

Mumford-Shah 模型在卫星云图分割中的应用

费文龙^{1),2)} 吕红¹⁾ 韦志辉²⁾

¹⁾(南京信息工程大学数理学院,南京 210044) ²⁾(南京理工大学计算机科学与技术学院,南京 210094)

摘要 利用 Mumford-Shah 模型对卫星云图进行分割和识别。根据卫星云图自身的特征,提出了基于核心灰度的 Mumford-Shah 模型,并用此模型分割出了单通道卫星云图中的高云、中云和低云。同时提出了一种基于核心灰度的 Mumford-Shah 模型的向量图像分割方法,对两个通道的卫星云图进行分割,更加准确地识别出中低云系在红外通道和可见光通道中的位置。

关键词 卫星云图 图像分割 Mumford-Shah 模型 向量图像

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)04-0598-06

A Application of Mumford-Shah Model in Segmentation of Satellite Cloud Image

FEI Wen-long^{1),2)}, LÜ Hong¹⁾, WEI Zhi-hui²⁾

¹⁾(College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

²⁾(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract In this paper, the Mumford-Shah model is used for the recognition and classification of satellite cloud imagery. Considering the characteristics of satellite cloud imagery, an improved Mumford-Shah model based on the kernel gray of object is presented. Using this model, high cloud and middle cloud and low cloud is classified from the one-channel cloud image. For the multi-channel image, the vector-valued image segmentation method using Mumford-Shah model based on the kernel gray of object is presented. The experimental results show that our method can get the precise position of middle cloud and low cloud in the infrared channel and visible-light channel.

Keywords satellite cloud image, image segmentation, Mumford-Shah model, vector-valued image

1 引言

作为一种由空间对地球大气进行遥感测量的气象观测平台,地球静止气象卫星与常规气象观测相比,具有观测范围大、时间分辨率高和测量系统不干扰被测目标物等优点,卫星资料已被广泛应用于日常天气预报业务。近年来,随着数值预报技术的发展和气象卫星探测能力的不断提高,人们越来越多地将卫星资料应用于数值预报中,并取得了明显的进展。

卫星资料的使用,云的分类和识别是首要解决的问题。卫星云图中云的识别与分类的问题,归结到图像处理的基础上,就是要对卫星云图进行图像分割和边缘提取等处理。图像分割的目的是将图像中的灰度同质的区域分离出来,并通过各个同质区域的边界来表达。目前,云的分类和识别的技术主要分为以下几类:阈值法^[1]、多谱阈值法^[2-4]、聚类方法^[5]、数学形态法^[6]、人工神经网络法^[7]、小波分析法^[8-9]等。

图像分割是计算机视觉和计算机图形学研究的一个基本问题,也是一个经典难题。Mumford-Shah

收稿日期:2007-08-22; 改回日期:2008-03-04

第一作者简介:费文龙(1976~),男,现为南京理工大学控制科学与工程专业博士研究生。主要研究方向为图像处理与模式识别、卫星云图的分类与识别。E-mail:feiw@nuist.edu.cn

模型^[9]是20世纪80年代由 Mumford 和 Shah 提出的,在理论上是一类具有体积能量和低维测度的新的变分问题,通过函数优化的方法进行图像分割。与常规的基于统计的图像处理方法相比,基于变分法的 Mumford-Shah 模型无论在理论上还是在数值计算上都具有很强的优势,它可以从全局的角度,直接对一些重要的视觉几何特征,如梯度、切线和曲率等进行操纵,并且在数值计算上可以利用变分法中成熟的数值方法理论来进行实现。

Chan 和 Vese 提出一种简化的 Mumford-Shah 模型^[10]的能量函数,并且根据欧拉-拉格朗日方法推导出了求解方法,并以水平集函数的方法给出了数值解法,使得简化的 Mumford-Shah 模型成为一种简单高效的图像分割方法,该方法在医学图像分割方面已经得出了一系列的结论^[11]。

2 基于 Mumford-Shah 模型的图像分割方法

2.1 Mumford-Shah 模型

设 $u(x, y)$ 为定义于 Ω 的图像, C 为当前的图像边界,它将图像分割成若干个同质区域,得到分割图像 $u_0(x, y)$,则 Mumford-Shah 模型的目的就是找到真正的图像边界 C_0 ,使得到的分割图像 $u_0^{MS}(x, y)$ 和原来的图像 $u(x, y)$ 之间的误差比所有其他边界分割出来的图像的误差都要小,即最小化如下能量方程:

$$(C_0, u_0^{MS}) = \inf_c F^{MS}(u_0, C) \quad (1)$$

$$F^{MS}(u_0, C) = \mu \cdot Length(C) + \lambda \int_{\Omega} |u_0 - u|^2 dx dy + \nu \int_{\Omega \setminus C} |\nabla u_0|^2 dx dy \quad (2)$$

其中, u 为给定的图像, u_0 为当前分割出来的图像, μ, λ, ν 为调节参数, $Length(C)$ 为边界曲线 C 的 1 维 Hausdauff 测度,图像 u_0^{MS} 为此能量函数的最小解。

2.2 简化的 Mumford-Shah 模型

目前,对于 Mumford-Shah 模型的应用研究,存在两种简化的模型。其一为 Ambrosion 等人基于椭圆逼近提出的辅助变量模型,其二为 Chan 和 Vese 建立的水平集模型,并称之为 C-V 方法^[10,12]。这里主要使用基于水平集模型的 C-V 方法对 Mumford-Shah 模型进行求解。

Chan 和 Vese 提出一种简化的 Mumford-Shah 模型的能量函数^[10]。设边缘曲线 C 将定义在 Ω 上的

给定图像划分为两部分, C 的内部 $inside(C)$ 和 C 的外部 $outside(C)$, c_1, c_2 分别是 C 的内部和 C 的外部图像的灰度平均值。则该能量函数可以表达成:

$$F(C, c_1, c_2) = \mu \cdot Length(C) + \nu \cdot S_0(C) + \lambda_1 \int_{inside(C)} |u_0 - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{outside(C)} |u_0 - c_2|^2 dx dy \quad (3)$$

其中, $Length(C)$ 是边界曲线 C 的长度, $S_0(C)$ 是 C 的内部区域的面积, $\mu, \nu \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 > 0$ 是各个能量项的权重系数, F 的前两项是平滑项。因此,考虑如下最小化问题:

$$\{C^0, c_1^0, c_2^0\} = \inf_{C, c_1, c_2} F(C, c_1, c_2) \quad (4)$$

由于此模型利用了图像全图信息,因此通过最优化式(4),即可得到全局最优的图像分割结果。

2.3 基于简化 Mumford-Shah 模型的向量图像分割

向量图像是指包括不同光谱图像构成的多谱图像,比如彩色图像的不同颜色通道,气象卫星云图中的不同波段的云图,都属于向量图像。同一幅图像在不同的通道中所表现出来的特征各不相同。向量图像的分割一方面要根据每个单独通道中图像的特征,同时又要结合不同通道之间图像特征的相互联系进行图像的分割,结合不同通道的图像特征进行分割往往能够得到更加准确、更加符合实际意义的图像区间。因此,研究对向量图像的分割,更加具有实际意义。

设定义域为 Ω 的向量图像 $U(x, y)$ 具有 N 个通道,即

$$U(x, y) = (u_1(x, y), u_2(x, y), \dots, u_N(x, y)) \quad (5)$$

其中, $u_k(x, y)$ 是向量图像 $U(x, y)$ 的第 k 个通道的图像。设 C 为向量图像的轮廓线,把向量图像 $U(x, y)$ 分成内外两个部分,内外两个部分的平均向量分别是

$$M^i = (m_1^i, m_2^i, \dots, m_N^i) \\ M^o = (m_1^o, m_2^o, \dots, m_N^o) \quad (6)$$

其中, m_k^i, m_k^o 分别是 $U(x, y)$ 的第 k 个分量图像位于轮廓线 C 内部和外部的平均值,即

$$m_k^i = \frac{1}{n_k^i} \cdot \sum_{(x, y) \in inside(C)} u_k(x, y) \\ m_k^o = \frac{1}{n_k^o} \cdot \sum_{(x, y) \in outside(C)} u_k(x, y) \quad (7)$$

对于向量图像可以按照如下方法来扩展式(3)

表示的 Mumford-Shah 模型的能量函数^[13]:

$$F(\mathbf{C}, \boldsymbol{\lambda}^i, \mathbf{M}^o) = \mu \cdot \text{Length}(\mathbf{C}) + \nu \cdot S_0(\mathbf{C}) + \int_{\text{inside}(\mathbf{C})} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lambda_k^i |\mathbf{u}_k - m_k^i|^2 dx dy + \int_{\text{outside}(\mathbf{C})} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lambda_k^o |\mathbf{u}_k - m_k^o|^2 dx dy \quad (8)$$

其中, λ_k^i, λ_k^o 分别是第 k 个分量图像位于轮廓线 \mathbf{C} 内部和外部像素平均值的权重系数, 调整这些系数可以增强或削弱第 k 个分量在分割过程中起的作用。

该方程仍然可以用前面介绍的求解 Mumford-Shah 模型的全局优化偏微分方程的数值解 C-V 方法。并且, 由于该方程只比 F_{MS} 中增加了各个通道数据量, 并没有引入额外的计算复杂度, 因此计算速度仍然很快。

3 用 Mumford-Shah 模型进行卫星云图的分割

3.1 原始 Mumford-Shah 模型的卫星云图分割

实验采用 GMS-5 地球静止气象卫星的卫星云图。GMS-5 共有 4 个谱段: 一个可见光通道、两个红外通道和一个水汽通道。卫星在红外波段接收的辐射是地面和云面发射的长波红外辐射。在一定条件下, 卫星接收的红外辐射仅与物体的温度有关, 物体的温度越高, 卫星接收的辐射越大; 温度越低, 辐射越小。如果把卫星在红外谱段接收到的辐射转换为图像, 辐射大用暗的色调表示, 辐射越小, 色调越白, 这样就得到了红外云图。红外云图中的像素灰度值通常称为亮温^[14]。由于大气温度随高度递减, 所以可以根据辐射亮温来判断云和区分云的种类。国际云气候计划 (ISCCP) 根据云顶气压和云低高度对云进行分类, 把云分成三大族: 高云、中云、低云。低云 (0 ~ 2 km) 云顶气压大于 680 hPa, 中云 (2 ~ 6 km) 云顶气压在 440 hPa 到 680 hPa 之间, 高云 (6 km) 云顶气压小于 440 hPa。

卫星云图文件的数据量一般比较大, 如 GMS-5 卫星云图分辨率为 896×704 像素, 而在卫星云图的使用过程中, 通常也是对某一个局部进行研究, 比如分析江苏省上空的云分布, 或者华东地区上空的云分布等, 因此在数值试验中通常采用局部卫星云图进行分割。先截取感兴趣的分割区域, 然后用 Mumford-Shah 模型进一步进行分割。选取 2002 年 06 月 13 日 05 点 02 分的 GMS-5 卫星红外云图的一

部分进行试验。具体实施时采用简化的 Mumford-Shah 模型, 并且使用水平集方法对 Mumford-Shah 模型的能量函数进行迭代。

参数设置: 时间步长 $\Delta t = 0.1$; 网格步长 $h = 1$; 目标与背景的贡献系数 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$; $\nu = 0$; $\mu = 1$; 初始轮廓线定义为圆。分割过程和结果如图 1 所示。

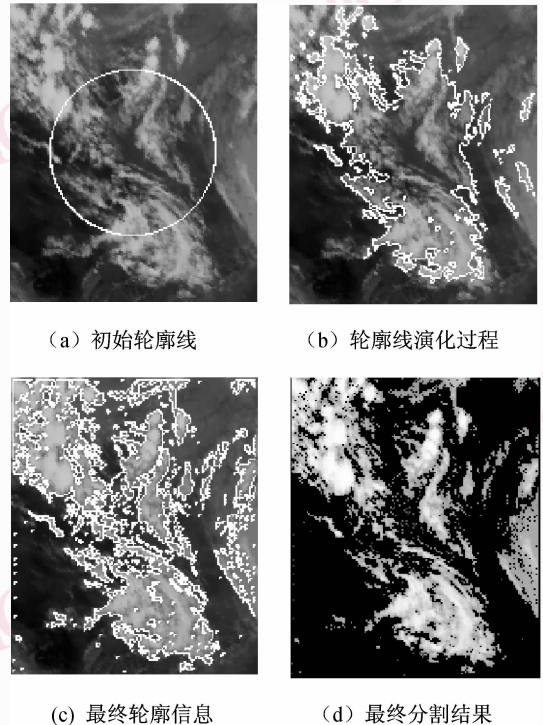


图 1 M-S 模型的分割过程及结果
Fig. 1 Segmentation process and results for M-S model

从图 1 中可以看出, 如果作为一个图像分割的结果, 应该说 Mumford-Shah 模型已经能够很好地分割出图像中的目标与背景, 找出图像的边缘线, 但是作为卫星云图的处理来讲, 仅仅做到这一点是不够的, 我们不仅要分割出天空和云的边界线, 而且还要根据不同类型云的不同特征, 分割出不同类型的云。因此还要对 Mumford-Shah 模型进行一些改进。

3.2 改进的 Mumford-Shah 模型

Mumford-Shah 模型的分割目标是将灰度同质的区域分离出来, 而模型中假设当前轮廓线 \mathbf{C} 将图像分割成内外两个部分, 然后用内外两个部分的像素平均值作用图像的目标和背景。这样做的优点是: 分割时不需要外界的干预, 就能够根据图像自身的灰度特征对图像进行分割。但是, 这样做对于卫星云图来讲, 它就不能把云图中的各种类型的云准确地区分开来, 而只能根据亮温值的大小, 大概地把

云图分成两个部分,分割具有一定的“盲目性”。这里对 Mumford-Shah 模型进行了改进,提出了基于核心灰度的 Mumford-Shah 模型。

在红外云图中高云、中云、低云各自的灰度区间、中心灰度区域如表 1 所示^[14]。根据每种云中心区域的灰度范围,将核心灰度 c_{obj} 定义为该种云中心区域的中值。

表 1 红外通道云的分类

Tab. 1 Cloud classification in the infrared channel

云的类型	灰度区间	中心灰度区域	核心灰度
陆地	0 ~ 30	0 ~ 30	
低云	31 ~ 101	60 ~ 68	64
中云	102 ~ 147	128 ~ 139	133
高云	148 ~ 255	160 ~ 240	201

由此,为了能够直接识别出高云,而且消除中云和低云的干扰,把 Mumford-Shah 模型中轮廓线内,目标部分的像素灰度平均值用高云区域的核心灰度值 201 来代替。利用图 1 的原始云图,得到的分割结果如图 2(a)。

一般地,可以得到改进的基于核心灰度的 Mumford-Shah 模型,其能量方程为

$$F'(C, c_{obj}, c_2) = \mu \cdot Length(C) + \nu \cdot S_0(C) + \lambda_1 \int_{inside(C)} |u_0 - c_{obj}|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{outside(C)} |u_0 - c_2|^2 dx dy \quad (9)$$

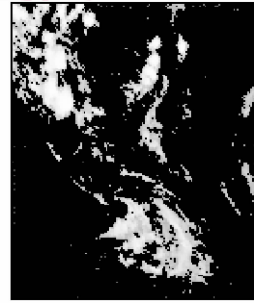
其中, c_{obj} 为已知目标物体的灰度范围内的核心灰度, c_2 仍然为轮廓线外的灰度平均值。

用改进的 Mumford-Shah 模型得到的分割结果有以下几个主要的特点:

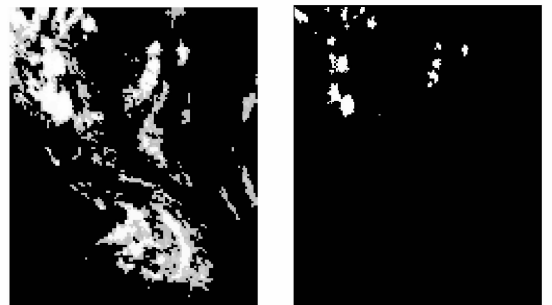
(1)改进的 Mumford-Shah 模型避免了原始模型分割的盲目性,可以利用以往的一些统计结果或经验值,估计出目标的灰度范围,然后再进行有目的的分割,使分割过程更快,更准确。

(2)基于核心灰度的 Mumford-Shah 模型又不同于简单的灰度阈值分割法。灰度阈值法只是简单地按照灰度级别,把不在阈值范围内的像素全部过滤掉,没有考虑到目标物体的连续性,有可能把目标物体内部的某些灰度值不在阈值范围内像素也过滤掉。如图 2 所示,相对于阈值为 201 的阈值分割结果来讲,核心灰度为 201 的 M-S 分割结果要完整得多,而比阈值为 148 的阈值分割结果范围要小一些,

灰度分布更接近于核心灰度。而采用基于核心灰度的 Mumford-Shah 模型进行分割时,指定的 c_{obj} 只是目标物体的一个灰度核心值,模型能把灰度值在 c_{obj} 附近的连续的目标都分割出来。这样既利用了以往对卫星云图分割所得的经验结果,又比较好地保留了目标物体的连续性,这也是基于活动轮廓线图像分割模型的一个重要的特点。



(a) 核心灰度201的Mumford-Shah分割结果



(b) 阈值148的阈值分割结果 (c) 阈值201的阈值分割结果

图 2 改进 Mumford-Shah 模型分割结果

Fig. 2 Segmentation results for improved Mumford-Shah model

(3)可以调整轮廓线内外部分的权重系数 λ_1 、 λ_2 ,就可以调整所分割的目标的灰度区间偏离核心灰度范围的大小。例如,取高云核心灰度为 $c_{obj} = 201$ 时,各个系数比例所得到的分割结果的灰度范围如表 2 所示。可见系数比例 $\lambda_1 : \lambda_2$ 较小时,高云的灰度区间和中云的灰度区间有较大的重叠部分,

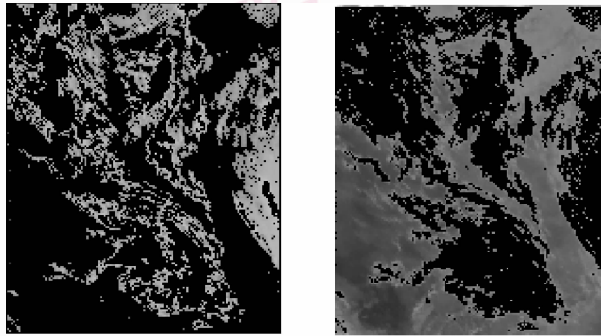
表 2 不同参数比例得到的灰度区间

Tab. 2 Different region of grey by different parameter

$\lambda_1 : \lambda_2$	高云灰度区间 ($c_{obj} = 201$)	中云灰度区间 ($c_{obj} = 133$)
1 : 2	139 ~ 207	104 ~ 206
1 : 1	150 ~ 207	109 ~ 206
2 : 1	160 ~ 207	115 ~ 206
4 : 1	169 ~ 207	124 ~ 160
8 : 1	176 ~ 207	127 ~ 146

这是因为在单独分割中云时,算法把高云也当作中云来处理,而 $\lambda_1 : \lambda_2$ 越大,所得的分割结果越靠近核心灰度,因而分割效果较为理想。

在前面分割出高云的基础上,利用分割剩余的图像,将中云的核心灰度 $c_{obj} = 133$ 代入到基于核心灰度的 Mumford-Shah 模型中,可以进一步地分割出中云和低云,如图 3 所示。



(a) 中云的分割结果

(b) 低云分割结果

图 3 中云和低云的分割结果

Fig. 3 Segmentation results of middle cloud and low cloud

3.3 多通道的卫星云图资料进行处理

红外资料根据卫星接收到的云顶的辐射,可以估算出云顶的温度,并识别高度不同的云,可见光资料根据物体反射太阳辐射的强度,能反映出物体的颜色,又能区分不同厚度的云,两者在云的分类和识别时各有优点。但是,仅用一个通道的资料进行云的分类和识别其缺点是显而易见的。因为不同的云可能具有相同的灰度值,而同一种云又可能显示为不同的灰度值。若将红外和可见光两通道,或者更多通道的资料结合起来分析,必将大大改善云分类的效果。

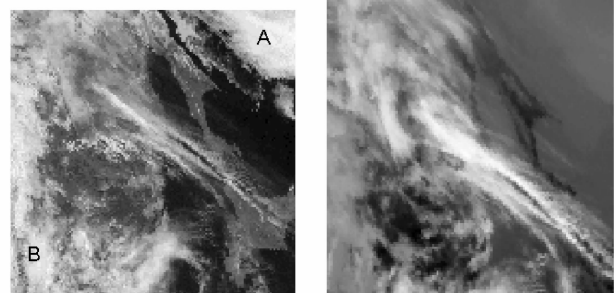
下面采用前面介绍的基于简化 Mumford-Shah 模型的向量图像分割方法来对多个通道的卫星云图资料进行分割实验。同样,也可以把其中 Mumford-Shah 模型中的灰度平均值,改成目标物体的核心灰度,得到基于核心灰度 Mumford-Shah 模型的向量图像分割方法:

$$F'(C, M^i, M^o) = \mu \cdot \text{Length}(C) + \nu \cdot S_0(C) + \int_{\text{inside}(C)} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lambda_k^i |u_k - m_k^{\text{obj}}|^2 dx dy + \int_{\text{outside}(C)} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lambda_k^o |u_k - m_k^o|^2 dx dy \quad (10)$$

式中, m_k^{obj} 是目标物体在第 k 个分量图像中的核心灰度, m_k^o 是第 k 个分量图像轮廓线外部的像素平均值。

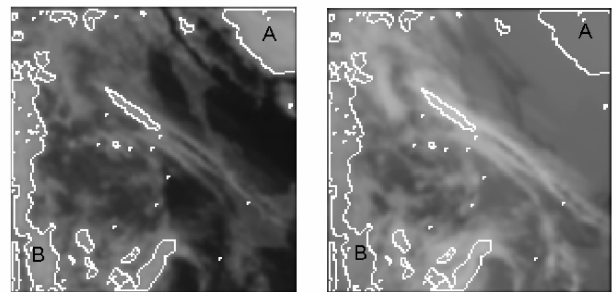
高云在红外云图的核心灰度为 201,中云在红外云图的灰度区间是 102 ~ 147,核心灰度为 133,在可见光云图的灰度在 188 ~ 224 之间,核心灰度为 200。为了在云图中准确找出中低云的位置,我们希望找出的区间应该在红外云图中不在 201 的左右,而在可见光范围内在 200 左右的灰度区间。根据实验,如果希望某种核心灰度的目标不要出现在分割结果中,只要将其贡献率权重系数 λ 设为负值。因此在模型中取高云在红外云图的核心灰度 $m_{\text{IR}}^{\text{obj}} = 201$ 、中低云在可见光云图的核心灰度 $m_{\text{VS}}^{\text{obj}} = 200$,取权重系数 $\lambda_{\text{IR}}^i = 1, \lambda_{\text{IR}}^o = -1, \lambda_{\text{VS}}^i = 1, \lambda_{\text{VS}}^o = 1$ 。

原始图像为 2002 年 05 月 02 日 23 时 33 分的可见光云图(图 4(a))和红外二通道云图(图 4(b))的一部分,从图中可以看到右上角的 A 区域和左下边界的 B 区域对应的分别是低云区和中云区。然后,按照上述参数设置进行分割,得到的分割结果如图 4(c)、(d),可看到所使用的模型基本上能够按照需要把中云和低云区域分割出来。



(a) 可见光原始云图

(b) 红外原始云图



(c) 可见光云图中的最终轮廓线 (d) 红外云图中的最终轮廓线

图 4 红外和可见光两个通道识别中低云结果

Fig. 4 Segmentation results of middle cloud and low cloud with two-channel images

4 结 论

Mumford-Shah模型是目前最为流行的图像分割方法之一,它是一种基于变分法的图像分割方法。本文提出了基于核心灰度的Mumford-Shah模型和基于Mumford-Shah模型的向量图像分割方法。对于单通道云图,分割出的高云、中云和低云图像更接近于核心灰度,并且目标区域更加完整、平滑;对于多通道图像,给出了中低云系在红外通道和可见光通道中的准确位置。

在利用Mumford-Shah模型进行卫星云图的处理过程中,主要还是依据各种通道中每一类云的灰度特征来进行分割。然而,云的结构形式、范围大小、纹理特征等都是实际应用中用来判断云的类型的重要判据。因此,为了更加准确地进行云的分类和识别,在以后的研究中可以把Mumford-Shah模型进一步地改进,可以在Mumford-Shah模型的能量函数中再加入关于目标物体的结构信息和纹理信息等,如结构形状是带状、逗点型还是涡旋型等,纹理是均匀的还是非均匀的等等,以提高Mumford-Shah模型分割的准确率。

参考文献 (References)

- Zhou Wei. Classification of Cloud Using GMS-5 infrared data[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, **39**(1): 83-90. [周伟. 利用GMS-5红外资料进行云的分类识别[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(1): 83-90.]
- Yang Cheng. Cloud classification of GMS-5 satellite imagery by the use of multispectral threshold technique [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2002, **25**(6): 274-254. [杨澄. 用多谱阈值法进行GMS-5卫星云图云型分类的研究[J]. 南京气象学院学报, 2002, **25**(6): 274-254.]
- Yu Fan. Research on the cloud classification for the bi-spectrum cloud picture[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1994, **17**(1): 117-124. [郁凡. 双光谱云图的云分类探讨[J]. 南京气象学院学报, 1994, **17**(1): 117-124.]
- Shi Chun-xiang. Automatic segmentation of satellite image using hierarchical threshold and neural network [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2001, **12**(1): 70-78. [师春香. 多阈值和神经网络卫星云图云系自动分割试验[J]. 应用气象学报, 2001, **12**(1): 70-78.]
- Wang Ji-guang. Synthetical optimization clustering method for classifying cloud from satellite images [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2005, **6**(6): 585-590. [王继光. 卫星云图云分类的一种综合优化聚类方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, **6**(6): 585-590.]
- Hu Shao-xiao. Application of mathematical morphology in meteorologic satellite cloud image processing [J]. Journal of Sichuan Meteorology, 1995, **15**(4): 46-48. [胡少校. 数学形态学方法在气象卫星云图图像处理中的应用[J]. 四川气象, 1995, **15**(4): 46-48.]
- Xue Jun-tao. Application of wavelet transforms on the boundary processing of the infrared satellite cloud image [J]. Journal of Tianjin University, 2002, **35**(6): 736-739. [薛俊韬. 小波变换在云图边缘处理中的应用[J]. 天津大学学报, 2002, **35**(6): 736-739.]
- Lu Zhi-ying. Image texture feature extraction based on wavelet analysis theory [J]. Pattern recognition and artificial intelligence, 2000, **13**(4): 434-438. [路志英. 用小波分析提取云图纹理梯度特征[J]. 模式识别与人工智能, 2000, **13**(4): 434-438.]
- Mumford D. Shah J. Optimal approximation by piecewise smooth functions and associated variational problems [J]. Communication on Pure and Applied. Mathematics, 1989, **42**(9): 577-685.
- Chan T, Vese L. Active contour without edges [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(2): 266-277.
- Zhang Zhi-guo. Brain tumor segmentation based on mumford-shah model level set [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, **39**(12): 1955-1962. [张治国. 一种基于Mumford-Shah模型的脑肿瘤水平集分割算法[J]. 上海交通大学学报, 2005, **39**(12): 1955-1962.]
- Li Jun. Curve Evolution Based Image Segmentation and Applications [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001. [李俊. 基于曲线演化的图像分割方法及应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.]
- Chan T, Vese L. Active contours without edges for vector-valued Images [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, **11**(2): 130-141.
- Chen Wei-ming. Satellite Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [陈渭民. 卫星气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003.]