

应用模糊逻辑图像分割方法的分析与研究

郑肇葆¹ 潘 励¹ 郑 宏²

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学电子信息学院,湖北 武汉,430079

摘 要:将模糊逻辑中隶属度函数的概念应用到图像分割中,改变现有分割方法中由一个分割阈值决定一个像元属于哪个类别的问题,而由在一定范围内的隶属度函数值来决定像元的类别,这种方法称为模糊逻辑图像分割方法(FLIS)。通过对真实航空影像的图像分割实验,同时将实验结果与现有方法作了对比,结果表明 FLIS 方法具有明显的优势。

关键词:模糊逻辑;图像分割;隶属度函数

中图法分类号:P231.5

文献标志码:A

图像分割是数据聚类的一种形式,数据聚类的目的是使聚类内部的连通性、紧致性趋于最大;而类间的连通性或紧致性达到最小^[1]。对于图像分割,根据采用不同的分割方法,事先定义一个判别函数,把图像特征相似的像元划分在一个类别中,经过不断的演化处理,最后获得分割图像。例如在“化学反应优化(CRO)图像分割^[2]”和“生物地理学优化(BBO)图像分割^[3]”中都是采用这样的判别函数:像元特征值减类别特征的均值的绝对值大于 2σ 或 3σ (σ 为某聚类图像特征的标准差)时,该像元应从当前类别中分离出去,否则保留。目前的图像分割方法大多是采用类似上述方法完成的,采用判别函数的方法都涉及一个阈值选定的问题(阈值选用 2σ 还是 3σ)。以往研究中常遇到用 2σ 作阈值的分割质量比用 3σ 的好的情况,但有时会得到相反的结果。这说明用简单阈值的办法,在优化过程中不一定都能得到最优的结果。因为在客观世界中,不同类别之间可能存在一定的重叠,并非简单划分就能把两个类别划分清楚。在实际情况中,往往难以确定一个目标属于某个类别而不是其他类别的成员,由此引出模糊聚类的概念。在这个概念中,允许一个目标(或像元)同时是几个聚类区域的成员,但是带有不同的隶属度,涉及到这样概念的目标聚类(或分割)称之为模糊聚类(分割)^[1,3-4]。这样的聚类(分割)更符合实际情况,因为它不强迫一个目标仅属

于一个聚类,而是给它指派一个 $[0,1]$ 区间内的一个隶属度,隶属度指出一个目标属于不同聚类区域部分成员的程度。本文的目的就是研究对比 FLIS 分割结果与现有分割方法的效果。

1 基于模糊逻辑图像分割(FLIS)原理

基于 FLIS 的基本思想是:先将一幅图像按某一图像特征(本文采用分形维特征)^[5]构造分形维特征的直方图,按直方图的特征分布将原图像分成三个像元数目大致相同的区域,作为初始划分区域。对每个区域分别计算各自的特征均值 c_r ($r=1,2,3$);接着计算每个区域中每个像元的特征值 $x_1(i,j)$ 、 $x_2(i,j)$ 、 $x_3(i,j)$ 与每个区域特征均值 c_r 的差异 $d_{1r}(i,j)$ 、 $d_{2r}(i,j)$ 、 $d_{3r}(i,j)$;再求每个区域中每个像元相对三个区域的隶属度 $u(i,j)$ 。 $u(i,j)$ 最大等于 1,最小为 0,数值越大表明该像元属于某个区域的可能性越大;数值越小,该像元属于某个区域的可能性越小。对隶属度 $u(i,j)$ 设定两个阈值 k_1 和 k_2 , $u(i,j) \geq k_1$ 的像元应留在本区域中, $u(i,j) \geq k_2$ 的像元应送入其他区域中,如此“留”在本区域和“送入”其他区域的处理过程是个演化迭代过程,直到再无“留下”或“送入”像元为止,或迭代次数达到预先设定的数值为止。

收稿日期:2013-04-05

项目来源:高等学校博士点专项基金资助项目(201101411110044)。

第一作者:郑肇葆,教授,博士生导师,主要从事摄影测量与遥感,图像分析与解译及进化计算应用研究。E-mail:zhengzb@whu.edu.cn

1.1 FLIS 的具体过程

1) 将一幅图像初步分成三个区域。

利用图像的分形维特征^[5]构建图像直方图,根据直方图,将图像划分成三个像元数近似相等的三个区域,用像元的特征值计算三个区域的特征均值 $c_r (r=1,2,3)$, r 表示区域编号。

2) 计算第一划分区域中每个像元特征值 $x_1(i,j)$ 与第 r 区域特征均值 c_r 的差异 $d_{1r}(i,j)$:

$$d_{1r}(i,j) = |c_r - x_1(i,j)|, \quad r = 1,2,3; \\ i, j = 1, \dots, n \quad (1)$$

式中, (i,j) 表示像元行编号 i 和列编号 j ; n 表示图像行和列中像元总数。类似地,求出第二、三区域中每个像元的特征值与第 r 个区域特征均值 c_r 的差异 $d_{2r}(i,j), d_{3r}(i,j)$:

$$\left. \begin{aligned} d_{2r}(i,j) &= |c_r - x_2(i,j)| \\ d_{3r}(i,j) &= |c_r - x_3(i,j)| \end{aligned} \right\} \\ r = 1,2,3; i, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

3) 分别计算每个区域中每个像元特征值 $x(i,j)$ 相对三个区域的隶属度^[4] $u_{1r}(i,j), u_{2r}(i,j)$ 和 $u_{3r}(i,j)$:

$$\left. \begin{aligned} u_{1r}(i,j) &= 1 / \sum_{k=1}^3 \left(\frac{d_{1r}(i,j)}{d_{kr}(i,j)} \right) \\ u_{2r}(i,j) &= 1 / \sum_{k=1}^3 \left(\frac{d_{2r}(i,j)}{d_{kr}(i,j)} \right) \\ u_{3r}(i,j) &= 1 / \sum_{k=1}^3 \left(\frac{d_{3r}(i,j)}{d_{kr}(i,j)} \right) \end{aligned} \right\} r = 1,2,3 \quad (3)$$

式中, $u_{1r}(i,j)$ 表示第一区域中每个像元特征相对于 $r=1,2,3$ 区域的隶属度; $u_{2r}(i,j)$ 表示第二区域中每个像元特征相对 $r=1,2,3$ 区域的隶属度; $u_{3r}(i,j)$ 表示上述类似定义。 $d_{1r}(i,j)$ 的意义与式(1)中相同。

由式(3)求得的隶属度 $u_{1r}(i,j), u_{2r}(i,j), u_{3r}(i,j)$ 分别满足以下条件^[4]:

$$\begin{aligned} u_{11}(i,j) + u_{12}(i,j) + u_{13}(i,j) &= 1 \\ u_{21}(i,j) + u_{22}(i,j) + u_{23}(i,j) &= 1 \\ u_{31}(i,j) + u_{32}(i,j) + u_{33}(i,j) &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

4) 根据第一区域中每个像元相对三个区域的隶属度 $u_{1r}(i,j)$, 确定哪些像元应当留在第一区域, 哪些应送入其他区域, 我们设定如下: ① $u_{11}(i,j) \geq 0.6$ 的像元留在第一区域; ② $u_{12}(i,j) \geq 0.45$ 的像元送入第二区域; ③ $u_{13}(i,j) \geq 0.45$ 的像元送入第三区域。

类似地, 根据 $u_{2r}(i,j)$ 和 $u_{3r}(i,j), r=1,2,3$ 确定第二、三区域中像元的“去”和“留”的问题。

5) 经过以上 4 个阶段的处理, 三个区域中的像元都经过一次演化处理, 实现一次像元相对三

个区域的重新划分, 称为完成一次演化迭代。

6) 返回到阶段 1), 重复以上过程, 执行新一轮的演化, 直到每个区域中再没有需要送到其他区域处理的像元为止, 或演化次数达到预先设定值为止。

1.2 FLIS 中综合特征的应用

在前面叙述的分割过程中仅使用了像元的单特征分形维, 在这里又引入两个特征: 影像的能量和灰度。因为上述三个特征的量纲不统一, 为使三个特征放在一起能作代数运算, 需做标准化处理, 即三套特征值都分别用各自的最大值去除, 就得到各自的标准化特征值; 每个像元可以得到 3 个标准化的特征 f_i (标准化分形特征)、 e_i (标准化能量特征)、 g_i (标准化灰度特征)、像元的综合特征 $s_i = f_i + e_i + g_i$; 有了每个像元的综合特征 s_i , 其他的计算工作与单特征相似, 详细情况参见文献[3]。

2 FLIS 的分析与思考

从前提到的 FLIS 的演化过程中, 每个区域中的像元都存在“留下”当前区域, 还是“送入”其他区域的问题。这是由像元特征值相对三个区域的隶属度 $u_{1r}(i,j), u_{2r}(i,j), u_{3r}(i,j)$ 决定的。本文研究表明, 确定留在当前区域的像元隶属度值应大于 0.5, 低于 0.5 的像元意义不大。送入其他区域的像元隶属度值应大于 0.4, 隶属度值过低的像元送入其他区域作用不大。在实验中, 留在当前区域的像元隶属度值定为大于等于 0.6, 送入其他区域的像元隶属度值定为大于等于 0.45。实验结果表明这样的阈值选取是合理的。根据隶属度的性质, 隶属度的值越大, 属于当前类别的可能性越大, 原则上选用 0.6 作为“留下”的阈值是恰当的, 送入其他区域的像元隶属度值不能太小。

本文实验中, 根据像元的隶属度, 留下在区间 $[0.6, 1]$ 内的像元, 在区间 $[0.45, 0.6)$ 的像元送入相应的其他区域中, 不像 CRO^[2]、BBO^[3] 图像分割演化过程中, 选择阈值 2σ (或 3σ), 像元特征值与聚类区域特征均值之差小于等于 2σ (或 3σ) 者, 留在当前区域中, 大于阈值的像元应送入其他区域中, 但是送入相应区域的像元特征值与该区域的特征均值之差小于阈值者, 才能留在相应区域中, 否则不能留下, 这与本文 FLIS 演化过程略有不同。

FLIS 演化过程中, 新一轮的各个区域的标准

差 σ 不一定比前一轮各相应区域的标准差 σ 小,这是由于 FLIS 不是用一个固定阈值确定一个像元的“去”和“留”,而是利用区间值 $[0.6, 1]$ 和 $[0.45, 0.6]$ 确定其去留而造成的,如表 1 所示,表 1 中 σ 单位为 10^{-2} 。

表 1 FLIS 中演化过程中部分数据

Tab.1 FLIS in the Evolution of the Partial Data

iter=0	$\sigma_1=6.812\ 9$	$\sigma_2=1.905\ 6$	$\sigma_3=3.550\ 1$
$\Sigma=8\ 463$	$ix_1=4\ 186$	$ix_2=2\ 319$	$ix_3=1\ 958$
iter=5	$\sigma_1=6.232\ 0\ \downarrow$	$\sigma_2=3.112\ 3\ \uparrow$	$\sigma_3=3.589\ 6\ \uparrow$
	$ix_1=2\ 654\ \downarrow$	$ix_2=3\ 799\ \uparrow$	$ix_3=2\ 019\ \uparrow$
iter=10	$\sigma_1=6.112\ 1\ \downarrow$	$\sigma_2=3.173\ 8\ \uparrow$	$\sigma_3=3.764\ 6\ \uparrow$
	$ix_1=2\ 332\ \downarrow$	$ix_2=3\ 835\ \uparrow$	$ix_3=2\ 296\ \uparrow$
iter=15	$\sigma_1=6.059\ 6\ \downarrow$	$\sigma_2=3.202\ 9\ \uparrow$	$\sigma_3=3.834\ 7\ \uparrow$
	$ix_1=2\ 205\ \downarrow$	$ix_2=3\ 846\ \uparrow$	$ix_3=2\ 412\ \uparrow$
iter=20	$\sigma_1=6.049\ 3\ \downarrow$	$\sigma_2=3.204\ 0$	$\sigma_3=3.852\ 8\ \uparrow$
	$ix_1=2\ 180\ \downarrow$	$ix_2=3\ 841$	$ix_3=2\ 442\ \uparrow$
iter=25	$\sigma_1=6.045\ 7\ \downarrow$	$\sigma_2=3.187\ 6\ \downarrow$	$\sigma_3=3.871\ 6\ \uparrow$
	$ix_1=2\ 171\ \downarrow$	$ix_2=3\ 818\ \downarrow$	$ix_3=2\ 474\ \uparrow$
iter=30	$\sigma_1=6.043\ 3\ \downarrow$	$\sigma_2=3.185\ 6\ \downarrow$	$\sigma_3=3.877\ 4\ \uparrow$
	$ix_1=2\ 165\ \downarrow$	$ix_2=3\ 814\ \downarrow$	$ix_3=2\ 484\ \uparrow$
iter=32	$\sigma_1=6.042\ 5\ \downarrow$	$\sigma_2=3.186\ 1$	$\sigma_3=3.878\ 5\ \uparrow$
	$ix_1=2\ 163\ \downarrow$	$ix_2=3\ 814$	$ix_3=2\ 486\ \uparrow$
iter=34	$\sigma_1=6.042\ 5$	$\sigma_2=3.186\ 1$	$\sigma_3=3.878\ 5$
$\Sigma=8463$	$ix_1=2\ 163$	$ix_2=3\ 814$	$ix_3=2\ 486$

注:iter 为演化迭代次数; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为三个区域像元特征的标准差; ix_1, ix_2, ix_3 为三个区域中特征值非零的像元个数; Σ 为三个区域非零像元总数。

从表 1 中数据可以看出:① 在分割演化计算过程中,每个区域内像元总数 ix_i 的值有增有减,随着像元数目的减少,相应区域的标准差 σ_i 随之减小;随像元数目的增加, σ_i 亦随之增大。表 1 中第二列的 σ_1 为减小,第三、四列的 σ_2, σ_3 为增大,如表 1 中箭头所示。② 在分割演化过程中,像元的“留下”、“送入”趋于稳定时,如表 1 中 iter=32 和 iter=34 的相应数据,其中标准差 σ_i 和像元总数 ix_i 不再产生改变,得到分割的最后结果。

3 实验与分析

为了验证 FLIS 的优越性,本文使用了已有图像分割方法采用的三幅航空影像(100 像元 \times 100 像元),如图 1 所示,便于对比分析比较^[2-3,6]。为了作出定量评价,在 Photoshop 环境下,分别在三幅图像分割区域的边界上测量 60~70 个点的 (i, j) 作为理论值,以便与实际分割图像的量测值进行比较,给出分割质量的评价,具体评价方法参见文献[7]。

由本文实验得到以下结论:

1) 采用综合特征的 FLIS 精度优于只用单特

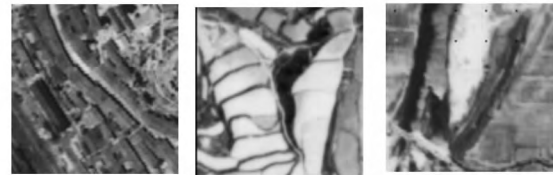


图 1 三幅原始图像

Fig.1 Three Original Images

征的分割精度。

图 2(a)~2(c)是使用单特征的分割结果;图 2(d)~2(f)是使用综合特征的分割结果。将图 2 与原始图像图 1 对照,从分割的完整性来看,综合特征的分割结果较好。

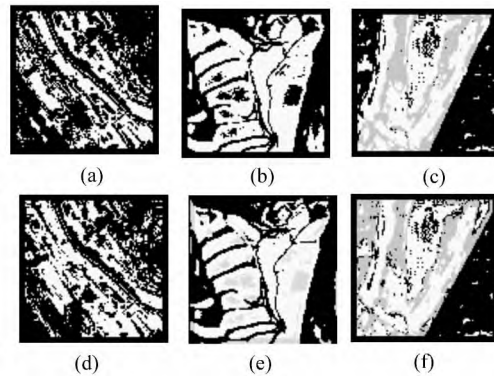


图 2 三幅航空影像 FLIS 结果图

Fig.2 FLIS Results Figures of Three Aerial Imagery

从表 2 中的数据可见,除图 1(b)以外,其他两幅图像用综合特征的分割精度均有提高。

表 2 FLIS 的分割精度/像元

Tab.2 FLIS Segmentation Accuracy /pixel

	图 1(a)	图 1(b)	图 1(c)
单特征	1.21(53 点)	0.80(68 点)	1.13(63 点)
综合特征	1.09(53 点)	0.80(68 点)	0.96(63 点)

2) 与生物地理学优化(BBO)^[3]和反向化学反应优化(OCRO)^[6]的图像分割精度相比,FLIS 的精度优势明显。

表 3 FLIS、BBO、OCRO 的图像分割精度/像元

Tab.3 FLIS, BBO, OCRO Image Segmentation Accuracy /pixel

	图 1(a)	图 1(b)	图 1(c)
FLIS	1.09	0.08	0.96
OCRO	1.09	0.88	0.98
BBO	2.13	1.29	1.51

从表 3 中数据可见,使用模糊逻辑图像分割 (FLIS) 的精度优于其他两种方法的精度。这里特别要指出的是 OCRO 法,从表 3 中第一、二行的数据对比看,FLIS 法的精度与 OCRO 法相比

没有显著提高。表3中OCRO法的数据是采用“择优选用”的结果。所谓“择优选用”是每次演化迭代过程中同时用“原数”和“反向数”^[2,6]各进行一次计算,取用较好的结果进入下一次的演化,由此可见,“择优选用”结果是花了双倍时间得到的。因此,可认为FLIS是一个很有潜力的图像分割方法。

参 考 文 献

- [1] Kashan A H, Rezaee B, Karimiyan S. An Efficient Approach for Unsupervised Fuzzy Clustering Based on Grouping Evolution Strategies[J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46: 1 240-1 254
- [2] Zheng Zhaobao, Zheng Hong. Study and Analysis of Chemical Reaction Optimization in Image Segmentation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 224-1 228(郑肇葆, 郑宏. 化学反应优化(CRO)图像分割的研究与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 1 224-1 228)
- [3] Zheng Zhaobao. Application of Biogeography-based Optimigation to Image Segmentation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 932-935(郑肇葆. 生物地理学优化(BBO)在图像分割中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8): 932-935)
- [4] Zhang Zhixing, Zhang Chunzai, Eiji Mizutani. Neuro-Fuzzy and Soft Computing[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006(张智星, 张春在, 水谷英二. 神经-模糊和软计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006)
- [5] Zheng Zhaobao, Huang Guilin. Using Least Square Method for Texture Classification of Aerial Image and Anylising Some Relative Problems. [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, 25(2): 21-26(郑肇葆, 黄桂兰. 航空影像纹理分类的最小二乘法和问题的分析[J]. 测绘学报, 1996, 25(2): 21-26)
- [6] Zheng Zhaobao, Zheng Hong. Study and Analysis of Chemical Reaction Optimization in Image Segmentation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 513-516(郑肇葆, 郑宏. 反向技术在化学反应优化图像分割中应用与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5): 513-516)
- [7] Zheng Zhaobao. Image Segmentation Based on Simulation of Ant Colony Behavior[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(11): 945-949(郑肇葆. 基于蚁群行为仿真的影像分割[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(11): 945-949)

Image Segmentation Based on Fuzzy Logic Methods

ZHENG Zhaobao¹ PAN Li¹ ZHENG Hong²

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In this paper, the membership function in fuzzy logic is applied to image segmentation. It uses the value of a membership function within a certain range instead of a segmentation threshold to determine which category a pixel belongs to. This method is called the fuzzy logic image segmentation method (FLIS). Through image segmentation experiments with real aerial images, we compare experimental results with existing methods. The results show that the FLIS method has clear advantages.

Key words: fuzzy logic; image segmentation; membership function

First author: ZHENG Zhaobao, professor, PhD supervisor. He is engaged in the research work on photogrammetry and remote sensing, image analysis and interpretation, and the application of evolutionary computation. E-mail: zhengzb@whu.edu.cn

Foundation support: Specialized Fund for the Doctoral Degree of Higher Education Project, No. 20110141110044.