_{b,d} = d_{b',d'}, d_{c,d} = d_{c',d'}$ 。通过子矩阵匹配得到的匹配子曲线如图 3(b)所示。显然,图 3(b)中两条子曲线并不匹配。为了提高曲线匹配的准确性,并消除误匹配,将给出基于同心圆划分的曲线描述与精确匹配方法。



(a) 待匹配的两条闭曲线



(b) 采用子矩阵匹配认为是匹配的两条子曲线

图 3 粗略匹配结果

Fig. 3 The roughly matching result

2 基于同心圆划分的曲线描述与精确匹配方法

尽管采用角点距离矩阵方法的粗略匹配计算简单、匹配快,但却存在较大的误匹配率,因此还需要对粗略匹配后的子曲线采取进一步的精确匹配,以减少误匹配率。在子曲线的精确匹配中,采用基于同心圆划分的曲线描述方法,通过比较同心圆描述集的角度累积误差,以达到对子曲线的精确匹配。

2.1 曲线描述

为了精确描述曲线,给出基于同心圆划分的曲线描述方法。如图 4 所示,给定子曲线 A' ($p_{1,1}, p_{1,2}$),其首尾端点为 $p_{1,1}, p_{1,2}$ 。

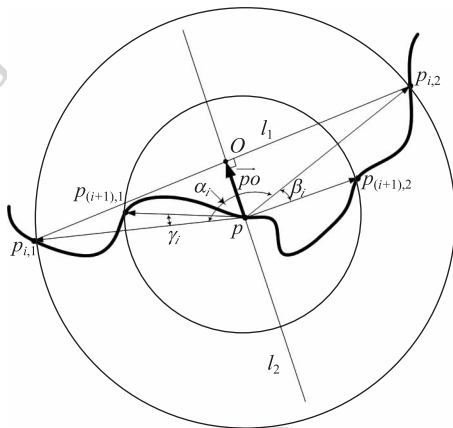


图 4 基于同心圆的曲线描述

Fig. 4 The curve description based on concentric circles

定义 4 设 r_{\max} 是曲线描述集中最大的同心圆半径, r_i 是该描述集中任一同心圆的半径,则定义曲线描述集中 r_i 对应的相对半径为

$$R_i = \frac{r_i}{r_{\max}}, 0 < R_i \leq 1 \quad (9)$$

如图 4 所示,基于同心圆划分的子曲线描述方法如下:

1) 连接子曲线首尾两点得到线段 l_1 , 作 l_1 的中垂线 l_2 并与 l_1 相交于点 o , 与子曲线相交于点 p 。以 p 为同心圆圆心, 由 p 到 o 作向量并记为 \vec{po} 。

2) 以圆心 p 到子曲线端点为最长半径 r_{\max} , 画圆与子曲线相交, 交点为 $p_{1,1}, p_{1,2}$ 。

3) 以 p 为圆心, $r_i = r_{\max} - \frac{r_{\max}}{t}(i - 1)$ ($i = 1, 2, \dots, t, t$ 为同心圆的个数) 为半径分别画同心圆, 得到同心圆与子曲线的交点 $p_{i,j}, i = 1, 2, \dots, t, j = 1, 2$ 。

4) 在相邻两同心圆中, 分别计算 $pp_{i,1}$ 与 $pp_{i,2}$ 之间的夹角 α_i ($0 \leq \alpha_i \leq \pi$)、 $pp_{i,2}$ 与 $pp_{(i+1),2}$ 之间的夹角 β_i ($0 \leq \beta_i \leq \pi$)、 $pp_{i,1}$ 与 $pp_{(i+1),1}$ 之间的夹角 γ_i ($0 \leq \gamma_i \leq \pi$)。将相邻两同心圆中半径较大的圆的半径作为夹角 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 的对应半径。

为了使本算法具有旋转不变性, 用以下准则来选定 β_i 和 γ_i : 以向量 \vec{po} 顺时针旋转, 先与之相交的那个角度设为 β_i , 另一个设为 γ_i 。

5) 计算每个半径对应的夹角 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2, \dots, t - 1$ 。

6) 由相对半径和对应的角度组成曲线的同心圆描述集 $\{R_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$ 。

由于曲线的不规则性, 基于同心圆划分的曲线描述中可能出现曲线与同心圆有多个交点的情况, 如图 5 所示。当同心圆与子曲线出现多个交点时, 为了仍能使用上述方法描述曲线, 需要剔除多余交点, 只保留两个交点。去除多余交点采用如下方法。

假设较大同心圆与曲线的交点为 $p_{i,1}, p_{i,2}$, 较小同心圆与子曲线出现 $m + n$ 个交点 $p_{(i+1),1}, p_{(i+1),2}, \dots, p_{(i+1),(m+n)}$, 其坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{m+n}, y_{m+n})$ 。首先, 以向量 \vec{po} 为分界线, 将两同心圆与曲线的交点分为两部分 $p_{(i+1),1}, p_{(i+1),2}, \dots, p_{(i+1),m}, p_{i,1}$ 和 $p_{(i+1),(m+1)}, p_{(i+1),(m+2)}, \dots, p_{(i+1),(m+n)}, p_{i,2}$; 然后计算 $p_{(i+1),1}, p_{(i+1),2}, \dots, p_{(i+1),m}$ 到 $p_{i,1}$ 的欧氏距离, 并将欧氏距离最小的交点保留, 其余的交点剔除。同理计算 $p_{(i+1),(m+1)}, p_{(i+1),(m+2)}, \dots, p_{(i+1),(m+n)}$ 到

$p_{i,2}$ 的欧氏距离,并将欧氏距离最小的交点保留,剔除其余的交点。经过这样处理后只有两个交点被保留;最后采用基于同心圆划分的子曲线描述方法计算同心圆描述集。图 5 所示,是曲线与较小的同心圆有 4 个交点的情况。由于 $\vec{p}\vec{o}$ 向量左侧曲线与同心圆只有一个交点,故直接保留,另一侧有 3 个交点,而 $p_{(i+1),2}$ 与 $p_{i,2}$ 的欧氏距离最小,故保留交点 $p_{(i+1),2}$,而交点 $p_{(i+1),3}$ 、 $p_{(i+1),4}$ 则被剔除。

基于同心圆划分的曲线描述,可根据匹配精度的要求,选取不同的同心圆个数。同心圆的个数越多,匹配越精确,但计算复杂度相应也增大。待匹配的曲线需选取相同的同心圆个数。

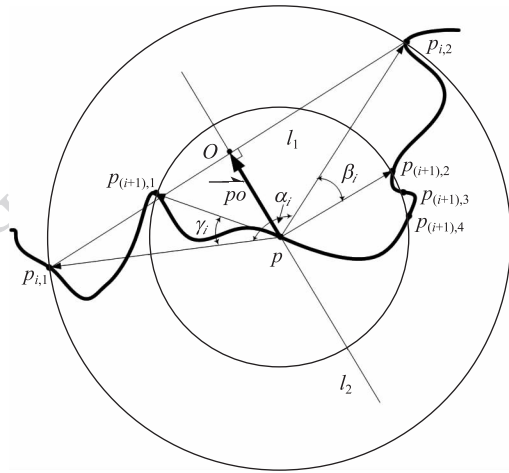


图 5 同心圆与曲线的交点多于 2 个

Fig. 5 The number of intersection for curve and concentric circles more than two

2.2 精确匹配

由 2.1 节基于同心圆划分的子曲线描述方法可得到两组待匹配子曲线的同心圆描述集 $\Theta_{A'}$ 和 $\Theta_{B'}$, 分别为

$$\begin{cases} \Theta_{A'} = \{R_{A'}, \alpha_{A'}, \beta_{A'}, \gamma_{A'}\} \\ \Theta_{B'} = \{R_{B'}, \alpha_{B'}, \beta_{B'}, \gamma_{B'}\} \end{cases} \quad (10)$$

定义 5 差异度量函数。已知两条曲线 A 和 B, 其待匹配子曲线分别为 A' 和 B' , 则定义他们的同心圆描述集的差异度量函数为

$$Dif_1 = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t R_i \cdot (|\alpha_{A'i} - \alpha_{B'i}|) \quad (11)$$

$$Dif_2 = \frac{1}{2t} \sum_{i=1}^t R_i \cdot (|\beta_{A'i} - \beta_{B'i}| + |\gamma_{A'i} - \gamma_{B'i}|) \quad (12)$$

式中, $\alpha_{A'i}$ 、 $\beta_{A'i}$ 、 $\beta_{A'i}$ 、 $\alpha_{B'i}$ 、 $\beta_{B'i}$ 、 $\beta_{B'i}$ 分别是集合 $\Theta_{A'}$ 和

$\Theta_{B'}$ 中的 $\alpha_{A'}$ 、 $\beta_{A'}$ 、 $\gamma_{A'}$ 、 $\alpha_{B'}$ 、 $\beta_{B'}$ 、 $\gamma_{B'}$ 里的第 i 个元素, R_i 是同心圆描述集中的相对半径。

为了得到准确的匹配结果, 求出 Dif_1 、 Dif_2 的值后进行融合, 得到

$$Dif = \mu \cdot Dif_1 + (1 - \mu) \cdot Dif_2 \quad (13)$$

式中, μ 为权值, 由于角度 α 的变化对曲线的影响要大于角度 β 、 γ 变化时对曲线的影响, 所以取 $\mu > 0.5$ 。

Dif 越小, 说明两曲线的匹配程度越高。设定一个合适的差异度阈值 Dif_{th} , 如果 $Dif \leq Dif_{th}$, 判定曲线是匹配的, 否则不匹配。多次实验结果表明, 差异度阈值 Dif_{th} 不大于 3 时可以得到比较正确的匹配结果。

2.3 基于同心圆划分的曲线描述的性能

好的曲线描述方法应该不随曲线的平移、旋转和缩放的变化而变化, 并且具有较好的鲁棒性和较低的计算复杂度。下面就从这些方面来评估基于同心圆划分的曲线描述方法。

同心圆划分的描述集中角度的两条边是同心圆与曲线的交点之间的连线, 因此它的描述具有平移不变性; 曲线描述中, 向量 $\vec{p}\vec{o}$ 消除了因为旋转带来的角度对应不一致的问题, 使得该算法具有旋转不变性; 由于角度只与两条边的夹角大小有关, 而与两条边的长度变化无关, 所以该算法具有缩放不变性。基于同心圆划分的曲线描述方法可以比较精确地描述曲线, 其描述精度随着同心圆个数的不同而不同, 而且对于曲线局部较小的扰动不敏感, 因此也具有较好的鲁棒性。时间复杂度上, 该描述集中包括 3 组角度, 只需 $3t$ 次运算。

3 实验结果与分析

3.1 实验 1

实验 1 的原始图像是西藏行政区域图。图 6(a) 所示的封闭曲线是利用 Canny 算子提取后并用文献[14]的方法处理后的西藏行政区域的完整边界。图 6(b) 所示是从图 6(a) 中裁剪的部分边界, 并加入局部扰动后经过旋转 (逆时针 30°) 和缩放 (缩小为原裁剪曲线的 80%) 得到的部分曲线。

粗略匹配阶段采用角点距离矩阵匹配的方法, 首先采用文献[15]的方法提取出角点, 如图 7 所示, 并建立归一化角点距离矩阵; 然后通过子矩阵匹配, 并扩展后得到图 6(a) 中与图 6(b) 匹配的子曲线, 如图 8 所示, 这里阈值 ε_1 取 0.8, ε_2 取 0.5, λ 取

3. 精确匹配阶段采用基于同心圆划分的曲线描述与匹配方法,同心圆描述如图 9 所示,为了在保证匹配精度的前提下尽量减小算法的时间复杂度,选择同心圆的个数为 10。表 1 所示是基于同心圆划分得到的曲线描述集,取差异度阈值 Dif_{th} 为 3, μ 为 0.7。图 10 所示是将匹配结果拼接后的图形。实验中 $Dif_1 = 2.8784, Dif_2 = 1.6086, Dif = 2.4975$ 。

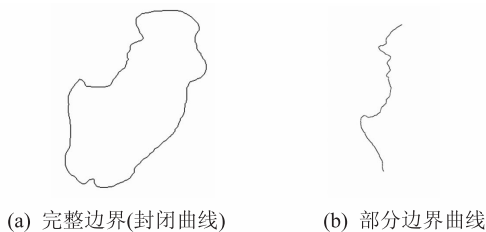


图 6 西藏自治区边缘轮廓图
Fig. 6 The edge contour of Xi Zang province

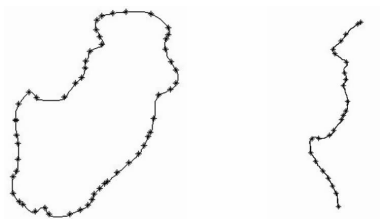


图 7 采用文献[15]方法提取出的角点
Fig. 7 The corner extracted by literature[15]

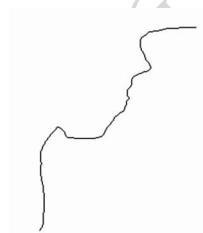


图 8 子矩阵匹配后图 6(a)中与图 6(b)匹配的子曲线
Fig. 8 The sub-curve of Fig. 6(b) matched by sub-matrix

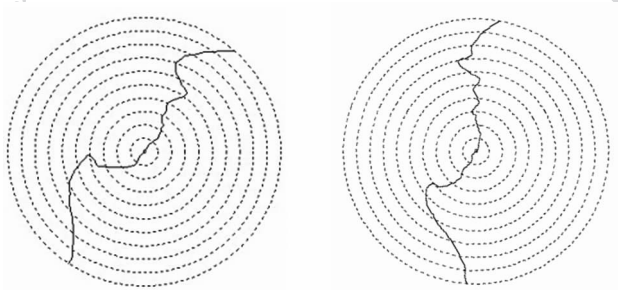


图 9 子曲线的同心圆描述
Fig. 9 The description of concentric circles of sub-curve

表 1 基于同心圆划分的曲线描述集
Table 1 The sets of curve description based on concentric circles

同心圆描述集				
$r_w = r_i/r_{max}$	α_i	β_i	γ_i	
1	172.249 3	7.153 9	2.147 6	
0.9	178.449 3	8.802 7	4.711 2	
0.8	164.935 3	5.830 3	9.149 9	
0.7	149.955 1	5.753 9	15.750 9	
子曲线 A'	0.6	139.958 2	9.773 0	12.021 6
0.5	137.709 5	9.470 7	7.684 8	
0.4	120.554 0	0.855 1	17.676 6	
0.3	139.085 6	11.482 0	12.790 6	
0.2	163.358 3	1.242 4	20.998 7	
1	175.546 4	6.478 2	2.421 7	
0.9	175.553 6	5.024 2	5.174 3	
0.8	165.355 1	6.309 3	9.931 1	
0.7	149.114 6	1.696 6	16.893 3	
子曲线 B'	0.6	133.918 0	8.712 5	13.198 1
0.5	129.432 4	1.797 1	9.095 2	
0.4	136.730 4	2.437 8	9.722 1	
0.3	144.014 8	2.891 3	0.382 3	
0.2	146.523 7	4.398 7	6.445 4	

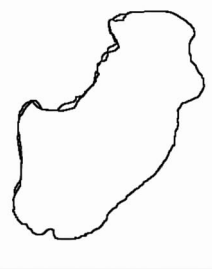


图 10 匹配结果拼接后的图形
Fig. 10 The result graphics after matching

3.2 实验 2

实验 2 的原始图像分别是云南省行政区域图和四川省行政区域图。图 11 所示的封闭曲线是利用 Canny 算子提取出来的云南省行政区域和四川省行政区域的完整边界。

粗略匹配阶段,首先采用文献[15]的方法提取

轮廓的角点,如图 12 所示,并建立归一化角点距离矩阵;然后通过子矩阵匹配,并扩展后得到两轮廓曲线的待匹配子曲线,如图 13 所示,这里的阈值 ε_1 取 0.5, ε_2 取 0.6, λ 取 3。精确匹配阶段采用同心圆划分的曲线描述方法,同心圆描述如图 14 所示。为了在保证匹配精度的前提下尽量减小算法的时间复杂度,选择同心圆的个数为 10。表 2 所示是基于同心圆划分得到的曲线描述集。本实验取差异度阈值 Dif_{th} 为 1, μ 为 0.7。图 15 所示是将匹配结果拼接后的图形。实验中 $Dif_1 = 0.3492$, $Dif_2 = 0.8665$, $Dif = 0.5044$ 。

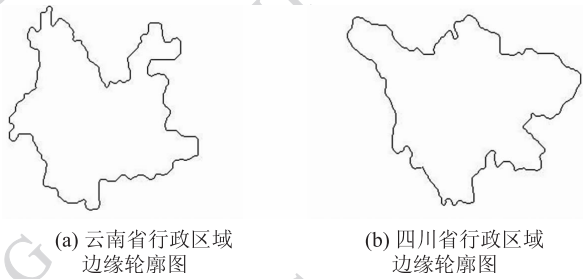


图 11 云南省和四川省行政区域边缘轮廓图

Fig. 11 The edge contour of Si Chuan and Yun Nan provinces

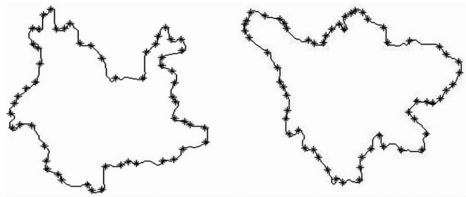


图 12 采用文献[15]方法提取出的角点
Fig. 12 The corner extracted by reference[15]



图 13 子矩阵后在轮廓图上找到的待匹配曲线段
Fig. 13 The sub-curve matched by sub-matrix

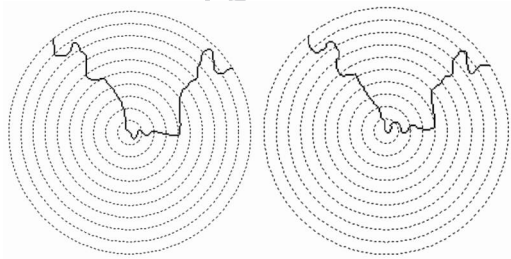


图 14 子曲线的同心圆描述
Fig. 14 The description of concentric circles of sub-curve



图 15 四川和云南行政区域边缘轮廓匹配结果
拼接后的图形

Fig. 15 The result graphic after matching for SI CHUAN and YUN NAN provinces

表 2 基于同心圆划分的曲线描述集

Table 2 The sets of curve description based on concentric circles

		同心圆描述集			
		$r_w = r_i/r_{max}$	α_i	β_i	γ_i
子曲线 A'	1	97.087 2	5.835 7	3.276 0	
	0.9	96.935 1	10.439 1	11.233 6	
	0.8	86.723 3	3.675 3	2.327 4	
	0.7	90.025 4	2.601 2	0.761 5	
	0.6	80.201 3	0.375 8	19.325 3	
	0.5	60.564 7	15.023 6	2.012 5	
	0.4	99.981 8	0.382 6	30.156 8	
	0.3	30.258 9	0.123 8	2.072 6	
	0.2	52.140 2	2.726 6	1.265 2	
	子曲线 B'	1	97.257 2	5.625 3	3.063 2
0.9		97.072 1	10.523 2	11.367 4	
0.8		86.586 7	3.528 6	2.451 2	
0.7		90.122 4	2.580 2	0.881 6	
0.6		80.502 4	0.342 4	19.562 5	
0.5		61.264 0	15.423 1	2.672 1	
0.4		99.783 5	5.865 6	39.276 1	
0.3		35.133 9	5.533 7	15.322 6	
0.2		55.141 6	7.358 6	9.294 2	

3.3 实验结果分析

从实验 1 和实验 2 中可以看出,本文算法具有旋转、平移、缩放不变性,而且具有一定的鲁棒性。精确匹配阶段,基于同心圆划分的曲线描述方法通过同心圆半径之间的角度来描述曲线,其中角度 α 是同心圆圆心到某一同心圆与曲线相交的两点连线段之间的夹角,另外两组角度 β 、 γ 是同心圆圆心到两相邻同心圆与曲线同一侧相交的两点连线段之间的夹角。 α 描述的是一种整体的信息,其改变对曲线的影响较大; β 、 γ 描述的则是局部信息,其改变对曲线的影响相对较小,因此相似性度量函数中, μ 的取值应大于 0.5,实验结果也验证了这一点。由图 10 和图 15 不难发现,图 15 中两轮廓匹配部分之间的差异要明显小于图 10 两曲线匹配部分的差异,与实验中的 *Dif* 的结果相符,说明 *Dif* 正确反映了两曲线之间的差异。由实验 1 可以看出本文算法对部分遮挡的、受到噪声影响的轮廓曲线的匹配具有较好的效果。实验 2 则说明本文算法可以用于图形的拼接。

3.4 计算复杂度分析

本文算法的计算复杂度由粗略匹配阶段的复杂度和精确匹配阶段的复杂度两部分组成。

1) 粗略匹配阶段的复杂度: 设待匹配的两条曲线的角点个数分别为 m 和 n , 则子矩阵匹配最多需要 $2mn - \min(m+n) - k$ 次运算。

2) 精确匹配阶段的复杂度: 设同心圆的个数为 t , 则该匹配阶段需要 $3t$ 次的运算。

4 结 论

通过粗略匹配与精确匹配相结合的逐层匹配算法在保证匹配结果准确性的基础上提高了鲁棒性。粗略匹配阶段采取子矩阵的匹配方法, 计算简单, 匹配快, 尽管误匹配率较大, 但可去除大部分不匹配曲线段, 减少进入精确匹配阶段的曲线段数量。精确匹配阶段采用基于同心圆划分的曲线描述和匹配方法, 其匹配精度可由阈值控制。整个匹配过程中, 无论是粗略匹配阶段所采用的角点距离矩阵方法, 还是精确匹配阶段所采用的基于同心圆划分的方法, 都具有旋转、平移和缩放不变性, 并且具有较好的鲁棒性。本文算法可用于遮挡物体的匹配以及图形的拼接。

本文算法的匹配精确度和计算复杂度主要由阈

值 ε_1 、 ε_2 决定。如何取合适的阈值是算法的关键。在粗略匹配阶段, 一般采取比较宽松的阈值以确保匹配的曲线段不会被遗漏。另外, 由于子矩阵的匹配, 需要提取角点, 因此对无角点或只有一个角点的闭曲线, 无法达到较好的匹配结果, 即本文算法不适用于无角点或只有一个角点的闭曲线匹配, 如圆形物体等。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Y, Chen Y Q. Included angle chain: a method for curve representation[J]. Journal of Software, 2004, 15(2): 300-307. [赵宇, 陈雁秋. 曲线描述的一种方法: 夹角链码[J]. 软件学报, 2004, 15(2): 300-307.]
- [2] Zeng J X, Hu H X, Li G. Method for curve representation against rotation, scaling and translation[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(31): 140-144. [曾接贤, 胡海霞, 李钢. 一种旋转、尺度和平移不变的曲线描述方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(31): 140-144.]
- [3] Qian W G, Lin X Z. Curvature calculation and corners extraction of image contour[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(4): 63-68. [钱文光, 林小竹. 图像轮廓曲率计算与角点提取[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 63-68.]
- [4] Sebastian T B, Klein P N, Kimia B B. On aligning curves[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(1): 116-125.
- [5] Liu L G, Wang G P, Zhang B. Perceptually based approach for planar shape morphing[C]// Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Seoul, Korea: Proceedings of Pacific Graphics, 2004, 111-120.
- [6] 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): 358-367. [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): 358-367.]
- [7] Zhang G M, Ren W, Xu F. Curve representation and matching based on feature points and minimal area[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 1159-1164. [张桂梅, 任伟, 徐芬. 基于特征点和最小面积的曲线描述和匹配[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 1159-1164.]
- [8] Chen X C, Ye M D, Ni C M. A Method for Curve Representation Based on Binary Tree[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(1): 116-121. [陈孝春, 叶寒冬, 倪臣敏. 基于二叉树的曲线描述方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(1): 116-121.]
- [9] Eli Saber, Xu Y W, A Murat Tekalp. Partial shape recognition by sub-matrix matching for partial matching guided image labeling[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(10): 1560-1573.
- [10] Pan R J, Meng X X, Tu C H. Fragment reassembly based on

- LCS matching [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(3): 350-356. [潘荣江, 孟祥旭, 屠长河. 一种基于 LCS 的物体碎片自动拼接方法[J]. 计算机学报, 2005, 28(3): 350-356.]
- [11] Alt H, Scharf L, Scholz S. Probabilistic matching of sets of polygonal curves[C]// Proceedings of the 22nd European Workshop on Computational Geometry. Delphi, Greece, Menelaos Karavelas. 2006: 107-110.
- [12] Zhang C Y, Pan R J. A global to local partial matching algorithm for planar curves [J]. Journal of Computer-Aided Design&Computer Graphics, 2008, 20(7): 894-899. [张春莹, 潘荣江. 由整体到局部的平面曲线部分匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(7): 894-899.]
- [13] Maher Al-Khaiyat, Farhad Kamangar. Planar curve representation and matching[J]. Computer Science and Engineering Department, 1998, Texas 76019, 174-184.
- [14] Zhu Y J, Zhang L Y, Zhou L S. Contour extraction and curvature calculation for fragment reassembly[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2004, 20(2): 181-186.
- [15] Zhang X H, Lei M, Yang D. Robust image corner detection based on multi-scale curvature product[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(7): 1270-1275. [张小洪, 雷明, 杨丹. 基于多尺度曲率乘积的鲁棒图像角点检测[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(7): 1270-1275.]