

文章编号:1004-4213(2010)01-0188-5

# 基于均值漂移和模糊积分融合的高光谱图像分割\*

王凯,赵永强<sup>†</sup>,程咏梅,魏坤

(西北工业大学 自动化学院,西安 710072)

**摘 要:**针对高光谱图像的特殊性,给出了一种基于均值漂移和模糊积分融合的高光谱图像分割算法.依据高光谱图像各波段间高度的相关性将其分为若干组,通过主成分分析对各波段子集进行降维.在此基础上,采用均值漂移算法计算各波段子集图像的聚类中心进而实现分割,再利用模糊积分融合各波段子集的分割结果.仿真结果证明了该算法的有效性.

**关键词:**高光谱图像;图像分割;特征降维;均值漂移;模糊积分

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103901.0188

## 0 引言

高光谱图像数据是由高光谱成像仪从可见光到近红外的数十甚至数百个连续窄波段内获取的地物图像.它与全光谱图像的最大区别在于在二维空间信息的基础上,又增加了一维光谱信息.光谱维信息的增加显著地增加了图像的数据量,使得高光谱图像具有波段多、光谱分辨率高等特点<sup>[1-3]</sup>.图像分割是许多图像分析和应用的一个关键步骤,常用的分割方法通常有阈值分割、边缘检测、区域提取、基于特征空间聚类,但不同于普通图像,高光谱图像的分割常存在图像复杂、数据量庞大、信息冗余度高、需要提供先验信息、分割效率低耗时严重等问题<sup>[3]</sup>.

实拍高光谱图像受各种噪声影响,波段间特性不完全相同,若采用全波段进行分割容易受少数强噪声波段影响,在降维时也会大量丢失有用信息.因此考虑依据波段相关性对高光谱图像进行分组分割,然后进行决策层的融合.均值漂移是一种非参数估计密度函数的聚类方法,无需提供聚类数目,通过有效的统计迭代使每一个点“漂移”到密度函数的局部最大值,具有严格的收敛性<sup>[4-5]</sup>,这给具有复杂地物特性的高光谱图像分割带来了方便.模糊积分是一种基于信源重要程度的信息融合方法,是综合考虑信源和信号等多重模糊信息的一种整体性运算<sup>[6-7]</sup>.本文提出的基于均值漂移和模糊积分融合的

分割算法,降低了高光谱图像庞大的数据量,在提高分割效率的同时保证了分割质量,有效地实现了高光谱图像的分割.

## 1 均值漂移聚类算法

均值漂移算法基于密度函数梯度的非参数估计,是一种有效的统计迭代聚类算法,不需要任何先验知识,对任意形状的分布都有效<sup>[8-10]</sup>.

对一个概率密度函数  $f(x)$ ,已知  $d$  维空间中  $n$  个采样点  $x_i, i=1, \dots, n, f(x)$  的核函数估计为

$$\hat{f}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n k\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \omega(x_i)}{h^d \sum_{i=1}^n \omega(x_i)} \quad (1)$$

式中:  $\omega(x_i)$  和  $h$  分别为赋给采样点  $x_i$  的权重和核带宽,  $K(x) = k(\|x\|^2)$  是一个满足积分为 1 的核函数.令  $g(x) = -k'(x)$ , 其对应的核函数  $G(x) = g(\|x\|^2)$ , 则 Mean Shift 向量  $M_{h,G(x)}$  定义为

$$M_{h,G}(x) = \frac{1}{2} h^2 \frac{\nabla \hat{f}(x)}{\hat{f}_G(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i G\left(\left\|\frac{x_i - x}{h}\right\|^2\right) \omega(x_i)}{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \omega(x_i)} - x \quad (2)$$

即  $M_{h,G}(x) = m_{h,G}(x) - x$ . 式(2)表明,用核函数  $G$  在  $x$  点计算得到的 Mean Shift 向量  $M_{h,G}(x)$  正比于用核函数  $K$  估计的概率密度函数  $\hat{f}(x)$  的梯度  $\nabla \hat{f}(x)$ , 因此 Mean Shift 向量  $M_{h,G}(x)$  总是指向概率密度增加最大的方向.

均值漂移算法是一种自适应的梯度上升搜索峰值的方法.对于服从概率密度函数为  $f(x)$  的数据集  $\{x_i, i=1, \dots, n\}$ , 用均值漂移算法迭代计算概率密度

\*国家自然科学基金重点项目(60634030)、国家自然科学基金(60602056)、航空科学基金(2007ZC53037)、高等学校博士学科点专项科研基金(20060699032)和西北工业大学英才计划资助

<sup>†</sup> Tel: 029-88494352

Email: zhaoyq@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2008-07-19

修回日期: 2008-09-17

局部最大值的过程为:给定初始点  $x$ ,核函数  $G$  及带宽  $h$ ,容许误差  $\epsilon$ ,均值漂移算法循环执行三步,直至满足结束条件.

- 1) 计算  $x$  处的均值向量  $m_{h,G}(x)$ ;
- 2) 如果  $\|m_{h,G}(x) - x\| < \epsilon$ ,结束循环, $m_{h,G}(x)$  即为聚类中心,否则执行 3);
- 3) 把  $m_{h,G}(x)$  赋给  $x$ ,返回执行 1).

在这三步中,聚类中心不断沿着概率密度的梯度方向移动,同时步长也随着该点的概率密度及梯度值自适应调节.当满足一定条件时,均值漂移算法会收敛到该点附近的峰值.文献[11-12]证明了均值漂移算法的收敛性.

对于高维数据,由于数据点的低密度性(高维空间的稀疏性),均值漂移聚类会较困难,效率也会下降<sup>[11]</sup>,因此一般先通过一定的降维算法把高维数据转换到低维空间,然后再进行均值漂移聚类.

## 2 模糊积分融合

模糊积分是由 Sugeno 提出的一种非可加性测度,利用约束条件较弱的单调性和连续性取代可加性条件定义了模糊测度,并相应的定义了可测函数关于模糊测度的积分<sup>[7]</sup>.

模糊积分建立在模糊测度基础上,设  $X$  为一非空集合, $P(X)$  为  $X$  的幂集, $h$  为从  $X$  到  $[0,1]$  的可测函数, $g(\cdot)$  为模糊测度, $A \in P(X)$ ,则  $h$  在集  $A$  上关于测度  $g$  的模糊积分定义为<sup>[11]</sup>

$$\int_F h(x) \circ g(\cdot) = \max_{\lambda \in [0,1]} [\min(\lambda, g(A \cap h_\lambda))] \quad (3)$$

式中  $h_\lambda = \{x | h(x) \geq \lambda\}$ ,  $\int$  为模糊积分符号,式(3)是模糊集的模糊密度函数  $g$  与隶属度函数  $h$  的一种广义内积.

利用模糊积分进行综合评价的一个关键是模糊测度  $g(\cdot)$  的确定.令模糊密度值  $g_k$  代表第  $k$  个波段子集分割结果的重要程度.将高光谱图像第  $k$  个波段子集的数据  $Y_k$  描述为:  $Y_k = S_k + W_k$ ,其中  $S$  为信号, $W$  为噪声.对信号进行特征值分解得到对角阵  $\Lambda$

$$\Lambda = \text{diag}(\sigma_{(1,S_k)}^2, \dots, \sigma_{(r,S_k)}^2, \sigma_{(1,W_k)}^2, \dots, \sigma_{(l,W_k)}^2) \quad (4)$$

式中  $\sigma_{(i,S_k)}^2$  和  $\sigma_{(i,W_k)}^2$  分别对应于信号和噪声的特征值.通常噪声相对于信号能量较弱特征值较小,认为  $\min(\sigma_{(i,S_k)}^2) \gg \max(\sigma_{(i,W_k)}^2)$ ,以此定义波段子集的模糊密度  $g_k$  为信号与噪声能量之比<sup>[14]</sup>

$$g_k = \frac{S}{W} = \frac{\sum_{i=1}^r \sigma_{(i,S_k)}^2}{\sum_{j=1}^l \sigma_{(j,W_k)}^2} \quad (5)$$

模糊积分是对多重模糊信息整体性的非线性积分运算,可看成是一种模糊期望.模糊积分的实际意

义可理解为人们对客体各因素的满意度和重视度之间的相容性程度.模糊积分值越大,表明客体的特征同人们对它的要求越接近<sup>[6]</sup>.

## 3 均值漂移聚类 and 模糊积分融合的分割算法

高光谱图像为  $m \times n \times p$  的三维数据立方体,量测矩阵  $X = [x(1), x(2), \dots, x(i), \dots, x(N)]^T$ . 其中  $N = m \times n$  为图像像素点个数, $p$  为波段数, $x(i) = [x_1(i), x_2(i), \dots, x_p(i)]$  为像素点的光谱维信息.

本文采用均值漂移和模糊积分融合算法对高光谱图像进行分割.具体流程为:

- 1) 利用高光谱数据构造量测矩阵  $X$ ;
- 2) 针对高光谱图像波段间的高度冗余性,利用  $R_{\text{corr}}(i, j) = C(i, j) / \sqrt{C(i, i) * C(j, j)}$  计算波段  $i, j$  之间的相关系数(其中  $C$  是关于  $X$  矩阵的协方差阵),然后通过相关系数将其划分为若干个波段子集,各个波段子集之间互不重叠;

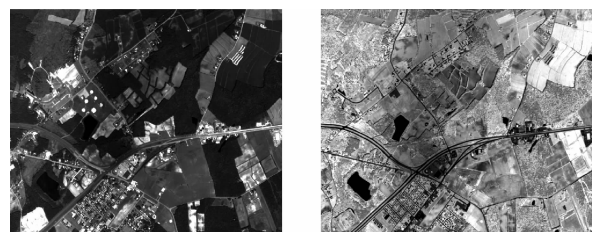
3) 运用主成份分析(Principle Component Analysis, PCA)对高光谱图像各波段子集进行降维;在保留足够信息量的前提下,通过主成份特征提取把高维图像转换到冗余度最小的低维空间<sup>[15]</sup>,将原始数据压缩到较少波段上,以降低高光谱图像数据的复杂性,有效提高计算速度;

4) 对于降维后的高光谱图像数据空间,选取均匀核函数及合适的核带宽,运用第 1 节中均值漂移迭代算法,计算各波段子集的聚类中心,实现各波段子集的分割;

5) 根据式(5)计算各波段子集的模糊密度;在每一组波段子集中,通过欧式距离函数计算像素相对于聚类中心的隶属度;运用模糊积分(式 3)计算该像素融合后的分割结果.依次对各像素点重复上述过程,实现波段子集分割结果的融合.

## 4 实验结果与分析

仿真图像数据采用一组大小  $614 \times 512 \text{ pixel}^2$ 、波段数为 205 的 AVIRIS 高光谱图像.图 1 是其中的 4 个波段(分别位于划分后的 4 个波段子集之中),可看出波段间图像差异较明显.



(a) Band 18

(b) Band 72

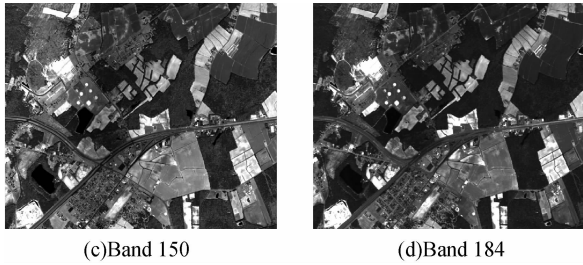


图 1 仿真所用 AVIRIS 原图  
Fig. 1 Original AVIRIS images adopted in simulation

对该 205 个波段的高光谱图像进行相关系数计算(图 2),依据相关性进行波段子集的划分.各波段子集的 PCA 降维(阈值  $T=0.995$ )及模糊密度计算结果见表 1.

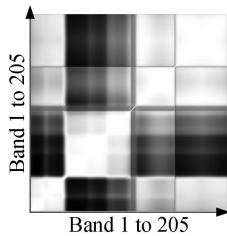


图 2 波段相关性  
Fig. 2 Correlation among different band images

表 1 波段子集划分及计算情况

Table 1 Band subset division and calculation status

	The first group	The second group	The third group	The fourth group
Band subsets	1~35	36~104	105~150	151~205
Band number	35	69	46	55
Drop dimensional results	4	4	8	6
Fussy density	0.253 9	0.255 5	0.238 7	0.251 9

经过以上处理有效降低了高光谱图像的数据量,在此基础上采用所提出的均值漂移与模糊积分融合的策略进行图像分割.结果如图 3,其中(a)~(d)和(e)分别为 4 个波段子集图像分割结果以及融合之后的结果.

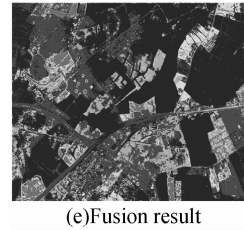
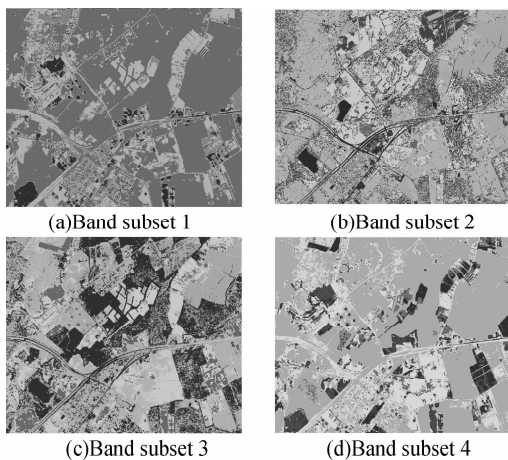


图 3 各波段子集分割与融合结果  
Fig. 3 Each band subset segmentation and fusion results

同时为了验证算法的分割性能,分别使用全波段 K-mean(商业软件 ENVI(4.0 版))、全波段均值漂移<sup>[10]</sup>以及本文提出的分组融合分割算法,如图 4.

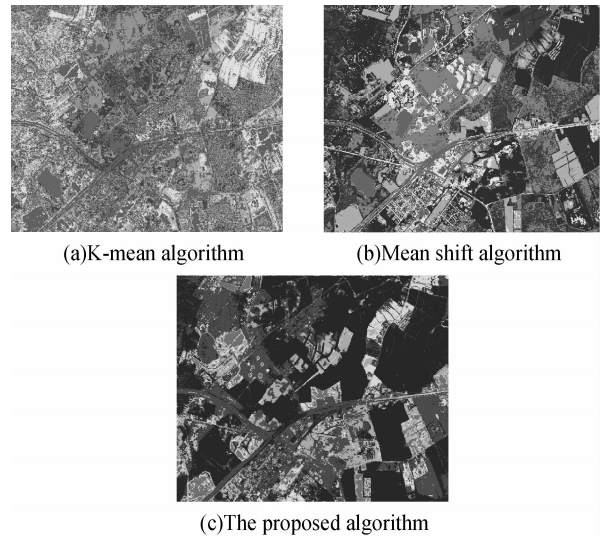


图 4 分割结果对比  
Fig. 4 The comparisons with two algorithms

由图 4 可以看出,K 均值算法除对图像中少部分细节分割效果较好外,因为受噪声干扰严重算法总体分割结果比较凌乱;全波段的均值漂移算法相比 K 均值算法有了很大改进,噪声干扰减小,类间区分性增强,但由于全波段降维丢失信息严重,使得分割结果轮廓信息较差,很难分割出图像中的地物整块;对比前两种算法,本文采用基于波段相关性的分组分割及融合的策略,有效抑制了噪声,分割结果轮廓清晰,目标完整,较准确地实现了高光谱图像复杂地物的分割.但是定量评价图像分割效果是一件较困难的事情,尤其是高光谱图像通常包含复杂的地物目标及环境.文献[16-17]指出好的分割结果通常具有简单的、一致性的区域和无锯齿的空间轮廓,能够分割出期望的或者重要的区域.相比较图 4(a)、(b),(c)更符合这个标准.

图 5 给出了算法对本实验室光谱仪所拍摄的两组多光谱图像(可见光范围内共 32 个波段)的分割结果.分割结果表明本文算法对实拍波段数较少的多光谱图像同样适用.

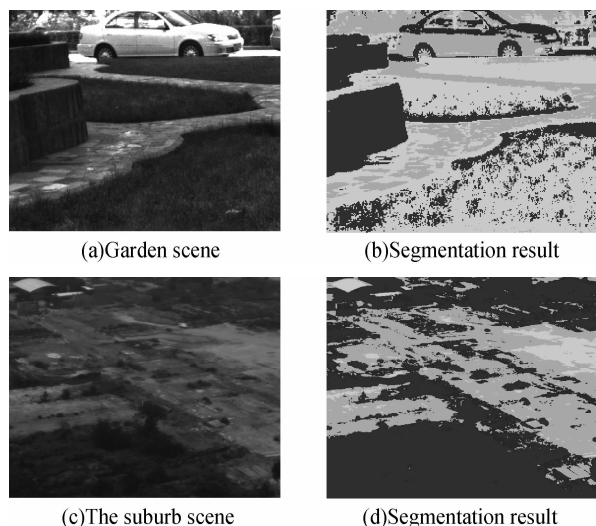


图5 多光谱图像分割

Fig.5 The multi-spectral image segmentation

## 5 结论

针对高光谱图像数据特殊性,本文提出了一种基于均值漂移和模糊积分融合的分割算法.该方法对高光谱图像的波段子集划分及降维降低高光谱图像庞大的数据量同时保留了其最大信息量,而均值漂移分割的非监督性以及和模糊积分融合算法的结合,有效实现了高光谱图像的分割.同时,本文算法也有需要进一步完善的地方:在利用均值漂移算法进行图像分割时,参数选择尤其是核带宽对分割结果有着重要影响,可以利用图像的自身信息提出一种更为简洁有效的参数选取方法,如将核带宽自适应化,以提高图像分割的质量和效率;模糊积分融合的过程中,选取欧式距离作为隶属度函数稍过简单,可考虑改用其他距离函数;对于高光谱图像分割希望能找出一种有效的分割结果评价体系以适应实际应用.

### 参考文献

- [1] PLAZA A. Advanced processing of hyperspectral images[C]. *IEEE IGARSS Proceedings*, 2006, **4**: 1974-1979.
- [2] PENNA B, TILLO T, MAGLI E, *et al.* Hyperspectral image compression employing a model of anomalous pixels[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(4): 664-668.
- [3] WANG Zhi-ping, YANG Jian-feng, XUE Bin, *et al.* Using hyperspectral data for land cover identification and classification[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 561-565. 王志平, 杨建峰, 薛彬, 等. 利用高光谱数据进行地物识别分类研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 561-565.
- [4] COMANICIU D, MEER P. Mean shift analysis and applications [C]. *IEEE Int Conf on Computer Vision, Kerkyra*, 1999, **2**(2): 1197-1203.
- [5] CHENG Y Z. Mean shift, mode seeking, and clustering[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, **17**(8): 790-799.
- [6] TAGANI H, KELLER J. Information fusion in computer vision using the fuzzy integral [J]. *IEEE Transactions on SMC*, 1990, **20**(3): 733-741.
- [7] ZHANG De-guo, HU Hai-hong, LIANG Ji-min. Multiple image partition algorithm fusion based on fuzzy integral[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, **28**(10): 1480-1483. 张德国, 胡海虹, 梁继民. 基于模糊积分的图像分割算法融合. *系统工程与电子技术*[J], 2006, **28**(10): 1480-1483.
- [8] LI Zheng-zhou, PENG Su-jing, WANG Yun, *et al.* Gray image segmentation algorithm based on mean shift [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 286-289. 李正周, 彭素静, 王允, 等. 基于均值漂移的灰度图像分割方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 286-289.
- [9] WANG Yong-zhong, ZHAO Chun-hui, LANG Yan, *et al.* A method for IR imaging target tracking based on texture feature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2163-2167. 王永忠, 赵春晖, 梁彦, 等. 一种基于纹理特征的红外成像目标跟踪方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2163-2167.
- [10] BO Shu-kui, DI Feng-ping, LI Hua-wei, *et al.* Mean shift based clustering analysis of multi-spectral remote sensing imagery[J]. *Remote Sensing Information*, 2006, **5**: 17-19. 薄树奎, 邸凤萍, 李华玮, 等. 基于均值漂移法进行多光谱遥感聚类研究[J]. *遥感信息*, 2006, **5**: 17-19.
- [11] COMANICIU D, MEER P. A robust approach toward feature space analysis [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(5): 603-619.
- [12] LI Xiang-ru, WU Fu-chao, HU Zhan-yi. Convergence of a mean shift algorithm[J]. *Journal of Software*, 2005, **16**(3): 365-374. 李乡儒, 吴福朝, 胡占义. 均值漂移算法的收敛性[J]. *软件学报*, 2005, **16**(3): 365-374.
- [13] XIAO Gang, JING Zhong-liang, LI Jian-xun, *et al.* An optimal image fusion method based on fuzzy integral[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, **39**(8): 1312-1316. 肖刚, 敬忠良, 李建勋, 等. 一种基于模糊积分的图像最优融合方法[J]. *上海交通大学学报*, 2005, **39**(8): 1312-1316.
- [14] DI Wei, PAN Quan, ZHAO Yong-qiang, *et al.* Anomaly target detection in hyperspectral imagery based on band subset fusion by fuzzy integral [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, **30**(2): 267-271. 邸韡, 潘泉, 赵永强, 等. 高光谱图像波段子集模糊积分融合异常检测[J]. *电子与信息学报*, 2008, **30**(2): 267-271.
- [15] MANOLAKIS D, MARDEN D. Dimensionality reduction of Hyperspectral imaging data using local principal components transform[C]. *SPIE*, 2004, **5425**: 393-401.
- [16] SU Ling-hua, YI Tong-sheng, WAN Jian-wei, *et al.* Compression of hyperspectral image based on independent component analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 973-976. 苏令华, 衣同胜, 万建伟. 基于独立分量分析的高光谱图像压缩[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 973-976.
- [17] HARALICK R M, SHAPIRO L G. Image segmentation techniques [J]. *Comput Vision Graphics Image Process*, 1985, **29**: 100-132.

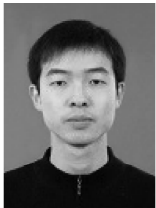
## Hyperspectral Image Segmentation Based on Mean Shift and Fuzzy Integral Fusion

WANG Kai, ZHAO Yong-qiang, CHENG Yong-mei, Wei Kun

(College of Automation, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A new segmentation method based on mean shift and fuzzy integral algorithm is proposed to overcome the problems of hyperspectral image processing. A hyperspectral image is grouped into several band subset images according to their correlation relationship. Then, the dimension of each subset band image is reduced by principle component analysis. To segment each subset band image quickly, the mean shift algorithm is employed to find the cluster centers. And, the segmentation results are fused by fuzzy integral. Simulation results show the effectiveness of this method.

**Key words:** Hyperspectral image; Image segmentation; Feature dimension reduction; Mean shift; Fuzzy integral



**WANG Kai** was born in 1984. He received the B. S. degree in 2007 from Northwestern Polytechnical University. Now he is a graduate student in system engineering at NWPU. His research interests focus on image processing and information fusion.



**CHENG Yong-mei** was born in 1960. She is a professor, and her research interests focus on information fusion, active/passive target tracking, signal and information processing, and cognition computation.