

改进 C-V 分割算法在多光谱成像仪中的应用

张艳超^{1,2*}, 赵建¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了进一步提高 C-V 模型的分割速度、降低初始轮廓曲线位置对分割结果的耦合性, 提高多光谱成像仪图像分割效率, 本文提出一种改进的 C-V 模型。该模型通过将每次迭代得到的距离函数的最大值引入 C-V 模型的 Dirac 函数, 对该函数进行自适应参数修正, 以拓宽活动轮廓线的有效作用范围, 进而大大降低分割算法的迭代次数。实验结果表明, 与经典的 C-V 模型相比, 改进的 C-V 模型在其终止条件下得到了较理想的分割效果, 降低了初始曲线位置对最终分割结果的影响, 且新模型的收敛速度在原有的基础上至少提高了 7 倍。改进的 C-V 模型在实时性及全局性方面都得到了明显改进, 进一步提高了该算法在多光谱成像仪的图像分割方面的鲁棒性。

关键词: 多光谱成像仪; 图像分割; 偏微分方程; 几何活动轮廓模型; C-V 模型

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150801.0068

Application of improved C-V segmentation in multi-spectral imager

ZHANG Yan-chao^{1,2*}, ZHAO Jian¹

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

** Corresponding author, E-mail: zhangyanchaomn@126.com*

Abstract: In order to improve the image segmentation speed when using C-V model, reduce the segmentation coupling with initial contour position, and improve the image segmentation efficiency of multi-spectral imager, an improved C-V model is proposed in the paper. In this model, the Dirac function' parameter is corrected adaptively by introducing the maximum value of distance function in each iteration. In this way, the effective range of active contour is broadened, and the number of iterations is reduced. The experimental results show that the ideal segmentation effect is obtained by the improved C-V model with the iteration termination condition. Compared with the classic C-V model, the influence of initial contour position on segmentation is reduced. In addition, the convergence speed is improved by 7 times. The characteristics of real time and global nature both become better. Therefore, the robustness of multi-spectral imager segmentation is improved ac-

收稿日期: 2014-11-15; 修订日期: 2015-01-19

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目 (No. 20140204058GX); 长春市重大科技攻关项目 (No. 14KG011)

cordingly.

Key words: multi-spectral imager; image segmentation; partial differential equation; geometric active contour model; C-V model

1 引 言

多光谱成像仪多用于对远距离大范围室外目标区域进行多波段光谱成像,以便对视场范围内的目标成分特性、伪装效果以及突发事件侦查等进行分析处理。目标的分类、识别、跟踪和行为理解是图像分析的重要手段,而图像的有效分割则是后续图像分析的必要前提。因此,行之有效的图像分割算法的研究在计算机视觉处理中具有重要意义,并已成为图像处理领域的研究热点^[1-5]。

常见的图像分割方法主要有基于图像边缘的分割方法、基于区域阈值的分割方法以及基于偏微分方程的图像分割方法。相对于前两类传统方法,基于偏微分方程的分割方法则是从物理模型出发,将图像分割问题直接转换为求解能量泛函的极小值问题,并能有效地融合利用图像自身的低层次视觉属性与对待分割物体已有的先验知识,因此可较好的获得分割区域的完整表示,在一定程度上克服了传统分割方法由于自身的局限性使得分割区域的边界不完整,以及缺乏结合先验知识能力等缺陷^[6]。偏微分方程的图像分割领域中,又主要分为参数活动轮廓模型和几何活动轮廓模型。基于水平集的几何活动轮廓模型方法由于对外形复杂、拓扑结构发生变化的图像能够得到较好的稳定结果,因此基于该类模型的图像分割方法已成为当前主流的分割方法。其中,最流行的是由 Chan 和 Vese 提出的基于水平集的 C-V 模型^[7](又称 Chan-Vese 模型)及其相关衍生算法^[8-11]。

C-V 模型是一种典型的区域分割模型,一旦初始化后便可自动检测待分割物体内部轮廓,与图像梯度无关,因此该模型可在很大程度上减少噪声干扰,同时适用于边缘模糊甚至不连续情况。但是,该模型由于水平集分割原理以及 C-V 模型自身结构缺陷,收敛速度往往较慢,而且对于含有

多个待分割目标、且各目标之间具有一定距离的情况,分割结果常受到初始轮廓曲线位置的影响不能准确分割。鉴于此,本文在经典的 C-V 模型的基础上,提出一种改进的 C-V 模型,通过对其 Dirac 函数进行自适应参数修正,可大大降低算法的迭代次数,降低初始轮廓曲线位置对分割结果的影响。

2 C-V 模型分割原理

2001 年,Chan 和 Vese 等人结合水平集思想^[12]与 Mumford-Shah 模型^[13]提出了基于无边界的 C-V 分割模型。其能量函数表达式为:

$$F(c_1, c_2, \phi) = \mu \iint_{\Omega} \delta[\phi(x, y)] |\nabla \phi(x, y)| dx dy + v \iint_{\Omega} H[\phi(x, y)] dx dy + \lambda_1 \iint_{\Omega} |u(x, y) - c_1| H[\phi(x, y)] dx dy + \lambda_2 \iint_{\Omega} |u(x, y) - c_2| \{1 - H[\phi(x, y)]\} dx dy, \quad (1)$$

式中, ϕ 代表图像各点与演化曲线的距离函数,等式右边第一项为当前演化曲线长度,第二项为当前演化曲线内部面积,第三项和第四项分别代表当前演化曲线内部和外部能量; $\mu, v, \lambda_1, \lambda_2$ 依次为上述四项的加权系数,并要求 $\mu \geq 0, v \geq 0, \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ 。 $H(\phi)$ 为 Heaviside 函数,正则化后的表达式如式(2)所示:

$$H(\phi) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\phi}{\varepsilon}\right) \right]. \quad (2)$$

$\delta(\phi)$ 为 Dirac 函数,为 Heaviside 函数的一阶倒数,其表达式如式(3)所示:

$$\delta(\phi) = \frac{\varepsilon}{\pi(\varepsilon^2 + \phi^2)}. \quad (3)$$

c_1, c_2 分别为演化曲线内部和外部区域灰度均值,其表达式分别如式(4)、式(5)所示:

$$c_1 = \frac{\iint_{\Omega} u(x, y) H[\phi(x, y)] dx dy}{\iint_{\Omega} H[\phi(x, y)] dx dy}, \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{\iint_{\Omega} u(x, y) \{1 - H[\phi(x, y)]\} dx dy}{\iint_{\Omega} \{1 - H[\phi(x, y)]\} dx dy}. \quad (5)$$

使式(1)达到最小的距离函数 ϕ 即为所求的轮廓曲线。因此,将轮廓曲线的求取问题转化为使能量函数求极小值的泛函问题。其求解过程可通过梯度下降法^[14]迭代实现。其迭代式如式(6)所示:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta(\phi) [\mu \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \nu - \lambda_1 |u - c_1| + \lambda_2 |u - c_2|]. \quad (6)$$

3 改进的 C-V 模型

由上述表达式可知,当参数 ε 相对于 ϕ 值很小时,Dirac 函数 $\delta(\phi)$ 将会具有很窄的定义范围,很难保证仅靠一条初始化轮廓曲线就能将同质区域都分割出来,尤其是图像中与轮廓曲线距离相对较远的边界,其演化效率几乎为零,此种情况下就很难实现目标区域的快速分割。因此,在参数 ε 选取时要严格控制其与 ϕ 的比例关系,而实际迭代计算过程中, ϕ 值会随之发生变化,单一的 ϕ 值难以实现分割结果的自适应,而且,对不同图像进行分割时,都要重新估算 ε 值,严重影响了算法的鲁棒性。

鉴于上述分析,本文对函数 $\delta(\phi)$ 中的 ϕ 进行归一化,表达式如式(7)所示:

$$\delta(\phi) = \frac{\varepsilon}{\pi \{ \varepsilon^2 + [\frac{\phi}{\max(\phi)}]^2 \}}, \quad (7)$$

式中, $\max(\phi)$ 为距离函数矩阵 ϕ 的最大值。

通过式(7)表达式可知,即使距离函数 ϕ 发生较大变化,在 $\max(\phi)$ 的修正下,其商仍与 ε 始终保持较合理的比例关系。因此,参数 ε 一旦选定,无需对其值进行反复修正,大大提高了该模型的鲁棒性。

4 实验结果与分析

本节依次通过实验对比较经典 C-V 模型与本文改进 C-V 模型在初始轮廓线耦合性以及实时性两个方面的分割特性。主控计算机主要配置如下:CPU 为 Intel Core i5-4570,内存 4.00 GB,操作系统为 Windows7,采用 matlab2007 作为程序开发环境。实验中,各参数取值如下: $\mu = 250, \nu = 0, \lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 1.0, \varepsilon = 1.0, \Delta t = 0.1$ 。

4.1 与初始轮廓线耦合性分析

为了比较经典 C-V 模型与本文改进 C-V 模型对初始轮廓曲线位置敏感度(即耦合性),本文对同一场景图片分别进行初始轮廓曲线两个典型位置选取,并将每个初始轮廓曲线位置下得到



(a) 原图

(a) Original image



(b) C-V 模型分割结果

(b) Segmentation result with C-V model



(c) 改进的C-V 模型分割结果

(c) Segmentation result with improved C-V model

图1 初始轮廓位于视场中心偏下

Fig. 1 Initial contour with the position at the bottom of the image center

的 C-V 模型分割结果与本文改进 C-V 模型分割结果进行对比,结果如图 1 和图 2 所示。

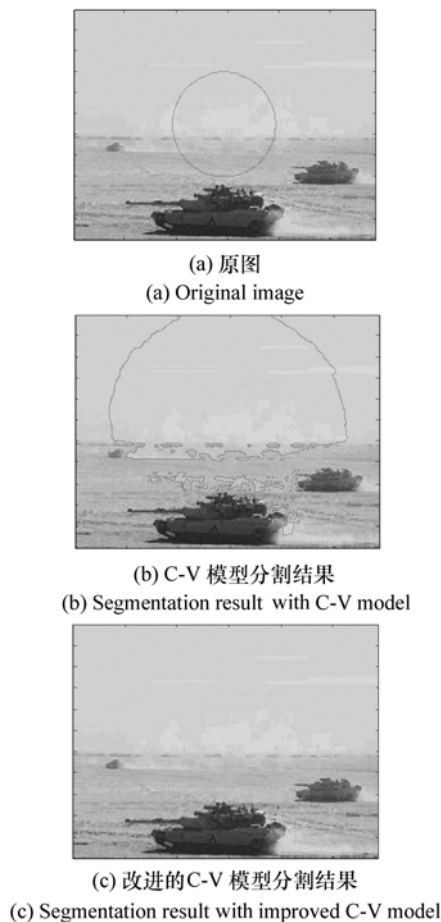


图 2 初始轮廓位于视场中心

Fig. 2 Initial contour with the position at the image center

由图 1 可知,当初始曲线与目标区域(此图为坦克)较接近时,C-V 模型与本文改进的 C-V 模型均具有较好的分割效果。而当初始轮廓曲线位于视场中心时(如图 2 所示),此时与三辆坦克边界均有一定的距离,且曲线内部以背景为主。相同迭代终止条件下,图 2(b)中的 C-V 模型的轮廓曲线无法收敛于目标,其分割结果与图 1(b)图具有很大差异;相比之下,图 2(c)改进的 C-V 模型仍然具有与图 1(c)相近的分割效果。

由于篇幅限制,本文只在此部分列出一幅图片的其中两种情况。经过大量的实际比较,其对比结果与上述实验比较结果相似。由此可以得出如下结论:改进的 C-V 模型与经典的 C-V 模型相

比,对初始轮廓曲线位置具有更小的敏感度。因此,在实际使用过程中,具有更好的鲁棒性。

4.2 实时性分析

由本文第 3 节所述,改进的 C-V 模型与经典的 C-V 模型相比,具有更宽的边界定义范围,因此其应该具有更快的全局收敛速度。为了验证此项特性,本节分别对四个目标场景进行两种分割方法的实时性比较,四幅待分割图像及其初始轮廓曲线如图 3 所示。在保证相近的分割效果的前提下,两种模型整个分割过程的迭代次数如表 1 所示。

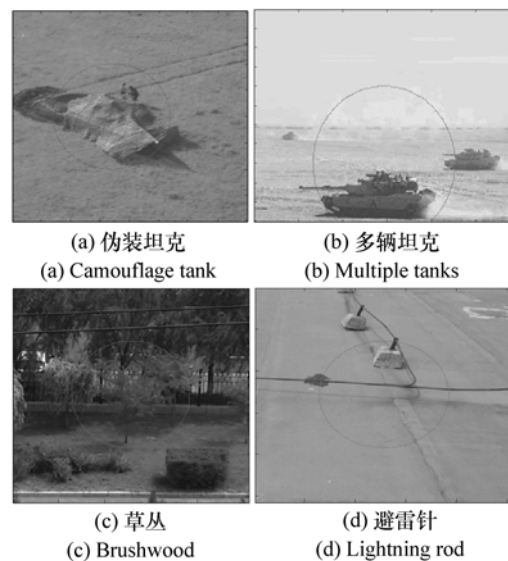


图 3 实时性比较

Fig. 3 Comparison of real time

表 1 迭代次数比较

Tab. 1 Comparison of the number of iterations

图像名称	经典 C-V 迭代次数	改进 C-V 迭代次数
伪装坦克	1 717	117
多辆坦克	1 231	55
草丛	2 667	335
避雷器	1 347	176

由表 1 数据可知,与经典 C-V 模型相比,改进 C-V 模型的迭代次数大幅减少,其收敛速度提高至少 7 倍。对于初始轮廓曲线选取不当的情况,经典 C-V 模型的收敛速度会进一步减慢甚至出现停滞收敛的情况,而此时改进后 C-V 模型在

实时性方面会表现出更为突出的优越性。

5 结 论

针对经典 C-V 模型收敛速度慢、初始轮廓曲线位置选取鲁棒性差的缺陷,本文提出一种改进

的 C-V 模型。该模型通过对 Dirac 函数进行参数自适应修正,收敛速度得到大幅提高,实验数据显示,其收敛速度比经典 C-V 模型至少提高了7倍;且该模型对于初始轮廓曲线的选取具有更强的鲁棒性。因此,将该模型用于多光谱成像仪分割算法中,可以进一步提高设备的图像分析能力。

参考文献:

- [1] 许伟琳,武春风,逯力红,等. 基于光谱角时序不变性的红外目标识别[J]. 中国光学,2012,5(3):257-262.
XU W L, WU CH F, LU L H, *et al.*. IR target recognition based on invariant sequential spectral angle[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):257-262. (in Chinese)
- [2] 刘希佳,陈宇,王文生,等. 小目标识别的小波阈值去噪方法[J]. 中国光学,2012,5(3):248-256.
LIU X J, CHEN Y, WANG W SH, *et al.*. De-noising algorithm of wavelet threshold for small target detection[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):248-256. (in Chinese)
- [3] 赵建川,王弟男,陈长青,等. 红外激光主动成像和识别[J]. 中国光学,2013,6(5):765-802.
ZHAO J CH, WANG D N, CHEN CH Q, *et al.*. Infrared laser active imaging and recognition technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):765-802. (in Chinese)
- [4] 张健,李宏升. 基于图论阈值算法的图像分割研究[J]. 液晶与显示,2014,29(4):592-597.
ZHANG J, LI H SH. Image mosaic research based on wavelet and rough set algorithm[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4):592-597. (in Chinese)
- [5] 刘瑞娟,何传江,原野. 融合局部和全局图像信息的活动轮廓模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2012,24(3):364-371.
LIU R J, HE CH J, YUAN Y. Active contours driven by local and global image fitting energy[J]. *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(3):364-371. (in Chinese)
- [6] 杨名宇. 基于改进 Chan-Vese 模型的图像分割[J]. 液晶与显示,2014,29(3):473-478.
YANG M Y. Image segmentation based on improved Chan-Vese model[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(3):473-478. (in Chinese)
- [7] CHAN T F, VESE L. Active contour without edges[J]. *IEEE*, 2001, 10(2):12-49.
- [8] 卢小鹏,李辉,刘云杰,等. 基于 Chan-Vese 模型的 TFT-LCD Mura 缺陷快速分割算法[J]. 液晶与显示,2014,29(1):146-151.
LU X P, LI H, LIU Y J, *et al.*. Algorithm for fast TFT-LCD Mura defect image segmentation based on Chan-Vese model[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(1):146-151. (in Chinese)
- [9] 张翔宇,杨玉孝. C-V 模型和数学形态学的红外图像处理方法[J]. 激光与红外,2014,44(1):30-34.
ZHANG X Y, YANG Y X. Infrared image processing method based on C-V model and mathematical morphology[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(1):30-34. (in Chinese)
- [10] 潘改,高立群,张萍. 融合 C-V 和 GVF 的测地线活动轮廓模型[J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(2):166-169.
PAN G, GAO L Q, ZHANG P. Geodesic active contour model combined with C-V and GVF[J]. *J. Northeastern University(Natural Science)*, 2013, 34(2):166-169. (in Chinese)
- [11] 张倩,黄江华,张荣,等. 基于局部中值拟合 C-V 模型的 SAR 图像分割算法[J]. 中国科学技术大学学报,2012,42(1):52-59.
ZHANG Q, HUANG J H, ZHANG R, *et al.*. A SAR image segmentation algorithm based on local median fitting C-V model[J]. *J. University of Science and Technology of China*, 2012, 42(1):52-59. (in Chinese)

- [12] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature dependent speed; algorithms based on hamilton-jacobi formulation[J]. *J. Computational Physics*, 1988, 79(1):12-49.
- [13] MUMFORD D, SHAH J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems[J]. *Communication of Pure Applied Mathematics*, 1989, 42(5):577-685.
- [14] 王大凯, 侯榆青, 彭进业. 图像处理的偏微分方程方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WANG D K, HOU Y Q, PENG J Y. *Partial Differential Equation in Image Processing*[M]. Beijing: Science Press, 2008.
(in Chinese)

作者简介:



张艳超(1985—),女,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2007年、2009年分别于天津大学获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理及调焦控制方面的研究。E-mail: zhangyanchaomn@126.com



赵建(1967—),女,吉林长春人,硕士,研究员,博士生导师,1991年于吉林工业大学获学士学位,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事数字图像处理、目标识别与跟踪、视频编解码等方面的研究。E-mail: zhaojian6789@126.com