

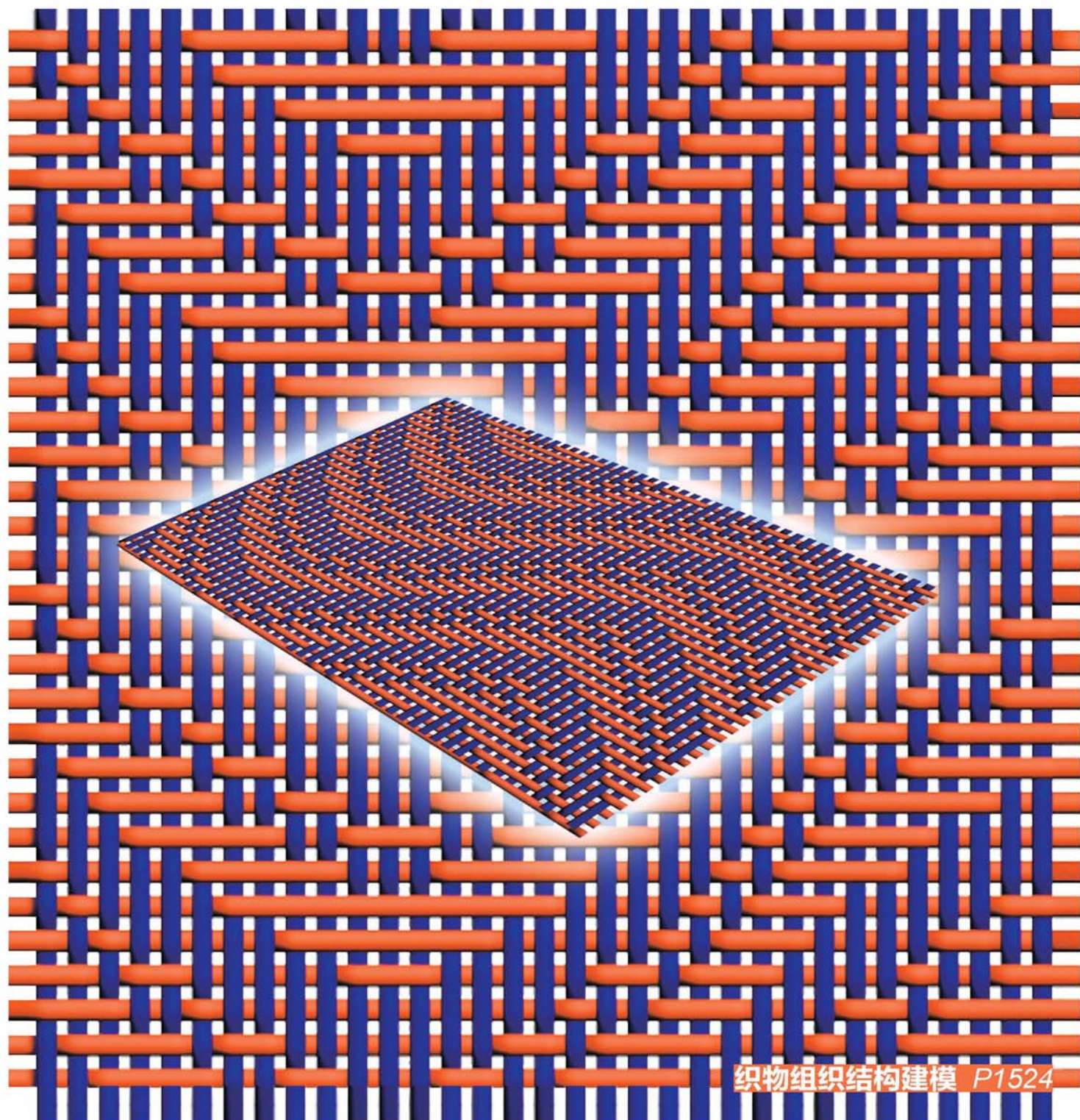


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
10
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

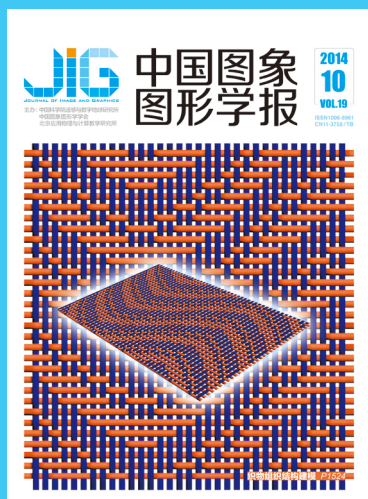


织物组织结构建模 P1524

中国图象图形学报

刊名题字：宋健

月刊（1996年创刊）



第19卷第10期（总第222期）

2014年10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

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

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.

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

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, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

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

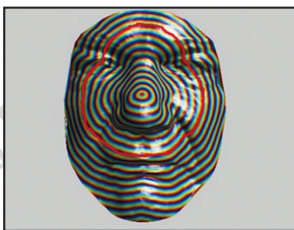
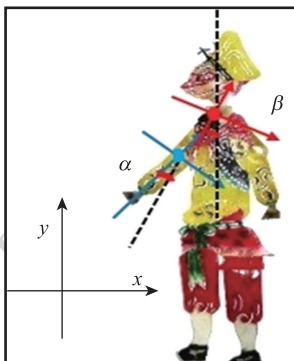
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

自适应梯度重建分水岭分割
算法(第1430页)基于特征点针对表情变化的
3维人脸识别(第1459页)数字皮影的交互仿真和动画
绘制(第1490页)

综述

2维至3维图像/视频转换的深度图提取方法综述

李可宏, 姜灵敏, 龚永义 1393

图像处理和编码

优化参数化二元模映射信息隐藏

廖琪男, 柯琦, 赖振丹 1407

基于分数阶微积分的噪声检测和图像去噪

杨柱中, 周激流, 郎方年 1418

图像分析和识别

自适应梯度重建分水岭分割算法

张志禹, 孟令辉, 雷涛 1430

鲁棒空间约束的模糊聚类图像分割

刘金尧, 纪则轩 1438

灰度级信息的目标边界精确周长估算

吴秦, 周琪, 梁久祯 1449

基于特征点表情变化的3维人脸识别

李燕春, 达飞鹏 1459

图像理解和计算机视觉

曲率无穷范数约束的曲线3维重建

贺磊盈, 武传宇, 杜小强 1468

光照变化条件下的光流估计

刘骏, 祖静, 张瑜, 张红艳 1475

GPU近实时线性双目立体代价聚合

陈彬, 陈和平, 李晓卉 1481

计算机图形学

数字皮影的交互仿真和动画绘制

陈璇, 张明敏, 潘志夷 1490

遥感图像处理

由航空影像自动重建大范围3维地形

杨阿华, 李学军, 谢剑薇, 李东岳 1500

结合结构相似度的自适应多尺度SAR图像变化检测

崔莹, 熊博莅, 蒋咏梅, 匡纲要 1507

第11届全国智能CAD与数字娱乐学术会议专栏

特征驱动先验的归一化卷积超分辨率重建

徐枫, 严锡君, 黄陈蓉, 郑胜男, 黄凤辰, 徐立中 1514

机织物组织图的数学描述与3维几何建模

杨允出, 李基拓, 陆国栋 1524

虚拟手术流血模拟的GPU加速实现

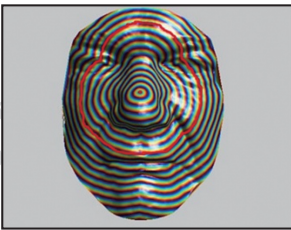
赖颢升, 向辉 1532

CONTENTS

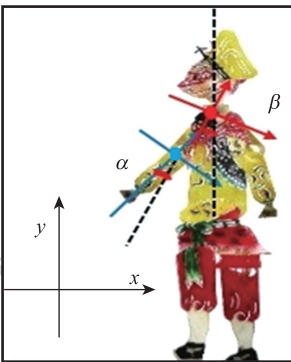
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Adaptive gradient reconstruction for watershed based image segmentation (P1430)



Expression-insensitive 3D face recognition method based on facial fiducial points(P1349)



Interaction and animation simulation of digital shadow play(P1490)

Review

- Depth map extraction methods in 2D-3D image/video conversion
Li Kehong, Jiang Lingmin, Gong Yongyi 1393

Image Processing and Coding

- Optimal parameterized binary modulo mapping steganography
Liao Qinan, Ke Qi, Lai Zhendan 1407
- Noise detection and image de-noising based on fractional calculus
Yang Zhuzhong, Zhou Jiliu, Lang Fangnian 1418

Image Analysis and Recognition

- Adaptive gradient reconstruction for watershed based image segmentation
Zhang Zhiyu, Meng Linghui, Lei Tao 1430
- Robust spatial factor based fuzzy clustering for image segmentation
Liu Jinyao, Ji Zexuan 1438
- Accurate perimeter estimation of target boundary based on gray-level information
Wu Qin, Zhou Qi, Liang Jiuzhen 1449
- Expression-insensitive 3D face recognition method based on facial fiducial points
Li Yanchun, Da Feipeng 1459

Image Understanding and Computer Vision

- Three dimensional curve reconstruction under the L-infinity norm of curvatures
He Leiying, Wu Chuanyu, Du Xiaoqiang 1468
- Optical flow estimation method under the condition of illumination change
Liu Jun, Zu Jing, Zhang Yu, Zhang Hongyan 1475
- Near real time linear stereo cost aggregation on GPU
Chen Bin, Chen Heping, Li Xiaohui 1481

Computer Graphics

- Interaction and animation simulation of digital shadow play
Chen Xuan, Zhang Mingmin, Pan Zhigeng 1490

Remote Sensing Image Processing

- Automatic reconstruction of large area 3D terrain from aerial imagery
Yang Ahua, Li Xuejun, Xie Jianwei, Li Dongyue 1500
- Multi-scale approach based on structure similarity for change detection in SAR images
Cui Ying, Xiong Boli, Jiang Yongmei, Kuang Gangyao 1507

Column of CIDE'2014

- Normalized convolution based super-resolution reconstruction using feature-driven prior
Xu Feng, Yan Xijun, Huang Chenrong, Zheng Shengnan, Huang Fengchen, Xu Lizhong 1514
- Mathematical expression and 3D geometrical modeling of weave diagram
Yang Yunchu, Li Jituo, Lu Guodong 1524
- Bleeding simulation of virtual surgery implemented on GPU
Lai Haosheng, Xiang Hui 1532

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)10-1449-10

论文引用格式: Wu Q, Zhou Q, Liang J Z. Accurate perimeter estimation of target boundary based on gray-level information[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(10): 1449-1458. [吴秦, 周琪, 梁久祯. 灰度级信息的目标边界精确周长估算[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(10): 1449-1458.][DOI:10.11834/jig.20141006]

灰度级信息的目标边界精确周长估算

吴秦, 周琪, 梁久祯

江南大学物联网工程学院智能系统与网络计算研究所, 无锡 214122

摘要: **目的** 针对图像目标边界不连续或具有模糊性导致的目标周长无法精确估算这一问题, 结合边界跟踪, 提出一种基于灰度级信息的目标边界精确周长估算方法。 **方法** 该方法利用目标边界的灰度级信息, 同时结合边界跟踪得到的内外边界来估计目标图像的边界周长, 从而提高边界周长估计的精确性和鲁棒性。为了获得目标物体真实周长, 实验采用人工合成图像。 **结果** 实验应用所提方法和3种传统周长估算方法分别计算合成目标对象的周长, 并与真实周长比较。为了验证所提方法的有效性和鲁棒性, 实验中对目标对象的边界进行不同程度的加厚模糊化; 并在边界加入噪声, 使边界不连续。当边界变得复杂时, 本文所提方法的优势得到极大体现。 **结论** 实验结果表明, 在边界模糊和边界不连续的情况下, 本文所提的算法具有更好的适应性和稳定性。

关键词: 周长估计; 边界跟踪; 内外边界; 灰度级信息; 模糊边界; 不连续边界

Accurate perimeter estimation of target boundary based on gray-level information

Wu Qin, Zhou Qi, Liang Jiuzhen

Institute of Intelligent Systems and Network Computing, School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: **Objective** The perimeter of a target boundary in a 2D image is an essential object feature in image analysis. However, this feature is usually inaccurately estimated because of discontinuous or blurred target boundaries. Accordingly, this study proposes an improved method of perimeter estimation. This method is based on gray-level information and combined with boundary tracking. **Method** Different from the traditional methods that generally use binary information to calculate the perimeter, the proposed method utilizes gray-level information in digital images to obtain substantial information on a target boundary. The concepts of pixel coverage, internal boundary, and external boundary are introduced. The slope at each configuration on the internal and external boundaries is computed, and the perimeters of the internal and external boundaries are estimated based on the arc length integration formula. The perimeter of the target object boundary is obtained by combining the perimeter information on the internal and external boundaries. **Result** The perimeters of the target object boundaries are estimated using the proposed method and three classical methods. Synthetic images are used to obtain the exact perimeters of the target objects. The results are compared with the ground truth perimeters of the target objects in synthetic images. In the first two experiments, synthetic images with continuous and blurred boundaries are tested. The performance of the proposed method is similar to that of the classical methods but is better than that of the original gray-level method. In the third experiment, synthetic images with discontinuous and blurred boundaries are tested. In this case, the two classical geometrical methods are not applicable, whereas the proposed method remains to have satisfactory performance.

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61202312, 61170121); 教育部留学回国人员科研启动基金项目

第一作者简介: 吴秦(1978—), 女, 副教授, 2011年于美国西弗吉尼亚大学获数学博士学位, 主要研究领域为机器视觉、模式识别。

E-mail: qinwu@jiangnan.edu.cn

ance. The advantage of the proposed method is more obvious when the boundary of the target is complex. **Conclusion** Compared with the classical methods, the proposed method has better adaptability and stability for target objects with blurred or discontinuous boundaries.

Key words: perimeter estimation; boundary tracking; internal and external boundaries; gray level; fuzzy boundary; discontinuous boundary

0 引言

在图像分析领域,2 维图像中目标物体的周长是一个重要的目标形态特征,在现实生活中具有十分广泛的应用^[1-2]。表面上这是一个很简单的工作,但是目前却很难从一幅数字图像中获得目标物体的精确周长。一方面,噪声对周长计算结果产生了不同层次的干扰;另一方面,目标物体边界的模糊性、复杂性给计算带来了一定的困难,也对最后的计算结果产生很大的影响。因而,近年来不少学者都围绕这个问题进行了研究,即如何实现目标物体的精确周长计算^[3-6]。

当前许多文章提出的方法都是基于二值图像^[7-8],即在计算周长之前,图像中的目标像素值被定义为 1,背景像素值被定义为 0,这种思想可以简化目标周长的计算,但与此同时也会丢失大量的图像信息,特别是边界上的信息。显然,目标周长是由目标边界所确定,边界信息的丢失,将直接导致最后周长计算不精确。相比二值图像,数字化的灰度图像包含更多的信息,因而能够保证最终的周长计算结果更符合实际图像中目标的边界周长^[9-10]。

Sladoje 和 Lindblad^[11]提出了一种基于灰度级信息的局部目标边界周长计算方法(HPGL)。HPGL 方法使用覆盖分割的方法^[12-13]得到保留灰度级信息的覆盖值灰度图像,然后计算局部模板配置中的周长,并给这些局部的周长计算结果一个优化参数,累积这些局部周长最终得到整个目标的边界周长。

然而,HPGL 方法对于低分辨率或者边界比较模糊的图像,计算结果很不理想,其主要原因在于 HPGL 对于目标边界厚度超过 1 的图像,出现重复计算边界的问题。但是,在保留了边界的灰度级信息后,目标边界的模糊性是不可避免的。针对这种矛盾性,提出了一种基于边界跟踪(boundary tracking)的 HPGL 方法(BTHPGL),该方法通过边界跟踪得到图像中目标的内边界和外边界,然后再利用

HPGL 方法计算图像中目标的边界周长,最后根据目标的特定形状,得到一个最优的折中值。

BTHPGL 方法既适用于灰度图像也适用于彩色图像。虽然该方法是针对保留灰度级信息的覆盖值^[13]灰度图像,但是对于其他形式的图像,可以在前期对它进行预处理,即采用某种图像分割方法将其转化为一个近似的保留灰度级信息的覆盖值灰度图像。实验结果验证了该方法的有效性。

1 相关工作

1.1 像素覆盖数字化

定义 1 假定一个连续目标 $S \subset \mathbf{R}^2$, 投影到 2 维数字化网格平面上,每一个网格对应一个像素 $p_{i,j}$, 目标 S 的像素覆盖数字化定义^[12]为

$$D(S) \approx \left\{ \left((i,j), \frac{A(p_{i,j} \cap S)}{A(p_{i,j})} \right) \mid (i,j) \in \mathbf{Z}^2 \right\} \quad (1)$$

式中, $A(X)$ 表示集合 X 的面积, $\mathbf{Z}^2$ 表示 2 维数字化网格平面。

定义 1 假定分配给网格像素的值是非量化的真实覆盖值,但是实际上在计算机中存储和分析图像时,会受到灰度级的限制,比如灰度图像只有 256 级,因此引出下面的定义。

定义 2 假定一个连续目标 $S \subset \mathbf{R}^2$, 投影到 2 维数字化网格平面上,并给定一个 n 级的量化标准。量化级为 n 的目标 S 的像素覆盖数字化定义^[12]为

$$D_n(S) \approx \left\{ \left((i,j), \frac{1}{n} \left\lfloor n \frac{A(p_{i,j} \cap S)}{A(p_{i,j})} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \mid (i,j) \in \mathbf{Z}^2 \right\} \quad (2)$$

式中, $\lfloor x \rfloor$ 表示小于 x 的最大整数。

定义 2 使得分配给网格像素的覆盖值被限制在一个 n 级的量化数字化集合 $T_n = \left\{ 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, \frac{n}{n} \right\}$ 中,这个集合对应存在的灰度级集合, $n=1$ 时表示二值图像, $n=255$ 时表示 8 位灰度图像。

由于目标与每个像素网格相交的面积无法计算,式(1)(2)只能限于理论上的抽象表示,而不能计算出目标图像的像素覆盖数字化。因此,必须使用其他的方法来近似获得目标图像的像素覆盖数字化。

定义3 假定已经通过一种自适应算法(如灰度直方图)找到一对阈值 b 和 f , $f-b>\theta>0$, θ 为自定义阈值。令 $G(p_{i,j})$ 表示该 $p_{i,j}$ 的覆盖值:

若 $p_{i,j} \leq b$, 则 $p_{i,j}$ 定义为背景, $G(p_{i,j}) = 0$;

若 $p_{i,j} \geq f$, 则 $p_{i,j}$ 定义为目标, $G(p_{i,j}) = 1$;

若 $b < p_{i,j} < f$, 则 $p_{i,j}$ 定义为边界 ($0 \sim 1$),

$$G(p_{i,j}) = \frac{p_{i,j} - b}{f - b}.$$

定义3 介绍一种针对灰度图像的双阈值分割算法, θ 越大, 越能凸显边界, 使图像的背景和目标形成鲜明对比。对于彩色图像或其他图像, 可以先将其转化为灰度图像, 或者使用其他合适的图像分割方法对其进行处理, 最后得到近似的覆盖数字化图像。

1.2 DSS 方法

DSS(digital straight segment)方法是一种将数字曲线划分为数字化直线片段的几何方法^[14]。该方法将数字化区域边界曲线划分为数字化直线片段, 通过一定的法则使这些片段尽可能的长。用 ACC's (abstract cellular complexes) 抽象单位复合体 C 来表示数字化区域, 即 $C = [E, B, M]$, 其中 E 表示元素 (elements or cell) 集, B 表示边界关系, 也就是元素与元素之间的关系, 描述它们如何生成边界, $M(E)$ 表示 E 的维数。

若 E 中元素为点 (points), 即 0-cell or point, 则 $M(E) = 0$;

若 E 中元素为边 (cracks), 即 1-cell or crack, 则 $M(E) = 1$;

若 E 中元素为网格 (pixels), 即 2-cell or pixel, 则 $M(E) = 2$ 。

DSS 方法主要应用于具有封闭边界的目标区域的周长计算。对于一个目标区域, 把像素看成网格正方形, 它的边和顶点作为边界时, 只要目标区域连通, 那么所求的目标区域的边界就是闭合的。根据 ACC's 的定义, E 集合可以是像素方格, 也可以是像素方格的边, 或者是像素方格的点, 由于本研究只对目标边界感兴趣, 所以 E 集合用于表示目标边界像素方格的边和顶点, 而 B 集合则表示边界像素的关

系, 即将目标边界上的像素依次存储在集合 B 中。当从集合 B 中读出元素时, 可以还原出目标区域的边界。DSS 方法的核心思想基于

$$F(X, Y) = (X - X_1)(Y_2 - Y_1) - (Y - Y_1)(X_2 - X_1) \quad (3)$$

为了方便可以简化式(3), 并给 $F(X, Y)$ 指定一个范围, 于是得到

$$0 \leq VX - UY + W \leq |U| + |V| - 1 \quad (4)$$

式中, $U = Y_2 - Y_1$, $V = X_2 - X_1$, $W = (Y_1 - Y_2)X_1 + Y_1(X_2 - X_1)$, 式(4)本质上是限制直线片段方向在初始方向上不发生太大的偏离。将 B 集合中第1个点作为 DSS 点, 在 B 集合中顺序寻找下一个 DSS 点。当 $F(X, Y) < -1$ 或 $F(X, Y) > |U| + |V|$ 时, 根据当前点调整 V 、 U 、 W 的值, 若仍无法使其满足式(4), 则该点被视为下一个 DSS 点, 从这个 DSS 点开始重复上面的过程, 并将每次得到的 DSS 点存储到数组 D 中, 直到又回到起始点。最后累加数组 D 中相邻 DSS 点之间的距离, 即可得到整个目标区域的边界周长。

1.3 MLP 方法

MLP(minimum length polygon)方法也是一种几何方法^[14]。MLP 算法的核心思想是找到最小的多边形使其包含数字化目标区域, 初始化条件和 DSS 方法基本一致, MLP 还需要对初始化数组进行以下的处理: 判断集合 B 中每个点的转向, 可以通过式(5)来进行判断。

$$T(P_1, P_2, P_3) = (X_2 - X_1)(Y_3 - Y_1) - (Y_2 - Y_1)(X_3 - X_1) \quad (5)$$

式中, P_1 、 P_2 、 P_3 是边界上连续的 3 个 0-cells 点, 也就是输入数组 P 中相邻的 3 个点。

当 $T(P_1, P_2, P_3) > 0$, P_2 为凸点 (正点);

当 $T(P_1, P_2, P_3) < 0$, P_2 为凹点 (负点)。

这样初始化集合 B 中的每个边界点又附加上一个正点还是负点的属性。MLP 方法利用式(5)在 B 集合中寻找 MLP 点, 当找到所有的 MLP 点后计算周长, 周长的计算方法和 DSS 算法保持一致。

1.4 HPGL 方法

HPGL 方法^[11]利用数字化图像中灰度级信息进行边界周长估计。与 DSS 方法、MLP 方法相比, 该方法提高了周长计算的精度和准确度。

HPGL 方法以半平面上直线片段的长度计算理论为基础, 根据覆盖数字化图像中分配给每个像素的量化灰度值, 进行局部周长估计, 其局部周长计

算为

$$l = \int_a^b \sqrt{1 + |f'(x)|^2} dx \quad (6)$$

式(6)可计算曲线在区间 $x \in [a, b]$ 上的曲线长度。

考虑到量化的误差, HPGL 方法为每一次局部计算分配一个最佳比例因子, 该因子使得周长估计误差最小化。最终, 累积局部周长估计, 得到整个目标图像边界周长估计结果。

2 HPGL 估计方法

2.1 基于列和之差的边界长度估计

2.1.1 非量化图像

任给一曲线, 假设其函数表达式为 $y = f(x)$, $x \in [a, b]$, 利用式(6)可计算该曲线在区间 $[a, b]$ 的长度。根据式(6), 对于直线 $y = kx + m$, $k \in [0, 1]$, 在区间 $x \in [0, N]$, $N > 0$ 上线段的长度为

$$l = N \sqrt{1 + k^2} \quad (7)$$

给定一个半平面 $H: y \leq kx + m$, $k \in [0, 1]$, $m \geq 0$, 利用式(7), 可以计算半平面 H 在 $[0, N]$ 上的边缘片段的长度。斜率 k 为

$$k = \frac{y(x + \Delta x) - y(x)}{\Delta x} = \frac{y(x + 1) - y(x)}{\Delta x} \quad (8)$$

对区间 $[0, N]$ 的每个单位区间, 记 $s_c = \int_{c-\frac{1}{2}}^{c+\frac{1}{2}} y(x) dx + \frac{1}{2}$, 令 $d_c = s_{c+1} - s_c$, 那么在一个单位区间 $[c - \frac{1}{2}, c + \frac{1}{2}]$ 上的直线片段的斜率 $k = d_c = s_{c+1} - s_c$, $c \in \mathbf{Z}^+$ 。如果 $c \in \{0, 1, \dots, N-1\}$, $N \in \mathbf{Z}^+$, 则可以计算出每一个单位宽度区间中的 s_c , 对应于数字化网格中的一个像素列。给出一个宽度为 N 的图像 $I (I = D(H))$, 则式(7)中的 l 可近似计算为

$$l(I) = \sum_{c=0}^{N-1} l_c, \quad l_c = \sqrt{1 + d_c^2} \quad (9)$$

式中, $d_c = s_{c+1} - s_c$, 在图像中表示相邻的两列像素和之差。

2.1.2 量化图像

如果图像 I 已经被量化(参见第1节中像素覆盖数值化定义2), 即 $I = D_n(H)$, 那么 s_c 的值就可以根据量化的像素覆盖值计算, 继而 d_c 、 l_c 、 $l(I)$ 可以根据量化的像素覆盖值计算, 这些值源于集合

$T_n = \{0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, \frac{n}{n}\}$ 。由于量化导致一定的误差, 所以需引进一个比例因子 γ_n 进行校正, 式(9)演变为

$$\hat{l}(I) = \sum_{c=0}^{N-1} \hat{l}_c, \quad \hat{l}_c = \gamma_n \sqrt{1 + \tilde{d}_c^2} \quad (10)$$

关于参数 γ_n 的计算, 以及使得周长估计误差最小时 γ_n 值的推导可参考文献[15], 本文实验中取 $\gamma_n = 0.9604$ 。

2.2 图像目标局部周长的计算

目标的局部边缘计算依赖于式(10), 本节将讨论如何在图像的一个小的邻域中计算出目标边界的 $\tilde{d}_c$ 、 $\hat{l}_c$ 。另外将考虑到直线小片段的斜率不在 $0 \sim 1$ 的情况, 并给出一个完整的算法。

2.2.1 3×2 局部模板配置

在一个 3×2 的局部矩形配置区域中, 如果图像中的目标边界经过该区域, 那么目标边界在该区域内的曲线片段可看做一条小直线片段, 这里先只考虑直线片段的斜率为 $\tilde{d}_c \in [0, 1]$ 的情况。很明显, $\tilde{d}_c$ 只取决于该区域中6个覆盖化像素的值, 记 3×2 的局部矩形配置区域为 $\Omega_{(c,r)}$, (c, r) 表示 3×2 局部配置区域的第2行第1列元素在图像中的位置。

如图1所示, 像素3在图像中的索引就是 (c, r) 。 $\tilde{d}_{(c,r)}$ 表示右列像素(2, 4, 6)的和与左列像素(1, 3, 5)的和之差, 对于半平面的边缘片段 u , 假定斜率为 $k \in [0, 1]$, 经过 $x = c + \frac{1}{2}$, 则 $u = k(c + \frac{1}{2}) + m$, 其推导可参考文献[15]。考虑到像素量化的情况, 当 $u \in [r - \frac{1}{2}, r + \frac{1}{2}]$, 可以得到

$$\tilde{d}_c = \tilde{d}_{(c,r)} \quad (11)$$

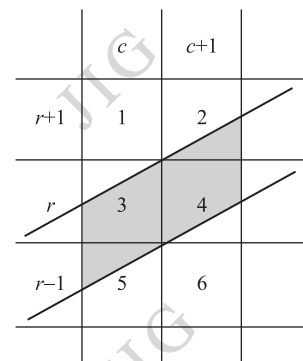


图1 局部 3×2 配置区域

Fig. 1 Local 3×2 configuration area

于是可以通过 $\Omega_{(c,r)}$ 区域中的列和之差来计算经过 $\Omega_{(c,r)}$ 区域的目标边界的斜率, 再根据式(10)计算出该区域中的目标边界片段的长度。

2.2.2 3×3 局部模板配置

如果直线片段斜率 $k > 1$, 那么上述 $\tilde{d}_{(c,r)}$ 的计算应该按照行和之差来计算, 而不是按列的情况, 相对应的应该使用 2×3 的配置区域来代替 3×2 的配置区域。为了简化方法的使用, 可以使用 3×3 的配置区域, 该配置既考虑到斜率 $|k| < 1$ 又考虑到 $|k| \leq 1$ 的情况。

记 3×3 的局部矩形配置区域为 $T_{(c,r)}$, (c,r) 表示 3×3 局部配置区域的中心元素在图像中位置 (图2中标号为5的元素), 值 p_i 表示区域中元素的值, $i=1, 2, \dots, 9$, 如图2所示, 很明显, 图2包含两个 3×2 子配置区域, 即 $\Omega_{(c-1,r)}$ 和 $\Omega_{(c,r)}$ 。

1	2	3
4	5	6
7	8	9

图2 局部 3×3 配置区域

Fig. 2 Local 3×3 configuration area

假设被考虑直线片段斜率 $k \in [0, 1]$, 根据式(10)和式(11)可以得出一个 3×3 配置区域中局部边界的长度为

$$\hat{l}_{(c,r)}^T = \hat{l}_l + \hat{l}_r \quad (12)$$

式中

$$\hat{l}_l = \begin{cases} \frac{\gamma_n}{2} \sqrt{1 + \tilde{d}_{(c-1,r)}^2}, & \tilde{u}_{c-1} \in \left[r - \frac{1}{2}, r + \frac{1}{2}\right] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$\hat{l}_r = \begin{cases} \frac{\gamma_n}{2} \sqrt{1 + \tilde{d}_{(c,r)}^2}, & \tilde{u}_c \in \left[r - \frac{1}{2}, r + \frac{1}{2}\right] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

对于整幅图像, 有

$$\hat{l}^T(I) = \sum_{T_{(c,r)} \subset I} \hat{l}_{(c,r)}^T \quad (13)$$

2.2.3 平面旋转和对称的应用

上文只考虑到半平面 $H: y \leq kx + m, k \in [0, 1]$ 的情况, 这里将考虑 $k \in (-\infty, +\infty), y \geq kx + m$ 更一般的情况。在2.2.1和2.2.2节中, 已经给出了在 $y \leq kx + m, k \in [0, 1]$ 情况下 $T_{(c,r)}$ 配置区域中直线片段斜率 k 的计算方法。如果将直线片段斜率

$k \in (-\infty, +\infty), y \geq kx + m$ 的 $T'_{(c,r)}$ 区域中边界周长的计算都归结到一个半平面 $H': y' \leq k'x + m', k' \in [0, 1]$ 的情况, 那么式(13)的应用就可以推广到一般情况。平面旋转和对称可以很好地做到这一点, 如图2所示, 下面分3种情况来讨论:

1) 当 $y \geq kx + m$ 时, 应用关于 $y = r$ 对称的性质, 交换 3×3 配置中1与7、2与8、3与9的值;

2) 当 $k < 0$ 时, 应用关于 $x = r$ 对称的性质, 交换 3×3 配置中1与3、4与6、7与9的值;

3) 当 $|k| > 1$ 时, 应用关于 $x + y = c + r$ 对称的性质, 交换 3×3 配置中2与4、3与7、6与8的值。关于一个 $T_{(c,r)}$ 配置区域边界周长的具体计算法则可参考文献[11]中的法则1, 当 3×3 配置遍历整个像素覆盖化图像 I 后, 累加每个 $T_{(c,r)}$ 配置区域边界周长计算结果, 就得到了整个目标的一个周长估计。

3 基于边界跟踪的 HPGL 估计方法

第2节详细阐述了 HPGL 方法的思想, 利用覆盖数字化的方式保留边界上的灰度级信息, 从而得到目标边界周长的精确估计。然而, 如果保留边界上的灰度信息, 则不能像二值图像那样获得厚度为一个像素的目标边界, 因为前期的覆盖数字化带有一定的模糊性, 必然导致边界厚度的增加, 如图3所示。

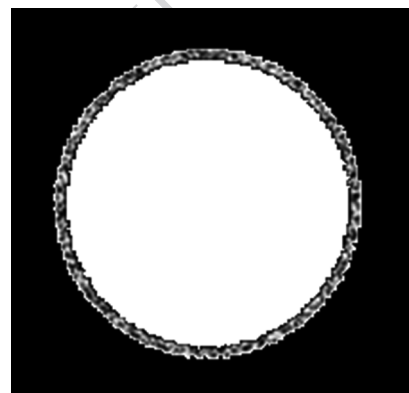


图3 具有一定边界厚度的目标图像

Fig. 3 Target image with certain boundary thickness

很明显, 对于图3进行像素覆盖数字化, 保留边界上的灰度信息, 其边界厚度必然会超过一个像素。可以看出, 保留边界灰度级信息和边界厚度是存在联系的。也就是说, 如果保留更多的边界信息来达到周长的精确估计, 边界的厚度就会随之增加, 此时

HPGL 方法不仅不能保证精确性,甚至会发生错误。其主要原因如下:假设有一目标区域边界厚度为3,如图4所示。根据 HPGL 方法的思想,线段1、2、3的长度都会被计算,并作为目标周长的一部分。对于整个边界厚度都为3的目标,最后的周长估计大约会是实际目标边界周长的3倍。

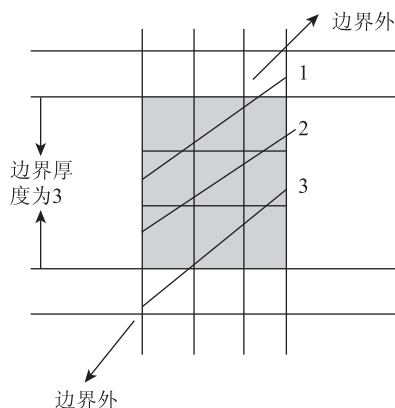


图4 边界厚度为3的局部边界区域

Fig. 4 Local border area with thickness of three pixel width

针对保留边界信息和边界厚度增加这对不可调和的矛盾,提出一种基于边界跟踪的 HPGL 估计方法(BTHPGL)。具体思想如下:通过边界跟踪,得到覆盖分割的边界的内部边界和外部边界,对内部边界和外部边界分别使用 HPGL 算法进行周长计算,得到的结果取二者平均值,或根据目标是否是特定的形状采取相应的几何算法。为了实验方便,本文取平均值。针对连续边界和不连续边界,提出两种边界跟踪算法。

3.1 基于不连续边界跟踪的 HPGL 算法

1) 算法的输入仍是第2节中的 $I = D_n(H)$, 如图5所示,黑色区域表示背景(0),灰色区域表示边界,取值范围(0,1),白色区域表示目标(1)。

2) 以 3×3 的模板配置,如图6所示,遍历整幅覆盖分割后的图像 $I = D_n(H)$ 。

满足以下两个条件的像素集合将其定义为内边界,记作 In :

(1) 中心元素是 $0 \sim 1$ 的值;

(2) 4 邻接的元素 1、2、3、4 中至少有一个是 1 (目标)。

满足以下两个条件的像素集合将其定义为外边界,记作 Out :

(1) 中心元素是 $0 \sim 1$ 的值;

(2) 4 邻接的元素 1、2、3、4 中至少有一个是 0

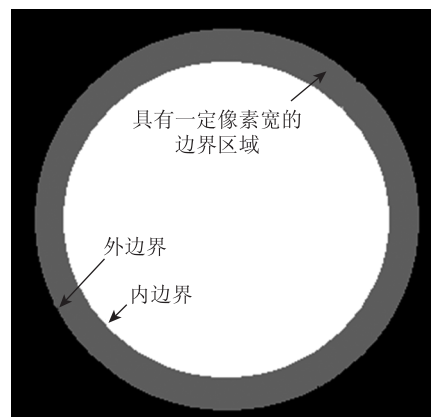


图5 边界模糊的目标图像

Fig. 5 The target image with blurred boundary

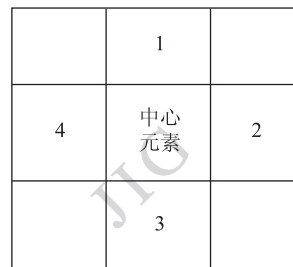


图6 4方向的 3×3 配置区域

Fig. 6 3×3 configuration area with four directions

(背景)。

若灰色区域被认定为目标,则得到外边界为 1 像素宽的图像 I_{out} ;若灰色区域被认定为背景,则得到内边界为 1 像素宽的图像 I_{in} 。

3) 边界区域的划分。若中心元素是 $0 \sim 1$ 的值,4 邻接的元素 1、2、3、4 也都是 $0 \sim 1$ 的值,那么:

(1) 若要得到图像 I_{in} ,则遍历 I ,将中心元素规定为背景;

(2) 若要得到图像 I_{out} ,则遍历 I ,将中心元素规定为目标。

4) 运用 HPGL 算法分别计算图像 I_{in} 、 I_{out} 的目标边界周长,对得到内外边界周长取平均值,或根据目标是否是特定的形状采取相应的几何方法。

3.2 基于连续边界跟踪的 HPGL 算法

本算法的输入仍是第2节中的 $I = D_n(H)$, 利用本算法可以得到连续边界区域精确的内外边界。与 3.1 节的目的的一致,也是找到图像 I_{out} 和 I_{in} 。

由于内外边界求法基本一致,不失一般性,以外边界为例描述基于连续边界跟踪的 HPGL 算法:

1) 考虑到目标边界正好在图像的边缘上, 在输入的2维图像 I 四周加上0像素, 再根据 I 的数组索引得到0-cells点坐标的数组 I_0 , 再为这些点都加上一个标志 $f=0$ 。这样, I_0 就变成了一个结构体2维数组。然后, 根据 I 中的像素值, 找到最上边最左边的第一个不为0的像素, 映射到 I_0 中对应的0-cells点, 取像素上端的两个0-cells顶点 p_1 、 p_2 作为开始点, 并将 p_1 、 p_2 的 f 值设为1, 表示它们已经被纳入边界。

2) 将 p_2 设为中心点, 考虑 p_2 在 I_0 平面网格图中4方向上的点 p_{next} , 满足以下两个条件:

(1) p_{next} 的 f 为0;

(2) p_{next} 与 p_{next} 的中心点 (即前一个确定为边界的点, 算法初始时为 p_2), 所确定的 I 中的两个像素一个是背景像素, 一个是边界像素 (求内边界时, 一个是目标像素一个是边界像素)。

将 p_{next} 的 f 标记为1, 作为 I_0 的下一个边界点 p_3 。对于连续边界的图像 I , 有且只有一个 p_{next} 点成为下一个边界点。

3) 将 p_3 作为中心点, 重复第2)步, 直到当前的中心点的4方向上出现点 p_1 , 表示该中心点是目标的最后一个边界点。

4) 将上面找到的外边界点坐标映射为图像 I 中像素的2维数组索引下标, 得到 I_{out} , 它是只保留了边界区域最外层一像素宽边界的图像, 其他的边界区域归结为目标像素, 背景区域不变。同理得到 I_{in} , 运用 HPGL 算法分别计算得到目标区域内外边界的长度, 对于得到的结果取平均值, 或根据目标是否是特定的形状采取相应的几何方法。

以图7为例, 灰色区域就是边界区域, 黑色为背景, 白色为目标, 1, 2 就是找到的起点, 将 1, 2 的 f 设为1, 表示它们已经被算入边界, 接下来考虑 2 的4个方向上的点的值: 向左的1不会再被考虑 ($f=1$); 向上的方向的点 2_{up} , 它与2所确定的两个像素值都为背景即为0, 不被考虑; 向下方向的点 2_{down} , 它与2所确定的两个像素值都为边界像素, 也不被考虑; 向右的方向的点3, 它与2所确定的两个像素值一个为边界像素, 一个为背景像素, 所以被确定为下一个外边界点。接着考察3, 方法与2一致, 依次下去, 由于边界连续, 最终检测到最后一个外边界点的4个方向中有一个是1, 算法结束, 得到整个目标对象的边界点, 并被依次存储。

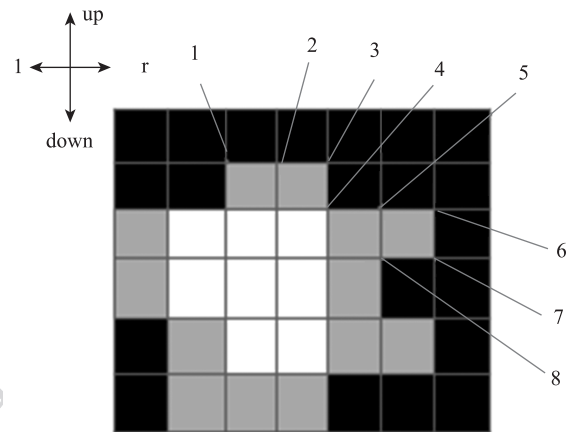


图7 简单的覆盖数字化图像

Fig. 7 Simple pixel coverage of a digital image

4 实验及结果分析

为验证本文所提出的 BTHPGL 方法的准确性和对模糊目标边界的适应性, 本节将该方法用于计算不同合成图像的周长, 并将所计算的结果与标准周长、HPGL、DSS、MLP 算法进行比较。首先在实验中合成简单的目标图像, 这样可以通过式(6), 得到目标区域的标准周长。实验中还进行了以下的操作: 对该目标图像的边界进行人工的加厚模糊化, 来验证 BTHPGL 方法对模糊边界仍具有很好的适应性; 对目标图像的边界加入噪声, 使其边界不连续, 来验证 BTHPGL 方法对于边界不连续的目标边界周长估计仍具有很高的精度。另外, 本实验周长的计算结果都是以像素宽为单位的。

4.1 连续边界目标图像的合成和实验

4.1.1 抛物线边界的目标图像的合成和实验

在平面坐标系中, 选取直线 $x=100$ 、抛物线 $y = \frac{9}{4096}(x-100)^2 + 100$ 与 $y = -\frac{1}{256}(x-100)^2 + 500$ 围成的边界, 映射到2维图像矩阵中, 目标区域 (即边界围成的区域) 取值255, 背景区域取值0。当把边界归为目标区域或背景区域的时候, 规定目标边界的像素宽为0; 然后以0像素宽的边界为基准向内向外扩展边界, 并把边界上的像素值随机设为120~130的值, 得到像素边界厚度不断增加的模糊边界抛物线形目标图像。图8列出了目标边界厚度 $d=1$ 、 $d=7$ 的对比度相对较高的两幅图像。

实验中使用 $d=0$ 、 $d=1$ 、 $d=3$ 、 $d=5$ 、 $d=7$ 的5幅图像, 分别使用 DSS、MLP、HPGL 和 BTHPGL 方法

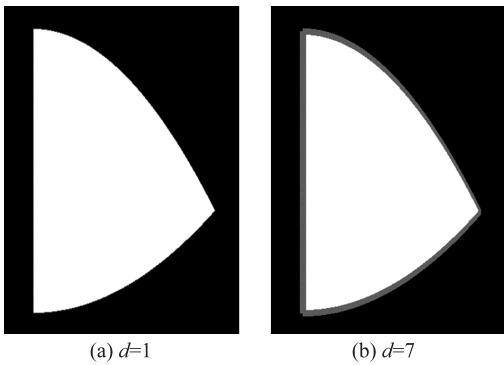


图 8 部分合成的抛物线目标图像
Fig. 8 Some of the synthetic parabolic objects

进行实验,标准周长是通过曲线积分计算出来的理论值,实验结果如表 1 所示。

表 1 抛物线目标图像的边界周长
Table 1 Perimeters of the boundaries of the parabolic objects

d					
	DSS	MLP	HPGL	BTHPGL	标准
0	1 055	1 086	1 074	1 074	1 081
1	1 053	1 083	1 074	1 076	1 081
3	1 052	1 082	1 809	1 103	1 081
5	1 052	1 081	3 512	1 093	1 081
7	1 057	1 080	5 264	1 089	1 081

表 1 中实验结果相对于标准周长的绝对误差如图 9 所示, HPGL 方法误差过大,在图 9 中没有列出。

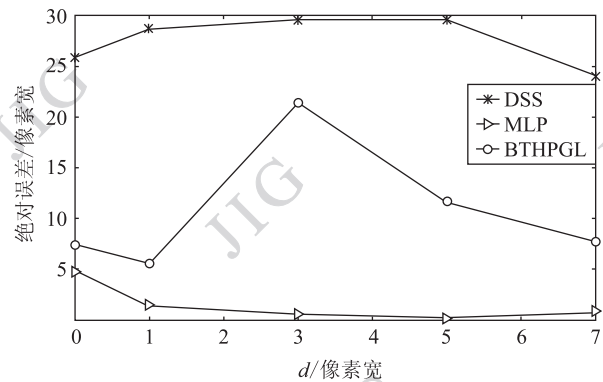


图 9 抛物线边界实验结果相对于标准周长的绝对误差图
Fig. 9 The absolute perimeter errors of the parabolic object boundary estimated by different methods, with respect to the accurate perimeters

4. 1. 2 混合边界线的目标图像的合成和实验

在平面坐标系中,选取直线 $y = 820 - 2x$ 与 $y = \frac{10}{7}x + 160$ 、曲线 $(x - 300)^2 + (y - 300)^2 = 200^2$ 、三角函数 $y = 5\cos\frac{\pi x}{50} + \sin^2\frac{\pi x}{50} + 150$ 与 $y = 10\cos\frac{\pi x}{50} + 10\sin\frac{\pi x}{50} + 450$ 围成的边界,映射到 2 维图像矩阵中,其他操作与 4. 1. 1 节一致,合成模糊边界的混合边界线目标图像。图 10 列出了目标边界厚度 $d = 1, d = 7$ 的对比度相对较高的两幅图像。

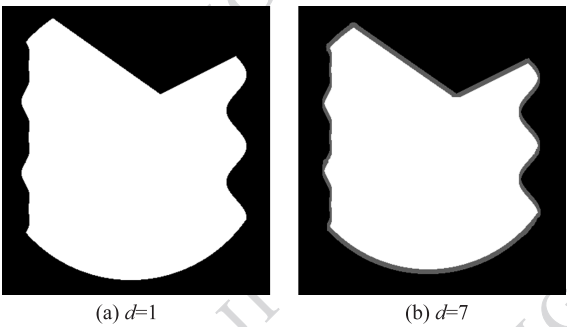


图 10 部分合成的混合边界线目标图像
Fig. 10 Some of the synthetic objects with mixed border

实验过程与 4. 1. 1 节一致,实验结果如表 2 所示。

表 2 混合边界线目标图像的边界周长
Table 2 Perimeters of the boundaries of the objects with mixed border

d					
	DSS	MLP	HPGL	BTHPGL	标准
0	1 263	1 266	1 277	1 277	1 269
1	1 259	1 263	1 269	1 273	1 269
3	1 258	1 263	1 486	1 274	1 269
5	1 259	1 264	2 890	1 277	1 269
7	1 253	1 261	4 312	1 272	1 269

表 2 中实验结果相对于标准周长的绝对误差如图 11 所示, HPGL 方法误差过大,在图 11 中没有列出。

4. 1. 3 连续边界目标图像的实验结果分析

由表 1 和表 2 中的数据,以及其对应的绝对误差折线图图 9 和图 11 可以看出,DSS、MLP 和本文 BTHPGL 算法的结果与标准周长很接近,只有 HPGL 方法在边界宽度大于 1 时的周长估计出现明显的偏

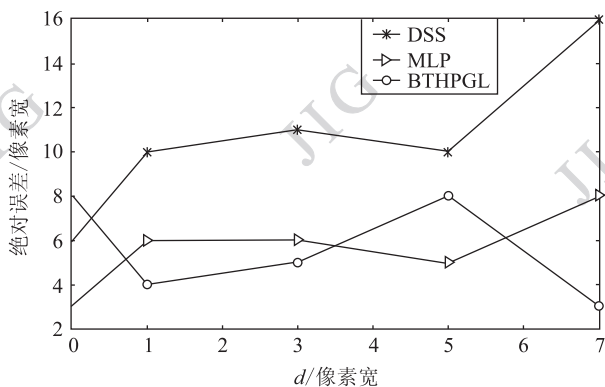


图11 混合边界实验结果相对于标准周长的绝对误差图

Fig. 11 The absolute perimeter errors of the boundary of object with mixed border estimated by different methods, with respect to the accurate perimeters

差,这也验证了本文在第3节开头处的理论证明,即HPGL方法对于模糊边界的不适应性。

再来观察DSS、MLP、BTHPGL方法的实验数据,显然,MLP和BTHPGL方法实验结果更接近于标准的周长计算,从表1和图9可以看出,MLP方法的数据更好,这是由于为了计算标准周长,合成图像比较简单,此时几何方法显得更加精确。当图像的边界毫无规律十分复杂的时候,几何的方法(MLP)便会出现计算复杂度增加和计算精度下降的情况,而BTHPGL方法此时便能体现出极大的优势,因为BTHPGL是基于局部 3×3 配置区域的边界周长的计算,它与目标边界整体的复杂度没有直接的关系。表2和图11实验结果很好地证明了这一点,在目标边界稍显复杂的情况下,BTHPGL方法的计算结果就基本好于MLP算法。

此外,几何的方法(MLP)具有一个致命的缺陷,它要求目标的边界连续,这在实际中是很难做到的,往往一个小的噪声便可以造成图像边界不连续,此时几何的方法便无法应用,但是本文方法仍然适用,这一点将在下节中用实验来说明。

4.2 不连续边界目标图像的合成和实验

在平面坐标系中,选取参数方程为 $x = 200\cos^3 t$, $y = 200\sin^3 t$ 的曲线围成的边界,其合成方法均与4.1节中对应的内容一致,只是边界的值随机设为100~150的值。对于得到的目标图像,再人为的加入噪声,使得目标对象的边界不连续,如图12所示,可以看到,图12(a)的目标对象边界连续,图12(b)的目标对象出现了两个裂缝,即边界不再连续。

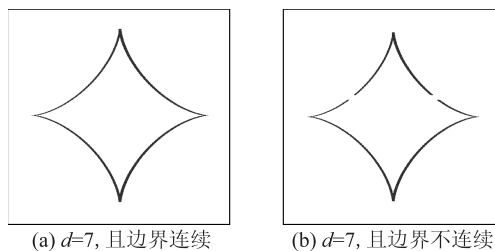


图12 部分合成的星形线目标图像

Fig. 12 Some of the synthetic stellated objects

对于图12(b)的图,DSS、MLP这两种几何方法便无法应用,所以本小节实验使用边界宽度 $d=3$ 、 $d=5$ 、 $d=7$ 这3组图进行实验,每组图分为边界连续和不连续两种情况,分别应用本文的BTHPGL方法。实验结果如表3所示。

表3 星形线目标图像的边界周长

Table 3 Perimeters of the boundaries of the stellated objects

d	BTHPGL		标准 /像素宽
	连续	不连续	
3	1 113.4	1 093.0	1 200
5	1 273.2	1 254.9	1 200
7	1 260.8	1 242.8	1 200

由表3可以看出,当边界受到噪声影响出现不连续的情况时,本文方法的实验结果并没有受到影响。由此可知,本文方法在实际中可以得到很广泛的应用。

5 结论

本文基于HPGL方法,提出了一种基于边界跟踪得到目标内外边界,再进行整体目标边界周长估计的方法即BTHPGL方法。该方法继承了HPGL优良的属性,不但保留边界上的灰度级信息来得到边界周长的精确估计,同时还通过目标边界跟踪解决了HPGL方法所固有的缺陷。总的来说,BTHPGL方法克服了图像边界模糊、边界不连续以及边界受噪声影响等各种复杂情况,能够在实际的图像特征提取中得到广泛的应用。

在一幅图像中有多个目标时,通过本文方法并不能提取到每个目标的周长,只能得到目标边界周

长之和。另外,图像中灰度级信息的利用不应该仅仅局限于周长的计算,在提取图像特征的其他领域也应该得到广泛的应用。因而在今后的研究中,会对这方面进行深入的探讨,以解决这一问题。

参考文献 (References)

- [1] Kimura K, Kikuchi S, Yamasaki S. Accurate root length measurement by image analysis [J]. *Plant and Soil*, 1999, 216(1-2): 117-127.
- [2] Cao L P. Machine recognition of citrus variety based on the fractal dimensions of perimeter-area [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2010, 26(2): 351-355. [曹乐平. 基于周长面积分形维数的柑橘品种机器识别 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 351-355.]
- [3] Coeurjolly D, Klette R. A comparative evaluation of length estimators of digital curves [J]. *IEEE Transactions on, Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(2): 252-258.
- [4] Dorst L, Smeulders A W M. Length estimators for digitized contours [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1987, 40(3): 311-333.
- [5] Wang K P, You Z S, Gao Y. Accurate perimeter estimation of digitized planar object [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1997, 2(2-3): 165-170. [王开平, 游志胜, 高阳. 二维数字化目标周长的精确估计 [J]. *中国图象图形学报*, 1997, 2(2-3): 165-170.] [DOI:10.11834/jig.19970319]
- [6] Wu X P, Kong M, Zhang D L. A new method for calculating area and perimeter of closed region [J]. *Data Acquisition and Processing*, 1999, 14(2): 244-246. [吴小培, 孔敏, 张德龙. 一种计算封闭区域周长和面积的新方法 [J]. *数据采集与处理*, 1999, 14(2): 244-246.]
- [7] Allili M, Ziou D. Topological feature extraction in binary images [C]// *Symposium on Signal Processing and its Applications, Sixth International*. Kuala Lumpur: IEEE, 2001, 2: 651-654.
- [8] Kulpa Z. Area and perimeter measurement of blobs in discrete binary pictures [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1977, 6(5): 434-451.
- [9] Kiryati N, Bruckstein A. Gray levels can improve the performance of binary image digitizers [J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1991, 53(1): 31-39.
- [10] Eberly D, Lancaster J, Alyassin A. On gray scale image measurements: II. Surface area and volume [J]. *CVGIP: Graphical models and image processing*, 1991, 53(6): 550-562.
- [11] Sladoje N, Lindblad J. High-precision boundary length estimation by utilizing gray-level information [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(2): 357-363.
- [12] Sladoje N, Lindblad J. Pixel coverage segmentation for improved feature estimation [M]// *Image Analysis and Processing-ICIAP 2009*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 929-938.
- [13] Lindblad J, Sladoje N. Coverage segmentation based on linear unmixing and minimization of perimeter and boundary thickness [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(6): 728-738.
- [14] Klette R, Kovalevsky V V, Yip B. Length estimation of digital curves [C]// *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*. Denver, Co: International Society for Optics and Photonics, 1999: 117-128.
- [15] Sladoje N, Lindblad J. Perimeter estimation based on grey level object representation [R]. Uppsala, Sweden: Centre for Image Analysis, 2008.