

交互式遥感影像分割算法研究

田 力¹ 张晓盼¹ 袁艳斌¹

¹ 武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉,430070

摘 要:针对传统算法过于强调机器推理等弱点,将基于元胞自动机分割图像的思想移植到 GIS 平台上,为解决遥感影像分割问题的一种新思路,实现了基于元胞自动机的遥感影像分割算法。这一分割方法将人的判断融入分割过程中,有着很强的灵活性。

关键词:遥感解译;面向对象;影像分割;元胞自动机
中图分类号:P237.3;TP751 文献标志码:A

图像分割是图像处理的一个重要研究内容,在计算机视觉、目标识别和遥感影像处理等方面具有重要的应用价值^[1]。有关遥感影像的研究中,影像分割是面向对象遥感影像分类思想应用于遥感影像信息自动提取的基础^[2]。

元胞自动机是由冯·诺依曼(Von Neumann)在上个世纪 40 年代首先提出的一种离散模型^[3]。具体说来,元胞自动机是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上的,按照一定局部规则,在离散的时间维上演化的动力学系统^[4]。其重要意义在于可以通过制定简单的局部演化规则,模拟复杂系统的局部简单演化进程,从而得到该系统的宏观演化效果^[5]。

目前比较流行的图像分割方法大致分为 4 类:基于阈值的分割、基于边缘的分割、基于区域的分割和基于特定理论的分割^[3,6-7]。不同的分割方法适用于不同的分割需求,但是它们共同的特点是过于强调机器推理,难以融入人的直觉判断,并且分割过程约束太强,难以根据实际需要差异化处理不同地类的最佳分割尺度不一致问题。文献^[8]于 2006 年提出将元胞自动机应用到多标签 N 维图像分割当中的分割方法。该方法的优势在于可以在分割运算的过程中实时观察图像分割效果,并通过简单的人工操作交互式地引导图像

分割进程。这种交互式的分割方法满足遥感影像分割问题的主要特征,与传统的分割方法相比有着很强的灵活性。本文借鉴该思路实现了基于元胞自动机的遥感影像分割,并对分割算法进行了相关的研究。

1 算法原理

1.1 算法元胞自动机模型

利用元胞自动机进行遥感影像分割,主要是对影像分割问题建立恰当的元胞自动机模型。对于一张 $k \times m$ 大小的遥感影像,可以将其看作一个二维像元数组,对其进行元胞自动机建模,元胞自动机空间即由影像大小 $k \times m$ 确定。

遥感影像分割问题的元胞自动机模型可表示为:

$$A = (S, N, \delta) \quad (1)$$

式中, A 是整个元胞自动机系统; S 是一个非空状态集合; N 表示邻域系统; $\delta: S_n \rightarrow S$ 是局部转化函数,已知某元胞第 t 步时邻域元胞的状态,则此函数定义了该元胞第 $t+1$ 步状态的计算规则。

模型中,元胞 p 的状态 S_p 用一个三元组 (l_p, θ_p, C_p) 表示。其中, l_p 是当前元胞的标签,用于表示对应像元对应的目标对象; θ_p 是元胞的强度,范

收稿日期:2013-02-15

项目来源:国家自然科学基金资助项目(60904073);湖北省自然科学基金资助项目(2012FFB05111);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011-IV-094)。

第一作者:田力,硕士生,主要从事地理信息系统研究。E-mail:a2722863@hotmail.com

围为 $[0, 1]$,其在元胞局部转化过程中起到十分重要的参数作用; C_p 是元胞的特征向量,由影像像元本身决定。元胞自动机的初始状态设定为:

$$l_p = 0, \theta_p = 0, C_p = (B_1, B_2, B_3, \dots)$$

式中, B_i 表示像元 p 的第 i 个波段的值。影像分割开始前由人工标记种子像元,赋予对应种子元胞指定的 l 和 θ 初始值;影像分割的最终目标是为每一个元胞分配一个正确的标签 l ,从而指示分割后每个像元所属的对象。

本文所采用的元胞自动机的邻域系统为 Von Neumann 邻域:

$$N(p) = \{q \in Z^n : \|p - q\|_1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i| = 1\} \quad (2)$$

元胞自动机的局部转化规则 δ 是元胞演化的依据,元胞 p 的转化应考虑两个因素:① p 和周围元胞特征向量之间的关系,这反映了 p 与周围元胞的“相似”程度(特征向量越接近,则认为它们越相似);② p 和周围元胞的强度之间的关系,强度的大小表明元胞“倾向于”属于当前标签的对象的程度。元胞转化规则用伪码表示如图 1 所示。

```

//对于每个元胞
for p ∈ P
  //复制先前的状态
  lp+1 = lp;
  θp+1 = θp;
  //邻域尝试攻击当前元胞
  for q ∈ N(p)
    if g(||Cp - Cq||2) · θq > θp
      lp+1 = lq;
      θp+1 = g(||Cp - Cq||2) · θq
    end if
  end for
end for

```

图 1 元胞演化规则

Fig. 1 Automata Evolution Rule

图 1 中, g 是一个单调递增函数,表示元胞之间的“相似”程度,取值范围是 $[0, 1]$,函数表达式如下:

$$g(x) = 1 - (x / \max \|C\|_2) \quad (3)$$

对于上述局部演化的过程可用图 2 表示。图 2(a)为演化前局部状态;图 2(b)为元胞被其邻域元胞“攻击”的演化进程,其中占领与否取决于元胞的强度 θ 和元胞之间的相似程度 g ;图 2(c)为元胞被占领后的情况,占领后元胞标签和元胞强度 θ 都会发生改变。

1.2 分割原理的仿生学解释

可以用一个生物学的比喻来为图 1 中的伪代

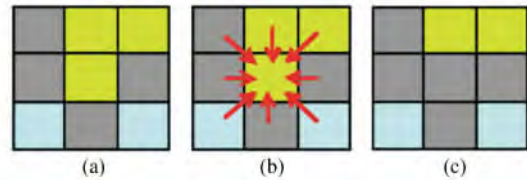


图 2 元胞演化示意图

Fig. 2 Automata Evolution Schematic Diagram

码作直观的解释:把像元标记的过程看作 k 种细菌演化和斗争的过程。细菌从种子像元开始演化,其演化和竞争的规则为:每一步每一个元胞都尝试“攻击”它的邻域。攻击的强度由攻击元胞的强度和二者之间的特征向量共同决定。如果进攻元胞的攻击强度大于防守元胞的强度,防守元胞就会被“征服”,它的标签和强度都会发生变化。这种局部竞争的结果是最强大的细菌占领邻域范围并逐渐扩散到整个图像。这也就是元胞自动机系统分割遥感影像的过程。计算过程一直持续到元胞自动机进入稳定状态,此时元胞状态停止变化,遥感影像分割完成。

元胞自动机在遥感影像分割的应用中的特点可表述为通过模拟影像像元之间局部的简单“攻击”和“占领”行为,实现影像宏观上的分割效果。元胞自动机演化的宏观图像分割效果见图 3,图 3(a)为演化进行的早期表现,图 3(b)为演化完成时的影像分割效果。

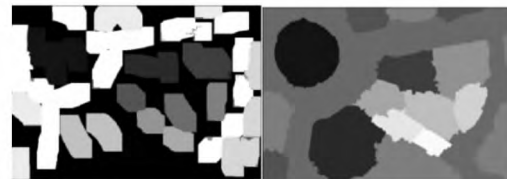


图 3 元胞演化的宏观效果

Fig. 3 Macro Economic Effects of Automata Evolution

Fig. 3 Macro Economic Effects of Automata Evolution

1.3 算法运行效率

目前常用算法复杂度来估计算法运行效率,分为时间复杂度和空间复杂度。本文中,在一步演化时,算法的时间复杂度为 $O(n)$,即与数据量 n 成线性比例相关。由于演化只通过邻域之间的相互作用实现,所以算法的空间复杂度为 $O(1)$ 。

由于算法运行效率与元胞演化次数(即迭代次数)直接相关。因此评价算法的运行效率还要关注完成一次完整的分割的迭代次数,将在 § 2.5 讨论。

2 算法实现和测试

2.1 算法实现

本文算法的实现选用 C# + ArcEngine 组件进行二次开发。算法实现的主要功能为:实现元胞自动机演化的核心内容——即根据上述元胞演化规则,定义元胞自动机局部转化函数,模拟元胞

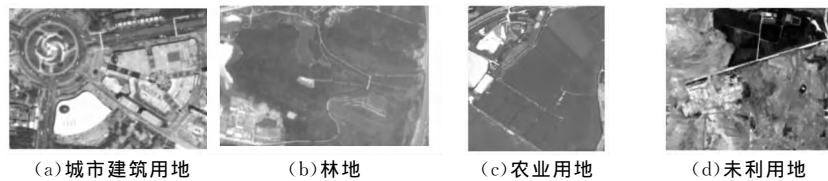


图4 测试用影像数据

Fig. 4 Remote Sensing Images for Test

2.3 算法分割效果测试

算法有人工交互的特性,理论上说可以达到完美的分割效果。但是过多的交互性操作会使得系统失去其自动分割的意义,因此本节测试算法自身的分割能力,不通过人工交互式操作影响分割进程。最终的分割结果见图5。

从遥感影像的分割结果可以看出,在城市建筑用地的遥感影像中,不同建筑物、街道的特征都比较明显,即不同地物之间的光谱信息差异较大。此时用户对地物的标记代表性更强,简单的标记即可区分出不同的地物。而在林地和农业用地的遥感影像中,不同地物的光谱特征十分相似,系统对不同物体的分割主要依赖的是地物之间的分界线识别。在未利用地的遥感影像分割中,出现一定错误的原因是未利用地的范围很大,且其内部光谱特征差异大,少量的“种子”元胞对该区域的代表性不够,利用算法交互性的优势可以得到更好的分割效果。



图5 遥感影像分割结果

Fig. 5 Segmentation Results of Remote Sensing Image

自动机演化过程,使各元胞获得相应的标签。

2.2 测试数据准备

原始数据为2011年武汉市光谷地区的遥感影像数据,影像分辨率为2 m,共4个波段。为测试针对不同用地类型的遥感影像的处理效果,共选取4个不同用地类型的影像数据,分别为城市建筑用地、林地、农业用地、未利用地。详细信息见图4。

2.4 交互式分割测试

交互式分割的功能是基于元胞自动机的遥感影像分割方法的重点和主要优势之一。下面分别使用 ENVI 和本文的分割算法对同一张遥感影像进行分割,对比二者的分割结果。

2.4.1 数据选择

本次测试切割新的影像数据作为测试用数据,其中待分割物体包含建筑物、街道、水体和绿地,具体影像如图6所示。

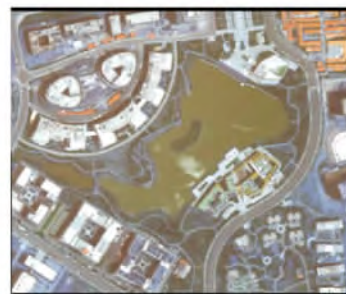


图6 交互式分割测试数据

Fig. 6 Data for Interactive Segmentation Test

2.4.2 ENVI 软件的参数选择及分割效果

ENVI 软件在对遥感影像进行分割时,有两个可变参数调节分割效果的尺度:分裂级别(scale level)和合并级别(merge level)。本文将分裂级别设为55,合并级别设为85,执行分割得到最终结果见图7。

2.4.3 利用元胞自动机的分割算法交互式分割

利用本文中的影像分割算法进行分割,首先得到根据初始标记的分割效果如图8(a)所示,接下来通过人工增加标记引导分割进程,最后的分割效果如图8(b)所示。由图8可知,自动分割效



图 7 ENVI 软件分割结果

Fig. 7 Segmentation Result of ENVI

果的水体边界不如交互方法准确。

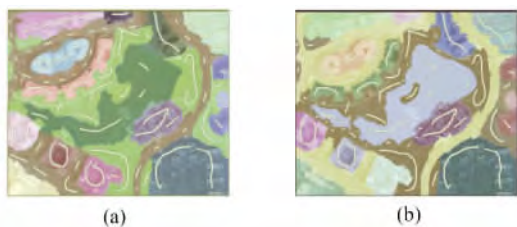


图 8 交互式分割效果

Fig. 8 Segmentation Result of Interactive Segmentation

2.4.4 对比分析

用 ENVI 和本文的分割系统均完成了该影像的分割,二者均可以达到预期的分割效果。通过对比图 7 和图 8 可以看出,ENVI 软件在实现影像分割时,将很多原本不需要分割的物体(图 7 中大部分完整的建筑物)分割成了很多小块。这种过度分割的现象是由于 ENVI 的分割过程完全由计算机实现,不得不进行多余的分割来得到满足要求的边界而造成的。

而本文的算法在实现分割的过程中加入了人工的交互式引导——即在精度要求不高、只需提取出地物轮廓的区域(如建筑、绿地、道路)由算法自动计算,而在需要精细分割的区域适当添加人工操作调整元胞演化计算进程。从分割结果中可以明显看出:通过简单的人工标记修正了水体区域系统自动分割的结果,在同一张遥感影像上实现了不同分割尺度的分割效果。这一交互式的分割使得整个遥感影像的分割过程更加灵活和人性化。

2.5 演化次数测试

由于分割算法是基于元胞自动机进行的,而元胞自动机的演化进程是一个迭代的过程,因此算法的分割效率直接依赖于元胞自动机的演化次数。下面将对系统遥感影像分割进程中不同演化次数时的元胞变化率进行统计,从而分析演化不同阶段的特点。

2.5.1 数据选择

影响元胞自动机演化的关键因素是人工对种子元胞的标记和影像自身的波段信息。因此为探究不同用地类型的遥感影像对演化情况的影响,仍然选用图 4 中 4 种不同用地类型的遥感影像数据作为实验数据。分割的进程由算法自动完成,不进行人工交互式操作。

2.5.2 测试结果

统计元胞自动机在每次演化中的变化率,4 种用地类型的元胞变化率随着演化次数变化的情况如图 9 所示。

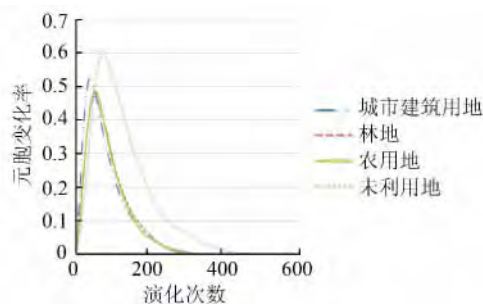


图 9 演化次数与元胞变化率的关系

Fig. 9 Relationship Between the Number of Evolution and the Cellular Change Rate

由图 9 中 4 种不同类型的分割进程对应的元胞变化率统计图可以看出,对不同用地类型的遥感影像进行分割时,元胞自动机的演化表现出很强的规律性:① 曲线在开始阶段均快速上升。4 种不同的用地类型的曲线均在演化的第 50 步左右达到峰值;② 整个演化过程中元胞状态在经过初期的大规模变化之后,曲线迅速进入衰减阶段,元胞变化率迅速降低、演化逐渐停止,一般情况下总的迭代次数在 400 次左右。

3 结 语

基于元胞自动机的遥感影像分割算法整体上是简单的手动标记,完成遥感影像的分割任务的过程。将这一分割方法应用于遥感影像分类中时的优势有:

- 1) 通过简单的人工操作,可以将人的分类判断加入到分类过程中,达到真正的交互式引导效果;
- 2) 可以根据实际需要实现不同区域内异质性的多尺度分割;
- 3) 由于系统的分割过程是基于标记实现的,所以当标记种子像元指定的是对应类别时就可以在分割的同时进行分类。

此外,元胞自动机的演化有着明显的规律性,

表现在演化初期元胞变化率迅速上升,到达峰值后呈衰减趋势直至演化停止,在这一过程中初始的种子元胞的特点对峰值的大小、达到峰值所需的演化次数有着明显的影响。

在以后的研究当中,应尝试优化局部分割规则,使算法通过更少的标记获得更好的分割效果。算法的演化特点决定了影像分割的进程往往不需要等到元胞自动机的局部演化完全结束,在演化到一定程度时即可得到理想的分割效果,因此在本文中对元胞自动机演化情况的研究可以作为后续增加算法自适应选择适当演化次数的参考。此外,还可以考虑将交互式分割的优势与其他分割方法相结合,在通过其他影像分割方法进行粗糙分割后,使用本系统的交互式分割功能对分割结果进一步优化。

参 考 文 献

- [1] Gonzalez R C. Digital Image Processing Using MATLAB[M]. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007(冈萨雷斯·理查德. 数字图像处理[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2007)
- [2] Lin Xiaoping, Mao Zhengyuan, Liu Jianhua. Texture-based Segmentation for Remotely Sensed Imagery[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(5): 31-34(林小平, 毛政元, 刘建华. 纹理特征遥感影像分割研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(5): 31-34)
- [3] Sun Zhanli. Spatial Complexity Analysis and a Geographical Model Based on Cellular Automata(GEO-CA)[J]. *Geo-Information Science*, 1999, 2: 32-37(孙战利. 空间复杂性与地理元胞自动机模拟研究[J]. 地球信息科学, 1999, 2: 32-37)
- [4] Xie Huimin. Complexities and Dynamical Systems[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Publishing House, 1994(谢惠民. 复杂性与动力系统[M]. 上海:上海科技教育出版社, 1994)
- [5] Wolfram S. Cellular Automata as Models of Complexity[J]. *Nature*, 1984, 311: 419-424
- [6] Chen Yunhao, Feng Tong, Shi Peijun, et al. Classification of Remote Sensing Image Based on Object Oriented and Class Rules[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(4): 316-320(陈云浩, 冯通, 史培军, 等. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(4): 316-320)
- [7] Mei Tiancan, Li Deren, Qin Qianqing. Extraction of Linear Feature from Remote Sensing Image Based on Watershed Transform[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(4): 338-341(梅天灿, 李德仁, 秦前清. 分水岭变换在遥感影像线状特征提取中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(4): 338-341)
- [8] Vezhnevets V, Konouchine V. "GrowCut"-Interactive Multi-label N-D Image Segmentation By Cellular Automata[C]. The 15th International Conference on Computer Graphics and Applications, Russia, 2005

Interactive Remote Sensing Image Segmentation Algorithm

TIAN Li¹ ZHANG Xiaopan¹ YUAN Yanbin¹

¹ College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: The segmentation of the remote sensing image, which has important meaning, is the main step of remote sensing image processing. There are a lot of researches focusing on this issue and someone has already proposed some common methods. These methods have their advantage and fields of application, but most of them emphasize computer calculation too much. We translate the idea of image segmentation based on cellular automata into the GIS platform as a new method to handle remote sensing image segmentation, implementing the Remote Sensing Image Segmentation Algorithm based on Cellular Automata. This segmentation method blends human judgment in the process of segmentation and is very flexible.

Key words: remote sensing interpretation; object-oriented; image segmentation; cellular automata

First author: TIAN Li, postgraduate, majors in GIS.

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 60904073; the Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2012FFB05111; the Fundamental Research Funds for the Central University, No. 2011-IV-094.