

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **5**
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5月 第17卷 第5期(总第193期)

目次

综述

- 中国图像工程:2011 章毓晋(603)
- 植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展 田原,赵春江,陆声链,郭新宇(613)

图像处理和编码

- 高位有效位概率算术解码的图像密写改进算法 马丽红,吕先明,高小满(621)
- 滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法 熊波,尹周平(628)
- 提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中的应用 范有臣,李迎春,韩意,张来线(635)

图像分析和识别

- 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法 张桂梅,周明明,马珂(641)
- 均衡化特征匹配的非刚体细胞形态跟踪 陈莹,艾春璐(648)
- 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测 王志衡,刘红敏(656)
- 改进极化白化滤波的边缘检测 邓少平,张继贤,李平湘,黄国满(665)
- 联合特征在行人检测中的应用 杨阳,杨静宇(671)
- Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取 范春年,张福炎(676)

图像理解和计算机视觉

- 保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 蒋建国,郝世杰,郭艳蓉,詹曙,李鸿(682)
- 局部颜色映射的彩色夜视算法 钱小燕,张天慈,王帮峰,黄圣国(689)
- 结合分支定界法和线性规划的摄像机位姿估计 马文娟(694)

金字塔评分改进主方向模板匹配的实时目标检索 洪朝群,朱建科,李娜,卜佳俊,陈纯(700)

计算机图形学

类曲率在曲线相似性判定中的应用 于昊,赵乃良,陈小雕(707)

虚拟现实与增强现实

人机系统中视域评估的可视化 李倩,吉晓民,林文周(715)

遥感图像处理

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪 王相海,李放,王爽(721)

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价 孟天佑,汪云甲(729)

地理信息技术

点要素扇形缓冲区的设计与应用 侯景伟,孔云峰,张迪,吕可文(740)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第5期

2012年5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 ZITXFZ 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. 5 May 2012

Contents

Review

- Image engineering in China: 2011 Zhang Yujin (603)
- Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves
..... Tian Yuan, Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu (613)

Image Processing and Coding

- Most significant bits probability arithmetic decoding for improved image steganography
..... Ma Lihong, Lv Xianming, Gao Xiaoman (621)
- Fast non-local means for image de-noising on moving average and modified weight function Xiong Bo, Yin Zhouping (628)
- Weakening of smoke for homomorphic filtering Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, Zhang Laixian (635)

Image Analysis and Recognition

- Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke (641)
- Non-rigid cell contour tracking method for balanced feature matching Chen Ying, Ai Chunlu (648)
- Automatically detecting position and size of blob features in images Wang Zhiheng, Liu Hongmin (656)
- Improved polarimetric whitening filter for edge detection Deng Shaoping, Zhang Jixian, Li Pingxiang, Huang Guoman (665)
- Pedestrian detection based on compound feature Yang Yang, Yang Jingyu (671)
- Illumination invariant extraction on Gabor phase Fan Chunnian, Zhang Fuyan (676)

Image Understanding and Computer Vision

- Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model
..... Jiang Jianguo, Hao Shijie, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong (682)
- Color night vision algorithm based on local color mapping ... Qian Xiaoyan, Zhang Tianci, Wang Bangfeng, Huang Shengguo (689)
- Camera pose estimation using branch and bound method with linear programming Ma Wenjuan (694)
- Real-time object retrieval with dominant orientation template matching improved by pyramid scoring
..... Hong Chaoqun, Zhu Jianke, Li Na, Bu Jiajun, Chen Chun (700)

Computer Graphics

- Quasi-curvature and its application in similarity measurement of curves
..... Yu Hao, Zhao Nailiang, Chen Xiaodiao (707)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Visualization of the visual range assessment in man-machine system Li Qian, Ji Xiaomin, Lin Wenzhou (715)

Remote Sensing Image Processing

- Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband
..... Wang Xianghai, Li Fang, Wang Shuang (721)
- Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality Meng Tianyou, Wang Yunjia (729)

Geoinformatics

- Design and applications of sector buffers for point feature
..... Hou Jingwei, Kong Yunfeng, Zhang Di, Lv Kewen (740)

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)05-0682-07

论文引用格式: 蒋建国, 郝世杰, 郭艳蓉, 詹曙, 李鸿. 保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 682-688

保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型

蒋建国^{1,2}, 郝世杰¹, 郭艳蓉¹, 詹曙^{1,2}, 李鸿³

1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 合肥 230009;
3. 安徽医科大学第一附属医院, 合肥 230009

摘要: 物体形状特征的准确提取往往受到图像获取、目标分割等过程中各种因素的影响, 因而需要构造一种鲁棒的形状表现来保有其本质特征。揭示弹性二次曲线(EQW)模型中能量权重因子和样条重叠度因子与形状几何特性间的关系, 提出一种自适应保持几何特征的EQW形状表现模型, 并将该模型与交互式Live Wire算法相结合, 应用于图像分割中, 对于各种模态图像中的目标进行分割实验。直观上, 本文方法能够在去除噪声同时较好地保持目标形状的显著特征; 量化结果方面, 交互式分割误差保持在较小稳定范围内, 引入EQW模型带来的时间开销亦在可接受范围内。

关键词: 形状表现; 图像分割; 弹性二次曲线; 几何特征保持; 离散曲线演化

Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model

Jiang Jianguo^{1,2}, Hao Shijie¹, Guo Yanrong¹, Zhan Shu^{1,2}, Li Hong³

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China;
3. The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230009, China

Abstract: Shape feature extraction from an image usually suffers from effects like imaging noise and segmentation errors. A robust shape description algorithm is therefore a prerequisite. In this paper, relations between performances on elastic quadratic wire (EQW) based shape representation model and the model parameters are revealed first. By taking advantage of these relations, we focus on building a new EQW model that adaptively preserves geometrical features. Then the proposed EQW model is further embedded into the Live Wire algorithm. In experiments, the improved Live Wire algorithm is tested on medical and remote sensing image segmentation. Qualitatively, the results show that the proposed model has better performances on extracting object boundaries while avoiding meaningless morphology caused by noisy or incomplete data. Quantitatively, the segmentation errors and the temporal cost of the improved Live Wire are both acceptable.

Key words: shape representation, image segmentation; elastic quadratic wire; geometric feature preserving; discrete curve evolution

0 引言

在认知和理解客观世界物体行为、生长、变异等

特性中, 形状起到不可或缺的作用, 它是机器视觉、模式识别、图像分析和计算机图形学等众多领域中的重要研究对象和内容。

基于边缘的形状描述是一类重要的形状表现方

收稿日期: 2011-06-13; 修回日期: 2011-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61004103); 安徽省自然科学基金项目(11040606Q44); 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2010A193)

第一作者简介: 蒋建国(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字图像分析与处理、数字信号处理、分布式智能系统。

E-mail: jgjiang@hfut.edu.cn

式^[1],广泛用于描述带有显著角点特征的目标。在以边缘描述为基础的各种形状建模、分析算法中,Bookstein^[2]和Kendall^[3]对形状进行采样,视形状为有序地标点(landmark point)集合,Cootes等人^[4-5]在此基础上提出统计形状模型(SSMs)。Paramanand等人^[6]提出用直线和椭圆曲线分段拟合形状,用于图像中目标的边界轮廓提取。上述研究本质上是用多边形或显式曲线模型来近似表现目标形状,易丢失研究对象潜在的细节信息。王彩玲等人^[7]提出一种加权平均的Hough谱表示形状,将欧氏空间中的形状转换至Hough变换空间中,进行形状间的匹配。Younes等人^[8]、Klassen等人^[9]转而将形状视为非欧的无穷维流形上一点,通过求取点间的测地线来分析形状变化,其中暗含了待处理的目标形状需光滑连续的前提。从各种设备获取的边缘轮廓之中不可避免地混入了噪声与目标提取误差,这可能会对上述算法的有效性和结果产生不同程度的影响。因此需要一种既能有效去除噪声等干扰,又能尽量保有自身几何特征的形状表现形式。

弹性二次曲线(EQW)^[10]是一种基于重叠二次样条的形状表现算法,本质上是通过最小化衡量形状一阶微分不连续程度的能量函数,获得形状的稳定表现。EQW因其二次型构造,具有较高的计算效率,并能把真实形状从噪声等干扰中较为保真地恢复出来。但文献^[10]仅为模型赋予了统一的表现参数,且未分析这些参数的性质,使得EQW模型本质上仍属于“几何各处同性”的表现形式,在去除噪声等干扰的同时也可能使得形状上的“高频”显著几何信息损失很多。

Ikeuchi等人^[11]提出自适应隐式多项式拟合2维和3维曲线曲面的方法;Yang等人^[12]建立由形状规则化和形状相似度构成的Total Variation能量泛函(TV模型),通过水平集演化对形状去噪;Droske等人^[13]基于四阶偏微分方程特性,提出一种能演化目标至尖锐角点的主动轮廓模型。上述工作的共同特点是所构造的模型均能自适应地接近目标形状的真实几何表现,这给予本文工作一定的启发。

本文对EQW能量函数进行分析,获得了EQW模型对形状几何形态的改变与表现参数变化之间的关系,提出一种能够自适应保持几何特征的弹性二次曲线的形状表现模型,并与Live Wire算法结合,应用于图像分割之中。定性与定量实验结果表明,本文所提的方法能够更准确、稳定地分割出不同成像模式下的各种形状目标。

1 EQW性能分析与自适应模型构造

1.1 基于EQW的形状表现

对于离散化形状轮廓上每一个点,其EQW表示为

$$\mathbf{p}_i(t_i) = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_i^2 \\ t_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 是形状轮廓上第 i 点的初始位置, (A_i, B_i, C_i, D_i) 是二次曲线参数, t_i 的取值范围设为 $-\tau \leq t_i \leq \tau$, 其中 τ 在本文中定义为样条重叠程度因子。对于形状轮廓上每一点,都可以用向量 $\mathbf{f}_i^x = [\bar{x}_i \ A_i \ B_i]^T$ 和 $\mathbf{f}_i^y = [\bar{y}_i \ C_i \ D_i]^T$ 表示; 对于一个 N 点表示的形状, 可以表示为 $\mathbf{S} = (\mathbf{S}^x \ | \ \mathbf{S}^y)$, 其中 $\mathbf{S}^x = (\mathbf{f}_1^x \ | \ \mathbf{f}_2^x \ | \ \dots \ | \ \mathbf{f}_N^x)$, $\mathbf{S}^y = (\mathbf{f}_1^y \ | \ \mathbf{f}_2^y \ | \ \dots \ | \ \mathbf{f}_N^y)$; 根据以上定义, 易得形状上每一点的切向量

$$\mathbf{v}_i(t_i) = \frac{d\mathbf{p}_i(t_i)}{dt} = \begin{pmatrix} 2A_i t_i + B_i \\ 2C_i t_i + D_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

1.2 基于形状 C^1 不连续程度的能量函数构造

根据上述形状表现形式,以局部 C^1 不连续程度为衡量准则,构造出每一轮廓点的能量函数,进而得到整个形状的能量函数

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = \sum_{i=1}^N (E_i^0 + \lambda E_i^1) \quad (3)$$

式中, E 是整个形状的能量, E_i 是第 i 点能量, E_i^0 和 E_i^1 分别反映第 i 点 C^0 不连续程度和 C^1 不连续程度, λ 是两能量项之间的权重因子, N 为形状轮廓点数。 E_i^0 和 E_i^1 具体构造如下:

$$E_i^0 = E_{i,i+1}^0(0, -\tau) + E_{i,i+1}^0(\tau, 0) + E_{i-1,i}^0(0, -\tau) + E_{i-1,i}^0(\tau, 0) \quad (4)$$

$$E_i^1 = E_{i,i+1}^1(0, -\tau) + E_{i,i+1}^1(\tau, 0) + E_{i-1,i}^1(0, -\tau) + E_{i-1,i}^1(\tau, 0) \quad (5)$$

$$E_{i,j}^0(s, t) = \|\mathbf{p}_i(s) - \mathbf{p}_j(t)\|^2 \quad (6)$$

$$E_{i,j}^1(s, t) = \|\mathbf{v}_i(s) - \mathbf{v}_j(t)\|^2 \quad (7)$$

式(4)(5)中等式右边各项为当前点与其两邻域点所控制二次曲线间的4个0阶(1阶)不连续程度子项,每一子项可由式(6)(7)计算,其中 $|i-j|=1$ 。

将式(1)(2)代入式(4)——(7)中,经推导可得关于 \mathbf{f}_i^x 和 \mathbf{f}_i^y 的二次型形式

$$E_i = \mathbf{f}_i^{xT} \mathbf{G}_1 \mathbf{f}_i^x + 2\mathbf{f}_i^{xT} \mathbf{G}_2 \mathbf{f}_{i+1}^x + 2\mathbf{f}_i^{yT} \mathbf{G}_2 \mathbf{f}_{i-1}^y +$$

$$f_{i+1}^{xT} H_1 f_{i+1}^x + f_{i+1}^{yT} H_2 f_{i+1}^y \quad (8)$$

式中,当 τ 和 λ 大于零时, G_1 是正定矩阵,矩阵 G_1 、 G_2 、 H_1 、 H_2 元素完全由 τ 和 λ 确定。 E_i^x 其具体推导过程由于篇幅不再给出,可参考文献[10]。 E_i^y 推导与 E_i^x 完全类似,表达式只需将式(8)中的 x 换为 y 即可。 E_i 也可以表示为

$$E_i = E_i^x + E_i^y \quad (9)$$

通过式(3)(9),可以量化计算出局部单点和整体形状的 C^1 连续性。 $E_i^0 + \lambda E_i^1$ 和 $E_i^x + E_i^y$ 是等价的,后者实际上是前者的计算形式; E_i^x 和 E_i^y 在形式上完全对称,因而在后续对 E_i^x 的推导同样适用于 E_i^y 。

1.3 EQW 空间域性能分析

EQW 的能量函数 E 的物理意义是形状轮廓点间 C^1 不连续程度的能量总和,因此当 E 最小或者收敛在某一数值附近时,就可认为是该形状处于稳定的EQW表示。本节将给出参数 τ 和 λ 的几何意义,并通过能量变化分析它们对EQW稳定表示下形状几何特征的影响。

容易看出,由于 E_i^x 是关于 f_i^x 的二次型,且 G_1

是正定矩阵^[10],因而由式(10)计算出新的 f_i^x 时, E_i^x 有最陡的能量下降,如式(11),每一点的能量下降如式(12),即

$$\hat{f}_i^x = -G_1^{-1}(G_2^T f_{i-1}^x + G_2 f_{i+1}^x) \quad (10)$$

$$\Delta E_i^x = (f_{i-1}^x - \hat{f}_i^x)^T G_1 (f_{i-1}^x - \hat{f}_i^x) \quad (11)$$

$$\Delta E_i = \Delta E_i^x + \Delta E_i^y \quad (12)$$

根据式(10)逐一计算出形状上所有点的新位置,称为一次迭代(epoch),迭代次数简称为 n_e ;同时式(12)计算第 i 点在第 n_e 次迭代中能量下降 $\Delta E_i(n_e)$,那么在第 n_e 次迭代后第 i 点能量总体下降为

$$\Delta E_i(n_e) \triangleq E_i(0) - E_i(n_e) = \sum_{j=1}^{n_e} \Delta E_i(j) \quad (13)$$

式中, $E_i(0)$ 为第 i 点初始总能量, $E_i(n_e)$ 为 n 次epoch后所剩余能量。

对直角这一典型的几何曲线形态采样得到的7个点 $\{(1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (2,4), (3,4), (4,4)\}$ (编号为1~7,其中1和7首尾两点固定不变),通过式(10)~(13)得到直角在不同 n_e 下的表现,通过 τ 和 λ 变化、直角边的几何变化(图1,

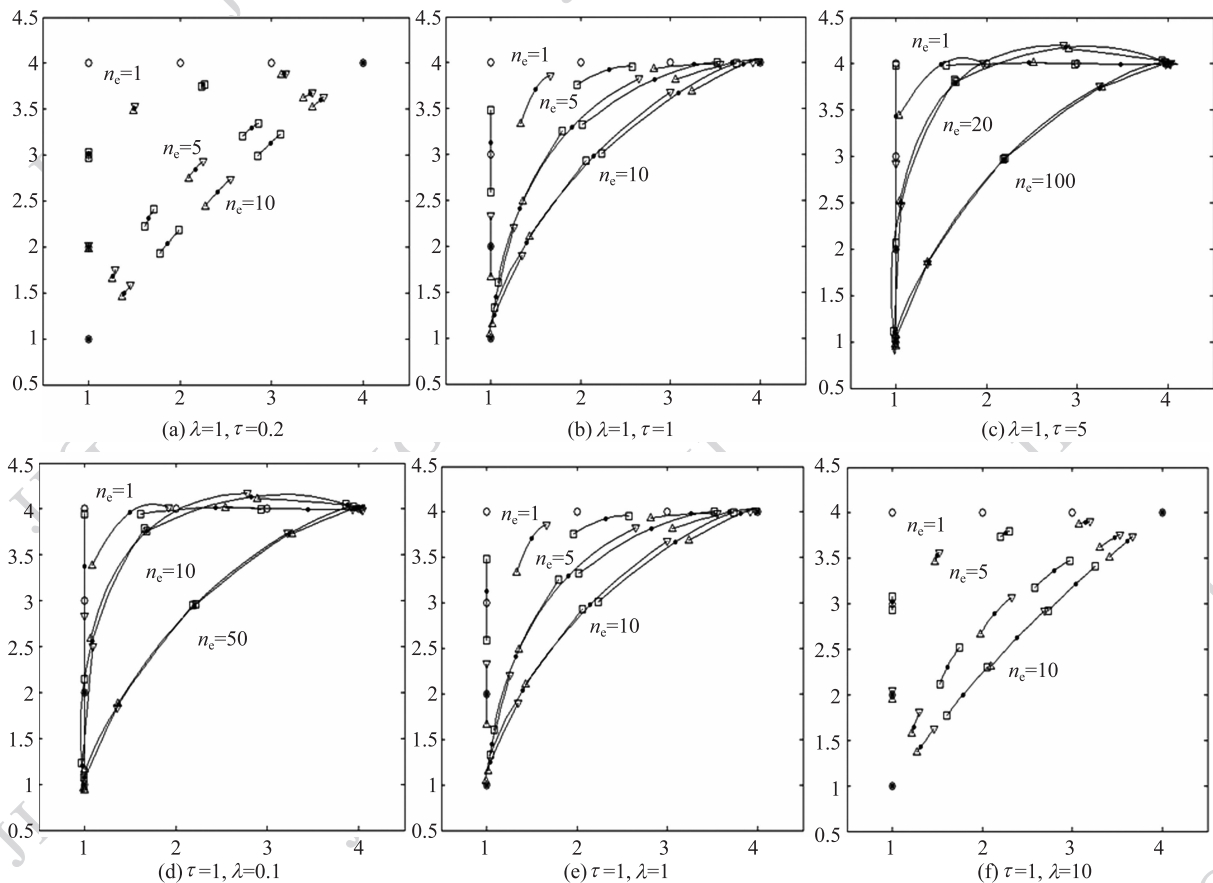


图1 τ 与 λ 的几何意义及其对形状几何形态的影响

Fig. 1 Geometric meaning of τ and λ in EQW model, with their effects on contour points

其中纵横坐标间隔均为单位“1”)之间的关联规律,可以得到如下结论:

1)EQW 的几何意义是以第 i 点为中心,以 t 为参数的一段二次曲线($-\tau \leq t \leq \tau$);随着 n_e 的增加,相邻点间的曲线将彼此重叠(或有此趋向)。

2)当 λ 保持不变时, τ 决定了第 i 点“两翼”长度和伸展能力。当 τ 较大时,随着 n_e 的增加,第 i 点的 EQW 迅速伸展并与相邻 EQW 相互重叠,并在一定程度上能保持原有的几何特征(图 1(c));当 τ 较小时,第 i 点的 EQW 和形状的整体几何表现与 τ 较大时恰好相反(图 1(a))。

3)由式(3)易知,当 τ 保持不变时, λ 是 E_i 中 C^1 不连续与 C^0 不连续两个能量之间的权重因子。当 λ 较大时, C^1 能量占据 E_i 主要部分, E_i 随着 n_e 的增加而下降地更快且更多(图 2),直观上表现为形状随着 n_e 的增加迅速收敛,并几乎完全丧失了原有的几何特征(图 1(f));当 λ 较小时, C^1 不连续能量余留较多且 ΔE_i^T 总能量下降收敛很快,直观体现为在一定的 n_e 下仍能保持一定的几何特征。

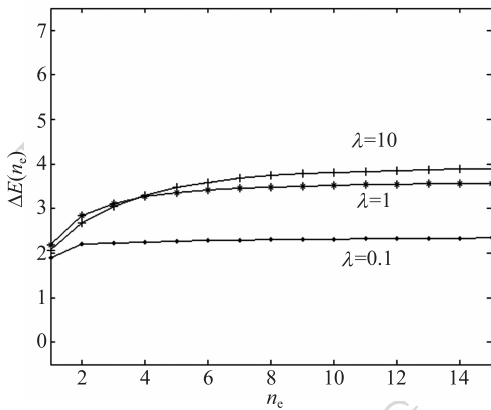


图2 不同 λ 对 E_4 (点(1,4)处能量)下降幅度与速度的影响
Fig.2 Energy decreasing at E_4 with different λ

由 2)3)可以看出, τ 和 λ 对 EQW 形状表现有着类似的作用,且 λ 的几何与物理意义都较为明显。在后续的工作中,将保持 EQW 重叠因子 τ 不变,主要以 λ 为对象来构造具有自适应保持几何特征的 EQW 能量函数。

1.4 基于几何特征保持的 EQW 能量函数构造

在噪声干扰下,尽管文献[10]中基于 EQW 的形状表现能在一定程度上保持形状的本来特征,但在形状演化过程中 τ 和 λ 都为常数 1,因而本质上它仍属于一种“几何各处同性”的表现形式。由 1.3 节

的分析可以看出,在样条重叠度 τ 不变的前提下, λ 的变化显著影响着形状的 EQW 稳定表示。基于 EQW 这样的几何性质,可以构造 $\lambda(\cdot): I_1 \rightarrow I_2$, 其中 $I_1 = (0, 1), I_2 = (0.1, 10)$, 在物体几何特征显著度与 λ 间形成函数映射关系,代替式(3)中的常数 λ ,使形状根据自身的局部几何特征显著度来决定 E_i 中能量权重 λ ,成为一种具有“几何各处异性”的 EQW 形状表现。本文提出一种 Sigmoid 函数形式的函数映射(图 3)

$$\lambda(\varphi(i)) = 10^{1 + \frac{2}{\exp(-(\varphi(i)-0.5)) - 1}} \quad (14)$$

式中, $\varphi(\cdot): \mathbf{N} \rightarrow (0, 1) \in \mathbf{R}^1$,将形状轮廓点的标号空间 \mathbf{N} 映射至显著度空间。

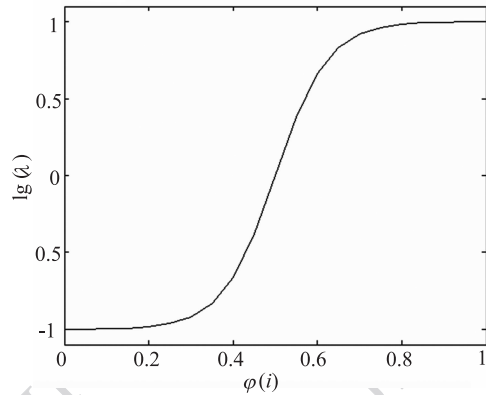


图3 形状点显著性函数与 λ 间的映射关系
Fig.3 The mapping between $\varphi(i)$ and λ

离散曲线演化(DCE)算法^[14]是对数字化轮廓按显著度依次删减轮廓点形状的简化过程,而其使用的显著度反映了轮廓上某处的角点视觉显著程度,与本文中力图保留的几何特征类型相符。因而,本工作基于 DCE 方法对目标形状轮廓进行演化分析,提取出所有轮廓点的显著度,构造出 $\varphi(i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$ 为形状轮廓点的序号)。此外,DCE 具备性质

$$DCE_{|S_N(i)|}(k) = DCE_{|S_{k+1}(i)|}(k) \quad (15)$$

式中, $\{S_N(i)\}$ 表示有 N 点的形状轮廓点有序集合(如逆时针), $DCE_{|S_N(i)|}(k)$ 的含义是通过 DCE 算法对 $\{S_N(i)\}$ 处理,保留下 k 个点。基于这样的性质,对形状仅需进行一次完整的 DCE 遍历演化,就可以得到 $\varphi(i)$,具体算法描述如下:

```

输入   $\{S_N(i)\}, i = 1, \dots, N.$ 
for ( $k = N - 1; k > 1; k++$ )
    1)  $\{S_N(i)\} = DCE_{|S_{k+1}(i)|}(k)$ 

```

2) $p = \{S_{k+1}(i)\} - \{S_{k+1}(i)\} \cap \{S_k(i)\}$

3) $I_n = \text{query}(p), \varphi(I_n) = 1 - k/N$

end

4) 为形状上最后一点赋予 $1 - 1/N$ 的显著度。

输出 $\varphi(i)$ 。

其中 $\text{query}()$ 函数是查找 p 在 $\{S_N(i)\}$ 中的序号,其值域为 $\{1, 2, \dots, N\}$ 。

基于算法输出和式(14),式(3)可重新表达为

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = \sum_{i=1}^N (E_i^0 + \lambda(\varphi(i))E_i^1) \quad (16)$$

这样,计算目标几何特征的显著度,并构造映射函数,使得形状具有了“几何各处异性”的 EQW 能量形式,能够自适应地决定轮廓上每一点的 EQW 能量比重,从而在获取形状稳定表现的同时仍能够保有显著几何特征,成为一种自适应弹性二次曲线(A-EQW)的形状表现模型。

2 A-EQW 在图像分割中的应用

图像分割是图像处理、计算机视觉等领域的研究重点和难点之一。交互式图像处理方法正逐步受到关注^[15],其中基于边界最短路径的 Live Wire 算法及其改进^[16-17]广泛应用于各种目标轮廓提取分割的场合。然而由于图像获取(透射成像、核磁共振成像、各种遥感成像等)过程中各种因素的干扰,图像信噪比较低,边界可能出现模糊、对比度低的情形,从而导致 Live Wire 算法分割结果在较大尺度上出现台阶效应,既偏离了真实目标,又不够平滑。文献[18-20]等针对这一问题做出了改进,用参数主动轮廓模型或几何主动轮廓模型对 Live Wire 分割结果进一步规整化,以获得更为接近真实边缘的分割结果。受此思路启发,将 1.4 节中的形状表现形式与 Live Wire 结合,提出一种具有自适应保持几何特征的 Live Wire 算法(LAEQW)。

为方便算法描述,假定分割对象为封闭目标,在交互式分割时用户将选择 N 个种子点(N 因具体应用和用户不同而异): $(1, \dots, i-1, i, i+1, \dots, N)$, 定义 $(i, i+1)$ 段的弧长中点为 i' 且 N' 为 $(N, 1)$ 段弧长中点,如图 4 所示。

具体算法描述如下:

输入 待分割图像 I 。

1) 分别对 I 分别进行 Canny 算子、LoG 算子

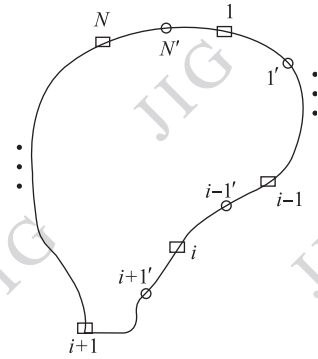


图4 LEAQW 算法示意图

Fig. 4 Illustration on LEAQW method

和梯度算子操作,按 4:3:3 加权出 Costmap。

2) 交互式选择第 1 点与第 2 点,根据 Costmap

计算最短路径 $(\widehat{1,2})$, 并获取 $1'$ 。

for($i=2; i < N; i++$)

3) 点下第 $i+1$ 点,根据 Costmap 计算最短路径

$(\widehat{i,i+1})$, 并获取 i' 。

4) 应用 2.4 节提出算法至 $(\widehat{i-1',i'})$ 段曲线,获得稳定表现 $(\widehat{i-1',i'})$ 。

end.

5) 交互式选择第 N 点,根据 Costmap 计算

$(\widehat{N,1})$, 取得 N' 。

6) 应用 2.4 节算法至 $(\widehat{N',1})$ 段曲线,获得

$(\widehat{N',1'})$ 。

输出 目标轮廓 $(\widehat{N',1'}) \cup (\widehat{1',2'}) \cup \dots \cup$

$(\widehat{N-1',N'})$ 。

需要说明的是,第 3) 步分割出的当前 $(\widehat{i,i+1})$ 轮廓曲线段 $i+1$ 一端还没有后续的交互分割结果,不利于 DCE 方法提取 $i+1$ 端点附近几何特征,算法中采取了形状规整滞后于边界分割的策略;由于人类视觉对目标拐点、角点有敏感性,交互者选择的 $(\widehat{i,i+1})$ 端点附近可能含有显著的几何信息,为更好地提取出这些特征,选取 $(\widehat{i-1,i})$ 和 $(\widehat{i,i+1})$ 两段的中点间线段 $(\widehat{i-1',i'})$ 进行规整。

3 实验与分析

为验证本文提出的自适应 EQW 在实际中保持

目标形状显著几何特征方面的能力,将其与 Live Wire 算法结合应用至图像分割之中,对各种成像模式的图像做了定性和定量的实验。算法在1.86 GHz CPU、4 GB 内存台式计算机硬件环境下,并在 Matlab 环境下运行测试。AEQW 中 n_e 统一设定为 10。

3.1 定性分析

基于文中第 2 部分算法,以合成图像、医学图像、卫星遥感图像为对象,分别进行了目标分割提取实验。从图 5(a)~(d)中可以看到,与文献[16-17]相比,由于本文方法中为 Live Wire 方法加入了基于自适应 EQW 的几何规整核 (regularization kernel),LAEQW 能够消除图像弱边界和噪声带来的锯齿状分割偏差,使分割结果更为接近目标的真实边界。在保持目标显著几何特征方面,以卫星图像中建筑物分割为例(图 5(e)(f)),LAEQW 算法能达到与文献[13]相当的效果,并在某些局部能更好地保持建筑物边缘的特征细节。

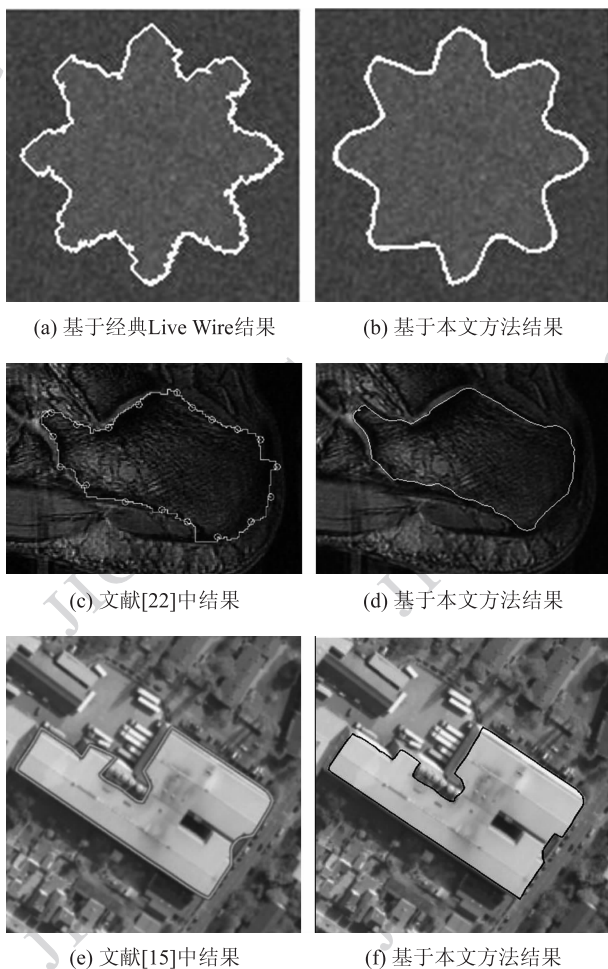


图5 图像分割结果对比

Fig.5 The comparison of image segmentation results

3.2 定量分析

分割结果的客观可重复性、时间开销是衡量交互式分割算法的几个重要指标,为了验证本文 LAEQW 交互式算法有效性,采用美国国家医学图书馆提供的美国健康普查数据库 (NHANES II) 中部分颈椎和腰椎 X 射线平片图像作为实验对象,从可重复性、时间开销等方面定量地衡量 LAEQW 算法的性能。

本文从数据库中选取了 50 张尺寸为 1462×1755 像素的颈椎 X 光片,以及 50 张尺寸为 2048×2487 像素的腰椎 X 光片中的脊椎椎体作为分割实验对象。由 3 位医学工作者应用本文 LAEQW 算法,分别以 Inter-user (不同操作者对同一对象处理) 和 Intra-user (同一操作者在不同时间对同一对象处理) 的形式进行颈椎椎体 (CVB) 和腰椎椎体 (LVB) 分割实验,以分割结果形状之间的 Hausdorff 距离 (式 (17)) 作为衡量交互式分割算法可重复性的标准,其中 $d_E(a, B)$ 表示 A 轮廓中 a 点到 B 轮廓的最短欧氏距离,同理 $d_E(b, A)$ 。最后对比了经典 Live Wire 和 LAEQW 的耗时,考察 A-EQW 算法与 Live Wire 算法结合后带来的额外时间开销。

$$d_H(A, B) = \max \left\{ \sup_{a \in A} d_E(a, B), \sup_{b \in B} d_E(b, A) \right\} \quad (17)$$

表 1 中 user1 vs user2 表示由两位交互者分别应用该算法对同一目标进行交互式图像分割时,其结果之间的差异;表 2 中 time1 vs time2 表示同一人在不同时间对同一目标进行交互式分割时,其结果之间的差异。从表 1 和表 2 反映出的统计结果来看,Inter-user 和 Intra-user 分割实验结果的 Hausdorff 距离 (均值 \pm 标准差) 基本保持在稳定范围内,表明 LAEQW 算法的可重复性较好;从表 3 可以看出,A-EQW 与 Live Wire 算法结合后,并未给整个图像分割过程带来过多额外时间开销。

表1 LEAQW 算法在 Inter-user 时结果可重复性衡量
Table 1 Reproducibility of LEAQW in Inter-user style /pixel

	user1 vs. user2	user1 vs. user3	user2 vs. user3
CVB	6.63 \pm 0.92	7.06 \pm 2.31	7.22 \pm 2.12
LVB	13.48 \pm 4.14	13.70 \pm 4.98	12.10 \pm 4.06

表 2 LEAQW 算法在 Intra-user 时结果可重复性衡量

Table 2 Reproducibility of LEAQW in Intra-user style

	/pixel		
	time1 vs. time2	time1 vs. time3	time2 vs. time3
CVB	4.57 ± 0.66	5.75 ± 0.89	5.29 ± 0.91
LVB	11.32 ± 3.34	12.90 ± 2.86	11.75 ± 2.44

表 3 LEAQW 与 Live Wire 时间开销对比

Table 3 Temporal cost of LEAQW and Live Wire

	/s	
	LEAQW	Live Wire
CVB	34.6 ± 2.2	33.3 ± 2.6
LVB	48.5 ± 5.4	47.4 ± 6.1

4 结 论

揭示了 EQW 模型的形状几何表现与其参数之间的关系,构造出自适应保持几何特征的 EQW 模型,拓展了该模型的几何表现能力,并基于此模型提出一种新的交互式分割算法 LAEQW,应用至各种图像目标的分割之中。定性和定量实验证明了 LAEQW 算法能更为准确、稳定地提取出目标形状,可为后续的特征提取、形状理解等研究打下基础。文中提出的自适应 EQW 模型若与其他基于边缘的图像分割算法相结合,将有更广泛的应用。

参考文献 (References)

- [1] Zhang D S, Lu G J. Review of shape representation and description techniques [J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(1): 1-19.
- [2] Bookstein F L. Size and shape spaces for landmark data in two dimensions [J]. *Statistical Science*, 1986, 1(2):181-142.
- [3] Kendall D G. Shape manifolds, procrutean metrics and complex projective spaces [J]. *Bulletin of London Mathematical Society*, 1984, 16(2): 81-121.
- [4] Cootes T F, Taylor C J, Cooper D H. Active shape models, their training and applications [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, 61(1): 38-59.
- [5] Cootes T F, Edwards G J, Taylor C J. Active appearance models [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(6):681-685.
- [6] Paramanand C, Rajagopalan A N. Image matching with higher-order geometric features [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2010, 27(4): 739-748.
- [7] Wang C L, Zhao C X. Arbitrary shape representation and registration based on Hough spectrum [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 15(5):764-769. [王彩玲, 赵春霞. 基于 Hough 谱的任意形状表示与配准[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(5): 764-769.]
- [8] Younes L, Michor P W, Shah J, et al. A metric on shape space with explicit geodesics, [J]. *Rendiconti Lincei Matematica Application*, 2008, 16(9): 25-57.
- [9] Klassen E, Srivastava A, Mio W. Analysis of planar shapes using geodeic path on shape spaces [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(3):372-383.
- [10] Kubota T. A shape representation with elastic quadratic polynomials-preservation of high curvature points under noisy conditions [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 82(2): 133-155.
- [11] Zheng B, Takamatsu J, Ikeuchi K. An adaptive and stable method for fitting implicit polynomial curves and surfaces [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(3): 561-568.
- [12] Yang W, Song S H, Tan Z J. Adaptive variational curve smoothing based on level set method [J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(12): 6333-6348.
- [13] Droske M, Bertozzi A. Higher-order feature-preserving geometric regularization [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2010, 3(1): 21-51.
- [14] Latecki L J, Lakaemper R. Convexity rule for shape decomposition based on discrete contour evolution [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, 73(3): 441-454.
- [15] Qiu G P, Yuen P C. Interactive imaging and vision: Ideas, algorithms and applications [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(2): 431-433.
- [16] Falcão A, Udupa J K, Samarasekera S. User-steered image segmentation paradigms: live-wire and live-lane [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1998, 60(4):233-260.
- [17] Liu J M, Udupa J K. Oriented active shape models [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2009, 28(4): 571-584.
- [18] Luo X P, Tian J. A Modified interactive segmentation of medical image series [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(1): 29-32. [罗希平, 田捷. 一种改进的交互式医学图像序列分割方法[J]. *电子学报*, 2003, 31(1): 29-32.]
- [19] Liang J M, McInerney T, Terzopoulos D. United snakes [J]. *Medical Image Analysis*, 2006, 10(2): 213-233.
- [20] Yao J H, Chen D. Live level set: a hybrid method of livewire and level set for medical image segmentation [J]. *Medical Physics*, 2008, 35(9):4112-4120.