

## 强噪声干扰下的对数极坐标空间边缘提取算法

文鹏程<sup>1\*</sup>, 张亚棣<sup>1</sup>, 王向军<sup>2</sup>

(1. 中国航空工业集团 西安航空计算技术研究所, 西安 710119; 2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(\* 通信作者电子邮箱 victorlionwen@yahoo.com.cn)

**摘要:**准确提取对数极坐标空间的目标边缘信息是对数极坐标变换视觉不变性获得成功应用的前提和关键。由于传统的边缘提取算法无法满足强噪声干扰下的单像素精度要求,在主动轮廓模型和水平集方法的基础上,设计了一种独特的边缘提取算法。经融合 Canny 算子的水平集方法全局降噪,利用能量驱动的主动轮廓模型逐次演化逼近,提取可能的边缘曲线,通过改进型跟踪寻迹剔除虚假信息,即可得到最终的目标边缘。实验表明,该算法行之有效,边缘提取特征相似度达 96% 以上。

**关键词:**边缘提取;对数极坐标空间;主动轮廓模型;水平集方法;跟踪寻迹

**中图分类号:**TN911.73 **文献标志码:**A

### Algorithm of edge extraction in intensively noisy log-polar space

WEN Pengcheng<sup>1\*</sup>, ZHANG Yadi<sup>1</sup>, WANG Xiangjun<sup>2</sup>

(1. Computing Technique Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an Shaanxi 710119, China;

2. College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Accurate extraction of a target's edge in a log-polar space is a precondition and key point to successfully apply the visual invariance of the log-polar transformation. Since it is impossible for traditional algorithms to extract the single-pixel edge in an intensively noisy environment, a unique edge extraction algorithm on the basis of active contour model and level set method was designed. After noise removal on the whole via Canny operator based level set method, the energy-driving active contour model was used to iteratively approach the potential edges. By clearing out false edges with an improved tracing way, the true target's edge was extracted finally. The experimental results demonstrate the effective performance of the proposed algorithm with the edge feature similarity up to 96%.

**Key words:** edge extraction; log-polar space; active contour model; level set method; tracing way

## 0 引言

对数极坐标变换因具有良好的视觉不变性<sup>[1-4]</sup>,被越来越多地应用于基于图像的目标检测、跟踪与识别。在工程环境下,受成像高度、角度,以及大气条件等因素的影响,图像中的运动目标不可避免地存在着尺度和旋转变换。而这些变化映射到对数极坐标空间,仅仅表现为目标像点的上下平移和左右平移。也就是说,对于对数极坐标空间内的目标边缘图像而言,尺度和旋转变换只是改变了目标边缘曲线的平移,其形状并未发生改变。由于平移是比较容易分析的,因此只要能够准确地提取出目标的边缘信息,抗尺度和抗旋转处理将迎刃而解。

边缘提取是图像处理中的经典问题<sup>[5]</sup>。传统的边缘提取算法主要是考察图像中每个像素在其邻域内的灰度跳跃式变化,数学上可以用一阶或二阶导数来判别,例如 Prewitt 算子、Sobel 算子、LoG (Laplacian of Gaussian) 算子等,它们不是对噪声敏感,就是提取出的边缘容易出现多像素宽度。Canny 算子虽具有一定的噪声抑制能力,能够提取真正的弱边缘,但是,对于不同的图像,Canny 算子的高、低阈值不可能一成不变,也就是说它不具有自适应能力,如果用户不熟悉该算法而自行调节参数,那么在很多情况下难以取得好的边缘提取效果。

由于对数极坐标空间内的目标边缘曲线形式多样,且常常伴有严重的噪声,因此传统的边缘提取算法并不适用。为了准确地提取单像素精度的目标边缘信息,本文在主动轮廓模型和水平集方法的基础上设计了一种强噪声干扰下的对数极坐标空间边缘提取算法。

## 1 主动轮廓模型与水平集方法的边缘提取

主动轮廓模型(又称 Snake 模型)由 Kass 等<sup>[6]</sup>提出,它的基本思想是:使图像特征附近的具有能量的初始样条曲线(面),通过一系列内力约束和外力引导的共同作用,不断变形,进而寻找与图像特征对应的能量极小曲线(面),也就是寻找图像的边缘。

主动轮廓模型用曲线  $C(s) = (x(s), y(s))$ ,  $s \in [0, 1]$  定义,它是以归一化弧长作参数的曲线表达形式,对应的能量泛函为:

$$E = \int_0^1 \{E_{\text{int}}(C(s)) + E_{\text{ext}}(C(s))\} ds \quad (1)$$

其中: $E_{\text{int}}$  表示曲线的内部能量,它的作用是约束曲线的自身运动,使曲线具备伸缩和弯曲的功能; $E_{\text{ext}}$  表示曲线的外部能量,它的作用是吸引曲线向着有显著特征的图像边缘运动。

求式(1)的最小值,可采用 Mumford-Shah 算式<sup>[7]</sup>,它从全局角度出发,无论在理论上还是在数值计算上都具有很强的

收稿日期:2012-12-29;修回日期:2013-02-16。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872097);中航工业计算所创新基金资助项目(CXXM12072-16)。

作者简介:文鹏程(1981-),男,湖南长沙人,工程师,博士,主要研究方向:图形图像处理;张亚棣(1968-),男,江西南昌人,研究员,博士,主要研究方向:计算机体系结构、嵌入式软件;王向军(1955-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要研究方向:计算机视觉、模式识别。

优势。Mumford-Shah 算式的基本形式是:

$$E(I, C) = \int_{\Omega} |I(x, y) - I_0(x, y)|^2 dx dy + \mu \int_{\Omega} |\nabla I(x, y)|^2 dx dy + \nu |C| \quad (2)$$

其中:  $\Omega$  是图像  $I$  的定义域, 轮廓曲线  $C$  是当前考察图像的边界, 它将  $I$  分割成若干个近似同质的平滑图像块, 以逼近原始图像  $I_0$ ,  $|C|$  表示  $C$  的长度,  $\mu, \nu$  是非负常数。当能量函数最小时, 即可找到最优边界  $C$ , 使得  $I$  与  $I_0$  的差异最小。

在实际应用中, 由于  $C$  的低维性和非凸性, 直接求解式 (2) 困难较大, 可尝试用水平集方法解决能量最小化问题<sup>[8-9]</sup>。设图像  $I$  被主动轮廓曲线  $C$  划分为外部  $out(C)$  和内部  $in(C)$  两个区域, 各区域的平均灰度分别为  $c_{out}$  和  $c_{in}$ , 能量函数有如下形式:

$$E(C, c_{out}, c_{in}) = \lambda_1 \int_{out(C)} |I(x, y) - c_{out}|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{in(C)} |I(x, y) - c_{in}|^2 dx dy + \nu |C| \quad (3)$$

用水平集函数替代曲线  $C$ , 如果当前点在  $C$  的外部, 那么  $\varphi > 0$ ; 反之,  $\varphi < 0$ ; 若在曲线上, 则  $\varphi = 0$ 。引入 Dirac 函数:

$$\delta_e(\varphi) = \frac{1}{2\varepsilon} \cdot \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi \cdot \varphi}{\varepsilon}\right) \right] \quad (4)$$

最小化  $E$ , 得到相应的欧拉-拉格朗日方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\delta_e(\varphi) (\lambda_1 e_1 - \lambda_2 e_2) + \nu \delta_e(\varphi) \operatorname{div} \left( \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \quad (5)$$

其中:

$$e_1 = \int |I(x, y) - c_{out}|^2 dx dy \quad (6)$$

$$e_2 = \int |I(x, y) - c_{in}|^2 dx dy \quad (7)$$

该方法的初始轮廓曲线可以选在图像区域的任意位置, 它不依赖图像梯度信息, 是全局最优的边缘提取方法。为了保证边界条件的稳定, 建议初始轮廓曲线与图像边框保持若干个像素的距离。举例说明: 设置初始轮廓曲线于图像的第 15 列, 如图 1(a) 所示; 经主动轮廓模型水平集演化, 结果见图 1(b); 从而, 提取的边缘为图 1(c)。

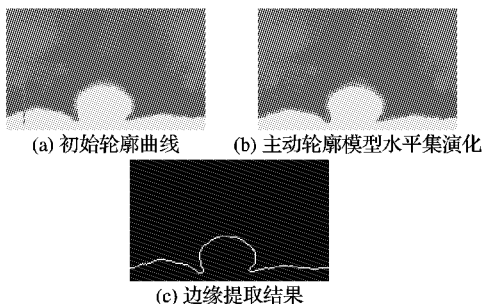


图1 基于主动轮廓模型和水平集方法的边缘提取

## 2 强噪声干扰下的边缘提取

当目标受到强噪声干扰时, 主动轮廓模型不能直接提取对数极坐标空间内的边缘, 必须先对图像进行降噪处理。为了能有效地滤除图像的全局噪声, 并且能很好地保留图像的边缘信息, 采用融合 Canny 算子的水平集降噪方法<sup>[10]</sup>。其演化方程为:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + F_E \left| \frac{\nabla G * I}{|\nabla G * I|} \right| + \mu \cdot \frac{1}{1 + |\nabla G * I|^2} \cdot \delta_e(I) = 0 \quad (8)$$

$$F_E = \begin{cases} 0, & \max(E) > T_{\text{High}} \\ M, & \max(E) < T_{\text{Low}} \\ \min(k)/\max(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $I$  为图像数据,  $G(x, y, \sigma)$  为二维高斯函数,  $F_E$  为演化速度函数,  $\max(E)$  代表以检测点为中心的  $3 \times 3$  邻域中的边缘强度最大值,  $T_{\text{High}}$  和  $T_{\text{Low}}$  代表 Canny 检测优化中的高、低阈值。根据 Canny 双阈值技术, 如果  $\max(E) > T_{\text{High}}$ , 则认为检测点一定是边缘点, 此时不对图像进行任何平滑操作; 如果  $\max(E) < T_{\text{Low}}$ , 则认为检测点一定不是边缘点, 此时可选用均值曲率流对图像进行大范围的平滑操作; 如果  $\max(E)$  位于  $T_{\text{High}}$  和  $T_{\text{Low}}$  之间, 则检测点可能是边缘点也可能不是边缘点, 此时需选用最小/最大曲率流  $\min(k)/\max(k)$  进行逐一排查<sup>[11]</sup>。

经降噪处理后, 图像中往往含有与目标性质相同或相近的区域, 利用主动轮廓模型提取边缘曲线常常会出现多条。它们将严重影响后续的目标检测、跟踪与识别, 必须对虚假部分加以剔除。

研究发现, 对于连通的目标图像, 其边缘曲线会覆盖整个对数极坐标空间的横向轴。因此, 通过跟踪寻迹的方法找到每条曲线的起点和终点, 即可判别曲线的真伪。

为了减少计算量, 采用改进型跟踪寻迹方法 (如图 2 所示)。对图像的第 1 列, 按照从上到下的顺序搜索, 找出该列所有的边界点, 作为起点, 记为  $A_i (1 < i < \text{end})$ 。从  $A_i$  出发, 定义初始搜索方向为右下方向; 如果右下方的点不是边界点, 那么搜索方向逆时针旋转  $45^\circ$ , 直到发现新的边界点  $B_i$  为止; 以为新的起点, 在当前搜索方向的基础上顺时针旋转  $90^\circ$ , 用同样的方法继续搜索, 直至到达曲线的终点  $C_i$ 。

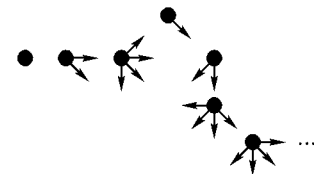


图2 改进型跟踪寻迹方法示意图

## 3 实验验证

选取 4 种强噪声干扰下的红细胞<sup>[12]</sup> 对数极坐标图像, 如图 3(a) 所示; 经融合 Canny 算子的水平集方法降噪, 其结果如图 3(b) 所示; 利用主动轮廓模型提取可能的边缘曲线, 其结果如图 3(c) 所示; 通过跟踪寻迹剔除虚假信息后, 得到最终的目标边缘, 如图 3(d) 所示。

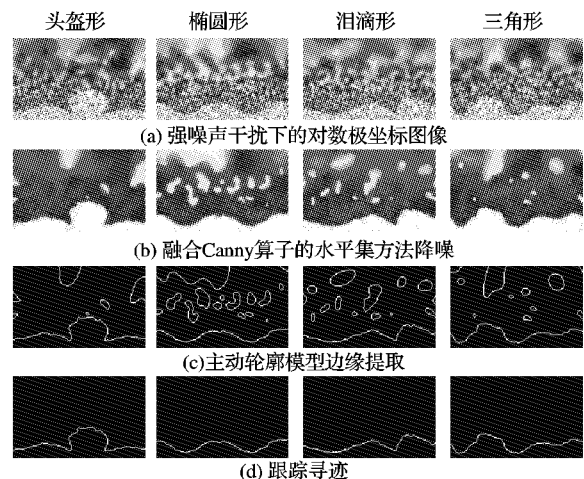


图3 强噪声干扰下的对数极坐标空间边缘提取

(下转第 1700 页)

式提供了多分辨率特性,使得最终的码流具有分辨率渐进性;而子带内自适应预测技术很大程度上减小了高频子带系数的信息熵。实验证明本方法编码结果在码率上要小于 JPEG2000,与其他空域预测编码方法比,也具有极具竞争力的性能。

#### 参考文献:

- [1] WEINBERGER M, SEROUSSI G, SAPIRO G. The LOCO-I lossless image compression algorithm: Principles and standardization into JPEG-LS[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(8): 1309–1324.
- [2] MU X, MEMON N. Context-based adaptive lossless image coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(4): 437–444.
- [3] LI X, ORCHARD M T. Edge-directed prediction for lossless compression of natural images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(6): 813–817.
- [4] WU X L, ZHAI G T. Adaptive sequential prediction of multidimensional signals with applications to lossless image coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(1): 36–42.
- [5] ZHANG Y, ADJEROH D A. Prediction by partial approximate matching for lossless image compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(6): 924–935.
- [6] ZHAO X W, HE Z H. Lossless image compression using super-spatial structure prediction[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(4): 383–386.
- [7] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1646R. JPEG 2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0[S]. Geneva: ISO, 2000.
- [8] TAUBMAN D S. JPEG2000 图像压缩基础、标准和实践[M]. 魏江力, 柏正尧, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [9] TAUBMAN D S. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158–1170.
- [10] CHANG C L, GIROD B. Direction-adaptive discrete wavelet transform for image compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(5): 1289–1302.
- [11] DING W P, WU F. Adaptive directional lifting-based wavelet transform for image coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 416–427.
- [12] MALLAT S. 信号处理的小波导引[M]. 2版. 杨力华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [13] DAUBECHIES I. 小波十讲[M]. 李建平, 译. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [14] SWELDENS W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1998, 29(2): 511–546.
- [15] DAUBECHIES I, SWELDENS W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 1998, 4(3): 247–269.
- [16] LI X. New results of phase shifting in the wavelet space[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(7): 193–195.

(上接第1696页)

定义相关系数:

$$R_{\text{Corr}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C(i, j) C^*(i, j)}{\left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C^2(i, j) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C^{*2}(i, j) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

用  $R_{\text{Corr}}$  作为特征相似度评测指标时,  $R_{\text{Corr}}$  越大,说明算法提取的目标边缘  $C$  与真实边缘  $C^*$  越相似(注:真实边缘  $C^*$  属于理想状态,实验中只能利用若干幅噪声干扰较小的目标图像,通过人工逐点分析、反复比较的方法无限逼近)。评测结果见表1。

表1 边缘提取特征相似度评测

血细胞	$R_{\text{Corr}}$	血细胞	$R_{\text{Corr}}$
头盔形	0.9604	泪滴形	0.9888
椭圆形	0.9815	三角形	0.9735

## 4 结语

本文设计了一种强噪声干扰下的对数极坐标空间边缘提取算法。经融合 Canny 算子的水平集方法全局降噪,利用能量驱动的主动轮廓模型逐次演化逼近,提取可能的边缘曲线,通过改进型跟踪寻迹剔除虚假信息,最终得到的目标边缘与真实边缘,其特征相似度达到96%以上。该算法为后续的目标检测、跟踪与识别奠定了很好的基础。

#### 参考文献:

- [1] SCHWARTZ E L. Spatial mapping in the primate sensory projection: analytic structure and relevance to perception[J]. Biological Cybernetics, 1977, 25(4): 181–194.
- [2] 王立. 视觉机制研究及其在红外成像制导中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [3] 李言俊, 张科. 视觉仿生成像制导技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] SNOWDEN R, THOMPSON P, TROSCIANKO T. Basic vision: An introduction to visual perception [M]. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [5] GONZALES R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 2版. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [6] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4): 321–331.
- [7] MUMFORD D, SHAH J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1989, 42(5): 577–685.
- [8] CHAN T, VESE L. Active contours without edges [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266–277.
- [9] HEYDARIAN M, NOSEWORTHY M D, KAMATH M V, et al. Optimizing the level set algorithm for detecting object edges in MR and CT images [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(1): 156–166.
- [10] WEN P C, WANG X J, WEI H. Modified level set method with Canny operator for image noise removal [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(12): 1127–1130.
- [11] MALLADI R, SETHIAN J A. A unified approach to noise removal, image enhancement, and shape recovery [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(11): 1154–1168.
- [12] KIM K S, KIM P K, SONG J J, et al. Analyzing blood cell image to distinguish its abnormalities[C]// Proceedings of the 8th ACM International Multimedia Conference. New York: ACM, 2000: 395–397.