改进 CV 模型在高分辨率遥感影像分割中的应用*

许文宁'梅树立'王鹏新'杨 勇2

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

【摘要】 针对遥感图像的特点及分割要求给出了一种 CV 简化模型,并对改进模型的正确性进行了实验验 证。实验结果表明,该方法不但提高了运算速度,而且能够得到连续封闭的目标地物矢量数据,因此可方便地利用 分割边界的几何特征实现地物目标的精确识别。

关键词: 遥感图像 区域分割 CV 模型 应用 中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0180-04

Improved Chan – Vese Model and Its Application on High Resolution Remote Sensing Image Segmentation

Xu Wenning¹ Mei Shuli¹ Wang Pengxin¹ Yang Yong²

College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
 Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

An improved CV model was presented according to the characters and the segmentation requirements of the remote sensing images. The correctness of the improved model was validated by the experiment. The results show that the new method can improve calculation efficiency effectively. Beside this, a continuous and closed boundary curve of the target objects can be obtained at the same time. Therefore, the land cover can be identified precisely with the help of the geometrical characteristic of the segmentation boundary.

Key words Remote sensing image, Image segmentation, CV model, Application

引言

遥感影像分割是地物类型识别和分类的基础。 经典的图像分割方法大致可以分为边缘检测法^[1-2]、阈值分割法^[3]和区域分割法。边缘检测法 和阈值分割法是以像素为基元的图像分割方法,不 能充分反映像素的空间信息和其邻域像素的相关信息,无法形成连续、封闭的目标边界。区域分割 法^[4-6]如区域生长法、聚类分割法以及近年来发展 起来的变分法等通过利用区域间的不连续性搜索区 域边界,能够得到较为精确和连续、封闭的目标边 界,但计算过程比较复杂,可能出现过度分裂或者过 度合并的情况。 CV 模型是 Chan - Vese 提出的一种基于区域信息的水平集图像分割方法^[7-8],它充分利用了偏微分方程 PDE 作为数值分析方法与技术手段,可以对任意复杂的形状进行模型化,能够隐形解决拓扑形状的分裂、合并等拓扑变化问题,计算精度高且算法稳定,被广泛应用到图像分割领域。CV 模型是通过驱动目标物边界内外点对应的水平集函数值向相反的方向变化,这样,边界内外点对应于水平集上两点的连线和零水平集平面的交点被认为是边界轮廓上的点。因此一个水平集函数可以将图像分为目标和背景两相。Vese 和 Chan 在 CV 模型基础上进一步提出了图像分割的多相水平集框架^[9]。该框架采用 n 个水平集函数可实现 2"相图像的分割,并在生

收稿日期:2010-10-21 修回日期:2010-11-08

^{*} 国家自然科学基金资助项目(60772038)和中国农业大学基本科研业务费研究生科研创新专项资助 作者简介:许文宁,博士生,主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究,E-mail: xuwenning@ sohu.com

通讯作者:梅树立,副教授,主要从事计算力学研究,E-mail: meishuli@163.com

物图像分割中得到应用^[10]。当然,计算量也相应增 大。大多数生物图像是灰度值不同的多目标物构成 的多相图,但图像分割的目的常常是提取某一目标 物,不需要所有的目标物都分割出来。采用水平集 框架不但增加计算量,而且还需要从分割出的众多 目标物中甄选需要的目标物;采用单一水平集函数 分割出的目标物往往不是需要的对象。Chan^[11]等 已经指出,由于 Heaviside 函数引入,使得 CV 模型 所对应的泛函是非凸的,这就导致泛函的极值不是 唯一的,Chan 同时给出了一种求全局极值的方法。 目前国内的研究主要集中在多相 CV 模型的改进和 应用领域。

事实上,CV 模型的求解一般都归结为非线性偏 微分方程的求解,目前大多采用迭代法,因计算量大 而影响了该方法的推广使用。本文针对遥感图像的 特点及分割要求,提出一种快速 CV 模型计算方法, 简化和改进能量函数方程,给出一种基于改进能量 函数的 CV 模型。

1 CV 模型

CV 模型是水平集图像分割方法的一个经典分 割模型,运用水平集方法是将区域分割、边缘检测等 结合到一起,且不需要任何先验知识,完全是由图像 数据驱动实现最优分割,能够检测出内部空洞,处理 边缘比较模糊的图像轮廓。

CV 模型的基本形式为

$$E^{CV}(c_{1}, c_{2}, C) = \lambda_{1} \int_{\Omega_{1}} (I_{0} - c_{1})^{2} dx dy + \lambda_{2} \int_{\Omega_{2}} (I_{0} - c_{2})^{2} dx dy + v |C|$$
(1)

其中

$$c_i = \operatorname{mean}_{\Omega_i}(u_0) = \frac{\int_{\Omega_i} u_0(x, y) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y}{\operatorname{Area}(\Omega_i)} \quad (i = 1, 2)$$

式中 λ_1 和 λ_2 为常数, c_1 和 c_2 是边界内(Ω_1)外

 (Ω_2) 区域图像的平均灰度值, I_0 为遥感图像函数, |C|为边界曲线 C 的长度,v 是对应的权重参数。若 采用水平集方法求解,可以将边界曲线 C 嵌入到水 平集函数中 $\phi(x,y)$,即: $C = \{(x,y) \mid (x,y) \in \Omega, \phi(x,y) = 0\}$; $\Omega_1 = \{(x,y) \mid (x,y) \in \Omega, \phi(x,y) > 0\}$; $\Omega_2 = \{(x,y) \mid (x,y) \in \Omega, \phi(x,y) < 0\}$ 。 这样,基于水平集的 CV 模型可表示为

$$E^{CV}(c_1, c_2, C) = \lambda_1 \int_{\Omega} |I_0 - c_1|^2 H(\phi) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y + \lambda_2 \int_{\Omega} |I_0 - c_2|^2 (1 - H(\phi)) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y + v \int_{\Omega} |H(\phi)| \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y$$
(2)

其中 Heaviside 函数 $H(\phi) = \begin{cases} 1 & (\phi \ge 0) \\ 0 & (\phi < 0) \end{cases}$ 对 CV 模型进行变分,得到的关于 ϕ 的偏微分方程(Euler – Lagrange 方程)为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta_{\varepsilon}(\phi) \left(v \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) - \lambda_{1} |I_{0} - c_{1}|^{2} + \lambda_{2} |I_{0} - c_{2}|^{2} \right)$$
(3)

其中 Dirac 函数 $\delta_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\pi(\varepsilon^2 + \phi^2)}$ 。

 $\delta_{s}(\phi)$ 的作用是抑制水平集函数的过快增长。求解 式(3)得到 t 时刻的水平集函数 $\phi(x,y,t)$ 是一空间 曲面,取 $\phi(x,y,t) = 0$ 得到的等高线称为零水平集, 零水平集就是目标边界曲线。

2 改进的 CV 模型

前已述及,CV 模型是一种基于区域能量函数的 图像分割模型,除水平集函数 φ 的曲率外,其他项 与图像的边缘信息无关。经变分处理后,模型的求 解最终可归结为非线性偏微分方程的求解。目前, 非线性偏微分方程的求解主要借助于迭代法,因计 算量大而抑制了该方法的使用。

展开 CV 模型中的散度项可以得到

$$\frac{\phi^{(2,0)}(x,y,t)(\phi^{(0,1)}(x,y,t))^{2} + \phi^{(0,2)}(x,y,t)(\phi^{(1,0)}(x,y,t))^{2} - 2\phi^{(0,1)}(x,y,t)\phi^{(1,0)}(x,y,t)\phi^{(1,1)}(x,y,t)}{(\phi^{(0,1)}(x,y,t))^{2} + ((\phi^{(1,0)}(x,y,t))^{2})^{3/2}}$$

 $\operatorname{div}\left(\frac{\nabla\phi}{\nabla\phi}\right) =$

显然,该散度项是关于水平集函数 \(\phi\)的曲率。 它和边界内外图像灰度平均值构成了分割边界动态 变化的驱动项。该散度项的作用是加速图像边界曲 线曲率较大处水平集函数的变化,即使分割边界在 细微处更加精确。在复杂的生物图像分割时,这点 非常重要,但遥感影像分割关注的恰恰不是细节,区 域的划分更为重要。因此可以考虑忽略曲率对遥感 影像地物分割的影响。即取散度项的权重参数 v 为 零,同时将水平集函数关于参数 t 的偏导数近似表 示为差分形式,这样,式(3)可写为

$$\frac{\phi_{t} - \phi_{t-\Delta t}}{\Delta t} = |I_{0} - c_{2}|^{2} - |I_{0} - c_{1}|^{2}$$
(5)

(4)

(6)

进一步改写为
$$\phi_i = (|I_0 - c_2|^2 - |I_0 - c_1|^2)\Delta t + \phi_{i-2}$$

相对于式(3),式(6)避免了关于水平集函数的导数 的求解,计算量大幅度减小,从而基于 CV 模型的图 像分割效率得到有效提高。

3 实验结果与分析

3.1 改进模型与原始模型的对比

为了验证改进模型的正确性,选取昌平地区的 SPOT5影像(200×200像素)进行分割对比实验,地 表覆盖了山区、居民地、农田等类型,采用 CV 模型 进行变分分割结果如图1所示。



图 1 改进模型与原始模型图像分割结果对比 Fig. 1 Segment comparison of the improved model and the original model (a)改进模型 (b) 原始模型

图 1 显示了改进前后 CV 模型遥感图像分割的 结果,从图中不难看出,改进后的模型不但能够较成 功地将各种地物轮廓以连续封闭的区域分割出来, 而且地物边界的细节部分也很好地显示出来,与改 进前的分割结果基本相同。图1从时间复杂度来分析,改进后的模型时间复杂度由 O(n²)降低为 O(n),计算效率得到很大提高,该方法尤其适合于 较大遥感图像的分割。

3.2 改进模型在遥感影像地物目标分割中的应用

实验数据选取北京昌平地区的 SPOT5 遥感图 像,成像时间为 2007 年 10 月 16 日,轨道号 23,条带 号/行编号:280/269。SPOT5 有 Ms1 近红外(0.78 ~ 0.89 μm)、Ms2 红(0.61 ~ 0.68 μm)、Ms3 绿(0.50 ~ 0.59 μm)3 个多光谱波段(10 m 分辨率),Ms4 短 波红外(1.58 ~ 1.75 μm,20 m 分辨率)波段和一个 全色波段(0.48 ~ 0.71 μm,2.5 m 分辨率)。实验 选用的图像纹理为最丰富的全色波段,并在原始 图像上裁取了农田、居民地、厂房和道路等典型地 物覆盖类型的子图像进行实验,大小均为 500 × 500 像素。

为提高分割速度,在进行遥感图像分割之前,将 3幅不同地物类型的 SPOT5 图像进行平滑处理,图 像边缘用连续的曲线表示,并根据图像信息构造能 量函数,能量函数的自变量之一是边界轮廓曲线;利 用 Euler - Lagrange 方程得到相应的曲线演化方程; 最后应用水平集方法模拟初始曲线演化过程,求得 最佳目标边界轮廓。

实验选取3种不同的地物覆盖类型,如图2所示。类型一主要是农田、道路、居民地、厂房等地物 类型,地物类别较为复杂;类型二主要是山区和道路



图 2 不同地面类型的 CV 模型分割结果 Fig. 2 CV segmentation of different land coverings (a) 类型一 (b) 类型二 (c) 类型三 (d) 图 2a 的分割结果 (e) 图 2b 的分割结果 (f) 图 2c 的分割结果 的地物类型,地物类别较为单一;类型三基本上为农 田和居民地覆盖类型。图 2a 对应的分割结果如 图 2d所示,分割结果没有受农田纹理的影响,将道 路和建筑物从农田中有效地分割出来。同样,图 2e 是图 2b 的分割结果,道路边界封闭连续,但中间有 间断。这是由于道路图像局部梯度值不明显所造成 的,任何一种算法都会出现这种现象,但是变分法得 到的不连续边界都是矢量信息,显然有利于利用人 工智能手段将间断的地物目标合并。图 2f 显示图 像下方的大块农田被完整的分割出来,道路的边界 也十分明显,但建筑物区域的分割并不理想,多种多 样的建筑风格和色彩使建筑群落的区域边界被忽 略,细节却显得突出,影响了分割的合理性。但矢量 分割边界有利于使用人工智能手段识别地物类型, 因此为实现这些破碎封闭分割边界的合并奠定了基 础。以上实验表明,该模型是一种具有前景的遥感 影像分割新方法,分割结果可以初步满足遥感图像 分割需要,该方法存在的问题借助于人工智能手段 也可以得到解决。

4 结束语

基于改进 CV 模型的图像变分分割方法在图像 分割领域具有较强的技术优势,遥感图像中地物具 有一定的几何特征、辐射特征、拓扑特征,水平集凭 借优越的处理拓扑变化能力,通过建立相应的能量 函数实现纹理分割,能够得到一个连续、闭合的分割 区域目标。研究结果表明:该模型对道路和大块农 田的分割效果较好,边缘和纹理被分割得较为清晰; 尽管建筑物分割结果较为破碎,但其矢量化的封闭 分割边界很容易结合人工智能手段得到理想的分割 效果。该模型从总体上有助于高分辨率遥感图像的 分割,能够清晰反映大多数地物轮廓。

参考文献

- 刘永学,李满春,毛亮.基于边缘的多光谱遥感图像分割方法[J].遥感学报,2006,10(3):351~352.
 Liu Yongxue, Li Manchun, Mao Liang. An algorithm of multi-spectral remote sensing image segmentation based on edge information[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3):351~352. (in Chinese)
- 2 沈明霞,张瑞合,姬长英.农作物边缘提取方法研究[J].农业机械学报,2000,31(6):49~51. Shen Mingxia, Zhang Ruihe, Ji Changying. Study on extracting edge of cropland scenery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6):49~51. (in Chinese)
- 3 韩思奇,王蕾. 图像分割的阈值法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 91~94. Han Siqi, Wang Lei. A survey of thresholding methods for image segmentation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(6): 91~94. (in Chinese)
- 4 陈忠,赵忠明.基于区域生长的多尺度遥感图像分割算法[J].计算机工程与应用,2005,41(35):7~9.
 Chen Zhong, Zhao Zhongming. A multi-scale remote sensing image segmentation algorithm based on region growing [J].
 Computer Engineering and Applications, 2005, 41(35): 7~9. (in Chinese)
- 5 Ma H, Yang Y. Two specific multiple-level-set models for high-resolution image classification [J]. IEEE Journal on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3): 558 ~ 561.
- 6 程承旗,马廷. 高分辨率卫星影像上地物线性特征的自动识别[J]. 遥感学报,2003,7(1):26~30. Cheng Chengqi, Ma Ting. Automatic recording of landscape linear features from high-resolution satellite images[J]. Journal of Remote Sensing, 2003,7(1):26~30. (in Chinese)
- 7 钱芸,张英杰.水平集的图像分割方法综述[J].中国图象图形学报,2008,13(1):7~12. Qian Yun, Zhang Yingjie. Lever set methods and its application on image segmentation[J]. Journal of Image and Graphics, 2008,13(1):7~12. (in Chinese)
- 8 Chan T F, Vese L A. Active contours without edges [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10 (2): 266 ~ 277.
- 9 Vese L A, Chan T F. A multiphase level set framework for image segmentation using the Mumford and Shah model [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 50(3): 271 ~ 293.
- 10 Chan T F, Vese L A. Image segmentation using level sets and the piecewise constant Mumford Shah model[J]. Journal of Computational Mathematics, 2006, 24 (3): 435 ~ 443.
- 11 Chan T F, Esedoglu S, Nikolova M. Algorithms for finding global minimizers of image segmentation and de-noising models [R]. Los Angeles: University of California Los Angeles, 2004.