

基于随机区域合并的自动彩色图像分割算法

辜卫东¹ 李 兵²

(湖北大学计算机与信息工程学院 武汉 430072)¹ (武汉大学国际软件学院 武汉 430072)²

摘要 针对彩色图像分割精度不高的问题,提出了一种具备多尺度空间约束的自动彩色图像分割算法。基于改进的随机区域合并方法,该算法首先实施双边分解并执行基于多通道信息和多尺度梯度的过度分割;然后,在 CIE $L^* a^* b^*$ 颜色空间中使用规范化的颜色直方图来表示每个子区域,构造一个基于过度分割结果的区域邻接图;最后,在区域邻接图上执行具备空间约束条件的随机区域合并策略,为每个尺度构造一张分割图。在 BSDS 图像数据库中进行对比实验,结果表明,在直接视觉对比和量化分析上,相比现有的分割算法,所提方法表现出了更好的分割效果。

关键词 目标检测,随机区域合并,彩色图像分割,图像处理

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.046

Automatic Color Image Segmentation Algorithm Based on Random Region Merging

GU Wei-dong¹ LI Bing²

(School of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430072, China)¹

(International School of Software, Wuhan University, Wuhan 430072, China)²

Abstract In order to solve the problem of low segmentation accuracy for color image, a new algorithm for automatically segmenting color image with multi-scale spatial constraints was proposed. Based on the improved random region merging method, this algorithm firstly implements the bilateral decomposition and performs the over segmentation based on the multi-channel information and the multi-scale gradient. Then, in the CIE $L^* a^* b^*$ color space, a normalized color histogram is adopted to represent each sub-region. Finally, a stochastic region merging strategy with spatial constraints is constructed on the region adjacency graph to construct a segmentation graph for each scale. The experimental results in BSDS image database demonstrate that the proposed method has better segmentation performance than existing algorithms.

Keywords Object detection, Random region merging, Color image segmentation, Image processing

目前,各种图像和视频的采集与处理技术取得了很大的进步,涉及的领域包括工程、医学、安防、环境和体育。图像分割是机器视觉处理中特征提取和目标识别的关键步骤,在图像工程中占据着重要的位置,其目的是把图像分成各具特性的区域并提取出感兴趣的目标。合理的图像分割有助于更好地进行图像的识别和理解^[1-5]。由于彩色信息常携带着用于区分不同区域的重要信息,因此,相比于灰度信息,许多研究都专注于彩色图像分割。一般地,彩色图像分割方法有^[6-14]:基于阈值的方法、基于边缘的方法、基于区域的方法、基于聚类的方法、混合方法。本文主要对分尺度的分割方法进行研究,因为它有利于识别不同级别的分辨率的图像,从而产生了比单尺度方法更精确的分割。

在分尺度自下而上的分割方法中,有一种重要的类型是区域合并技术。基于区域合并的分割方法被广泛应用于彩色图像分割中,该方法可简单描述为逐次将足够相似的两相邻区域合并以生成新区域,直至达到合并终止条件。这种方法

依赖于本地合并决策,以区域特性为基础。从初始分区或像素集合开始,迭代合并区域,直到达到停止标准为止。因此,在设计区域合并的算法时,必须考虑以下 3 个重要因素:1) 合并标准,定义了合并两个区域的成本;2) 合并顺序,决定了基于合并准则的区域合并顺序;3) 区域描述,以定量的方式表现出一个区域的属性。文献[7]提出了一种基于随机区域合并策略的图像分割算法,该算法有效提高了分割的速度和精度,对于一些纹理区别不是很明显的彩色图像,可以得到不错的分割效果,但是对于纹理复杂的图像,类似的方法则无法达到很好的效果。文献[8]提出了一种基于分水岭算法的彩色图像分割策略,该算法将直方图均衡化和分水岭算法进行了有效结合。文献[9]提出在特别定义的模糊 c 成本函数中,通过自适应调整权重来实现图像区域的合并。文献[10]提出了一种新的两阶段过程区域合并技术,并以此实现了交互式图像的分割。通过以上分析可以看出,现有的基于区域合并的彩色图像分割算法大都采用粗-精分割策略,通过引入能量泛

到稿日期:2017-07-05 返修日期:2017-10-28 本文受国家重点研发计划(2016YFB0800401),国家重点基础研究发展计划(2014CB340401),国家自然科学基金(61572371),武汉市黄鹤英才(专项)计划资助。

辜卫东(1968—),男,实验师,主要研究方向为计算机应用、图像处理等,E-mail:gwd0915@163.com(通信作者);李 兵(1967—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为算法设计等。

函、分水岭、模糊聚类等约束来达到最优的分割效果。此类分类算法虽然能够一定程度地减少过分割区域,但直接对粗分割结果进行合并会导致较大的时间开销,对于较为复杂的彩色图像,其最终的分割结果仍然含有相当数量的子区域,依然未能很好地解决过分割问题。虽然一些算法在后期的区域合并过程中通过简单的人工标注引导区域合并,但其只有在人工监督的条件下才能获得理想的结果,难于满足自动化要求较高的机器视觉和模式识别等的要求。

因此,本文提出一种基于改进的随机区域合并策略的自动区域合并技术,该技术可以在多尺度的空间约束条件下运行,从而改善分割结果。在该方法中,彩色图像分割过程可以分尺度地表现出图像内容,随着尺度的增加可以提供更多的细节。在分割过程中,充分利用区域内部的各种特征,结合相邻的区域进行分割,以反映图像内的局部结构特点。可以看出,本文提出的方法采用了局部结构、颜色信息和图像内容的多尺度分解,分为3个主要步骤。首先,实施双边分解,利用多通道信息和多尺度梯度来执行一个过度分割的过程;其次,在原始图像的区域邻接图表示中,运用颜色直方图来表示每个子区域,以卡方距离来表示区域可能合并的准则以及在不同尺度上的表现,从而提取关键信息;为每个尺度执行具备多尺度约束条件的随机区域合并策略,实现分割合并过程。大量定性和定量实验的结果显示,所提算法具有较好的图像分割效果。

1 基于改进的随机区域合并策略的自动区域合并技术

本文提出了一种基于改进的随机区域合并策略的自动区域合并技术,该方法利用彩色图像随着尺度的增加可以提供更多细节的特性,充分利用区域内部的各种特征,结合相邻的区域进行分割,以反映图像内的局部结构特点。本文提出的方法采用了局部结构、颜色信息和图像内容的多尺度分解,包括3个主要步骤:尺度空间分解、随机过度分割和随机合并过程。

1.1 尺度空间分解

首先,运用二次回归的双边尺度空间方法对彩色图像进行多尺度的分解^[12],以分离多尺度的细节。相比现有的线性和非线性尺度空间,迭代双边尺度空间在粗糙尺度结构上可以很好地保存并且定位。

对于一幅给定的图像 I ,双边尺度空间由派生的图像集合 I_j 来定义。 I_j 的定义如式(1)~式(3)所示^[12]:

$$I_j(\underline{x}) = \frac{\sum_W \omega_p(\underline{x}, W) \omega_s(\underline{x}, W) I_{j-1}(\underline{x})}{\sum_W \omega_p(\underline{x}, W) \omega_s(\underline{x}, W)} \quad (1)$$

其中, $I_0 = I$, $\underline{x} = (x, y)$, j 表示尺度参数, W 定义为本地邻居, ω_p 和 ω_s 分别表示在 \underline{x} 上的高斯光度和空间权重。

$$\omega_p(\underline{x}, W) = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\|\underline{x} - W\|}{\sigma_s}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$\omega_s(\underline{x}, W) = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\|I_{j-1}(\underline{x}) - I_{j-1}(W)\|}{\sigma_p}\right)^2\right] \quad (3)$$

其中, σ_s 为光度系数, σ_p 为空间系数。在尺度-空间分解之后,每个像素 I_j 都要在本地窗口 W 内通过基于模型的回归重新估算。本地二次曲面模型为 $I_j(x, y) = p_1 x^2 + p_2 y^2 + p_3 xy + p_4 x + p_5 y + p_6$, 其中二次曲面参数 $p_k = 1, \dots, 6$ 通过最小平方拟合窗口内的数据计算得出。该数值的重新估算归因于图

像中光照的变化。图1给出了双边分解过程的一个实例,其中图1(a)为原始图像,图1(b)~图1(e)为图像分解的4个尺度(从细到粗)。另外,尺度参数设置得越大,将允许进行更多的合并,所生成分割结果中区域的面积越大,分割尺度越粗;反之,尺度参数越小时,分割区域面积越小,分割尺度越细。通过设置不同的尺度参数来生成多尺度的分割结果。

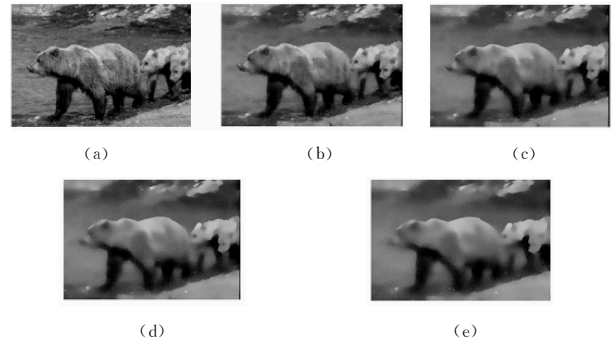


图1 双边分解的实例

Fig. 1 Example of bilateral decomposition

1.2 随机过度分割

基于改进的随机区域合并策略,本文提出了一种随机多通道过度分割的方法。该方法考虑到了通道 R、G 和 B 的颜色信息、最大的区域尺寸以及多尺度的最大梯度,以便过度分割原始图像。假定图像像素有 8 个连接,并且定义了一张网络图,在图像中每个像素 $I(x, y)$ 最初都是一个节点,其 8 个邻居通过网络图的边连接到 $I(x, y)$ 。

首先,假定每个像素都是一个区域,因此得出一张区域邻接图,用于表示像素之间的关系。过度分割的过程是原始的彩色图像上的一个独立运行的步骤,每个子区域都由其像素的平均彩色值来表示。对每个通道的子区域相似度进行分析,用于区别强度,因此根据式(4)中计算的参数 α 来选择合并区域:

$$\alpha(R_a, R_b) = \exp\left[-\frac{(E[R_a] - E[R_b])^2}{\Delta(R_a, R_b)}\right] \quad (4)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示在一个区域(比如 R_a 或 R_b)内的元素(像素)期望值, Δ 表示统计区域合并系数,如式(5)所示:

$$\Delta(R_a, R_b) = \frac{D_I^2 \ln(\Phi(I)^2) (\Phi(R_b) + \Phi(R_a))}{2Q\Phi(R_a)\Phi(R_b)} \quad (5)$$

其中, Q 表示正则项, D_I 表示 I 的动态范围, $\Phi(\cdot)$ 表示在自变量中的像素数量。当在区域邻接图中分析一条边时,对每个通道(R、G 和 B)的合并参数 α 进行计算,只有当每个参数 α 都大于在区域 $[Th_i, 1]$ 内均匀分布的随机阈值时,才会对区域进行合并,新的区域由 R_a 或 R_b 的平均颜色表示。

过度分割的步骤仅实施一次并产生子区域,随后便以不同方式对这些子区域进行合并,以产生最后的分割结果。实验中运用了正则化参数 $Q=100$, 动态范围 $D=256$ 。

1.3 随机合并过程

使用区域邻接图来体现子区域,在标准化的颜色直方图之间使用卡方距离来合并子区域,并且在不同的表现尺度上提取多尺度的空间约束条件。在过度分割图中创建区域邻接图时,采用各种尺度下的归一化颜色直方图的卡方距离来计算边权重。为了判断与一条边相关的两个区域是否需要合并,该方法使用了尺度为 j 的图像区域直方图,通过式(6)的

参数 α_j 来衡量区域的相似度:

$$\alpha_j(R_a, R_b) = \exp\left[-\frac{(\chi^2(H_a, H_b))^2}{\Delta_j(R_a, R_b)}\right] \quad (6)$$

其中, χ^2 表示区域 R_a 和 R_b 的 CIE L* a* b* 归一化颜色直方图 H_a 和 H_b 之间的卡方距离。

式(7)定义了统计区域合并系数 Δ_j :

$$\Delta_j(R_a, R_b) = \frac{\ln(\Psi(M)^2)}{2Q} \left[\frac{1}{\Psi(R_a)} + \frac{1}{\Psi(R_b)} \right] \quad (7)$$

其中, M 表示分割图; $\Psi(\cdot)$ 表示元素的数量, 将分割图中的每个子区域视为一个元素。因此, 当 M 作为过度分割图时, $\Psi(M)$ 等于分割图 M 中子区域的数量, $\Psi(R) = 1$ 作为合并过程的起点。只有当合并参数 α_j 大于在范围 $[Th_i, 1]$ ($Th_i = 0.37$) 内均匀分布的随机阈值时, 才会对区域进行合并。因此, 本文应用这种随机的方法将分割区域与其他区域进行合并, 并为每个尺度的双边分解提供一个分割结果。实验中设置了正则化参数 $Q = \{1, 2, 4, 8, 16\}$ 和 5 个尺度。

空间约束的主要目标是检测区域邻接图的边, 这些区域在粗糙尺度中没有被合并, 而且在较低尺度中也不该被合并。因此, 这种方法提取了在较粗糙尺度 j 上的多尺度空间约束, 并且将这些空间约束应用于之前的尺度 $j-1$ 中。这些约束条件表示: 尺度 $j-1$ 下实际图像区域邻接图的边, 不会在子区域的合并过程中被估算。利用空间约束分割所有尺度的图像, 以保留跨尺度空间区域的一致性, 同时多尺度分割结果可以避免重复执行相同的分割过程, 提高了区域合并方法的应用效率。在得到一张过度分割图后, 利用该分割图的区域邻接图来分割每个尺度的表示, 并且得到多尺度空间约束, 以便引导子区域的合并过程。因此, 若其权重值均大于尺度参数, 则合并结束, 生成该尺度参数控制下的分割结果。在多尺度空间约束下, 图 2(a) — 图 2(c) 分别给出尺度 j 、尺度 $j-1$ 和尺度 1 下的分割结果。

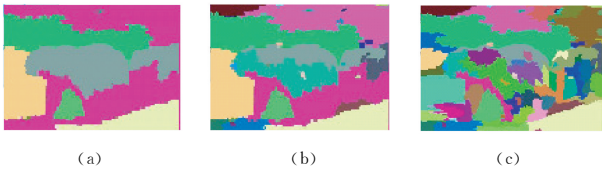


图2 使用空间约束的分割过程

Fig. 2 Segmentation process using space constraints

2 算法流程

本文提出的分割算法的流程如图 3 所示。

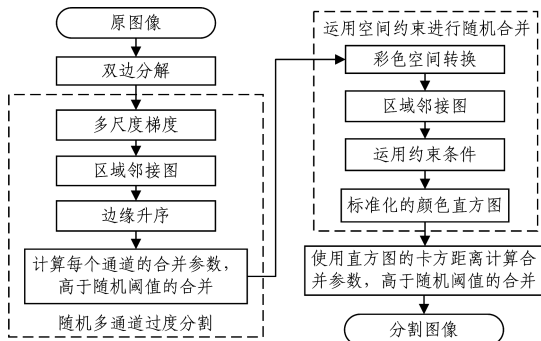


图3 彩色图像分割方法的流程

Fig. 3 Process of color image segmentation

3 实验测试

本文在 BSDS 图像分割数据库中对所提方法进行了定性和定量的实验测试, 以验证其有效性和准确性。图像数据库中彩色图像的大小均为 321×481 , 并给出了每一幅图像的人工标准分割结果。实验平台为 Windows 7 操作系统, CPU 为 Pentium Dual-Core E5200 处理器, 2 GB 内存, 仿真环境为 Matlab 7. 8。

3.1 多尺度分割结果的对比

为了更加直观地呈现所提算法对彩色图像处理的有效性, 图 4 给出了所提算法对 BSDS 图像分割数据库中一幅图像的多尺度分割结果, 其中, 图 4(a) 为原始图像, 图 4(b) — 图 4(d) 分别为较细、中等和粗糙等级的分割结果。从图中可以看出, 随着分割尺度等级的不断增加, 划分得到的区域越来越小, 而它们往往对应于不同尺度下更小的图像感知区域。例如, 随着图 4(a) 基于尺度区域被逐渐分割, 树木的枝叶、头发等细节被逐渐显现出来。因此, 本文提出的算法能够在多尺度下对彩色图像进行不同精度等级的有效分割。同时, 本文算法由于综合了颜色空间的特征和子区域关系特征, 因此分割结果与人的视觉特性具有良好的一致性。

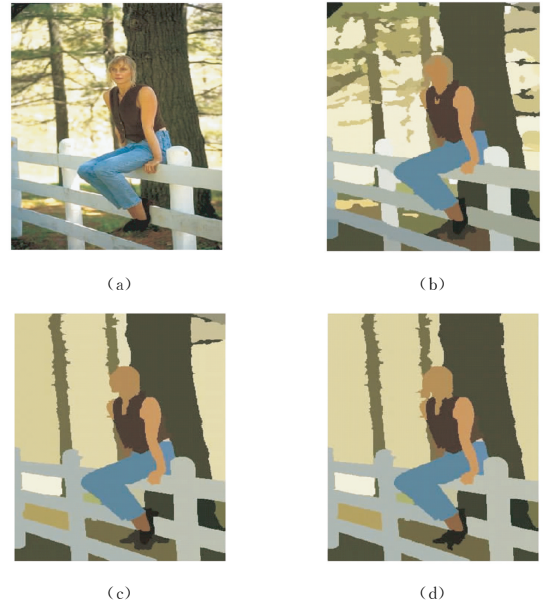


图4 所提算法的多尺度分割结果

Fig. 4 Multiscale segmentation results of proposed algorithm

3.2 定性与定量比较

为了对分割结果进行量化评价, 采用了概率边缘指数 PRI (Probabilistic Rand Index)^[13]、信息变化指数 VoI (Variation of Information)^[14] 和区域重叠率 co-ver^[12] 来评价所提算法的客观分割效果, 即与人工分割结果之间的区域误差程度。概率边缘指数 PRI 的计算公式如下:

$$PRI(S, GS) = \frac{1}{T} \sum_{i < j} [c_{ij} p_{ij} + (1 - c_{ij})(1 - p_{ij})], \quad (8)$$

$$i \in S, j \in GS$$

其中, c_{ij} 为像素点对具有相同区域序号时的事件, p_{ij} 为其相应的事件概率, T 为像素点对的总数。概率边缘指数 PRI 的

数值越大,分割效果越好,即与人工标准分割的结果越相似。

信息变化指数 VoI 的计算公式如下:

$$VoI(S,GS) = H(S) + H(GS) - 2I(S,GS) \quad (9)$$

其中, H 为熵计算, I 为两者的互信息计算。信息变化指数 VoI 的数值越接近 0 越好。

在 cover 计算过程中,设 S 表示分割结果中区域的集合, GS 表示人工分割结果中区域的集合,两者之间的区域重叠率 cover 可以通过下式进行计算:

$$cover(S,GS) = \frac{1}{N} \sum_{R \in S} |R| \times \max_{GR \in GS} O(R,GR) \quad (10)$$

其中, $|R|$ 表示区域 R 中像素点的总数, N 表示图像中像素点的总数, $O(R,GR)$ 的计算公式如下:

$$O(R,GR) = \frac{|R \cap GR|}{|R \cup GR|} \quad (11)$$

cover 的数值结果在 $[0,1]$ 之间,数值越接近于 1 表示分割结果越好,即与人工标准分割的结果越相似。

在 BSDS 图像分割数据库中的一幅图像上进行对比实验,当区域个数设置为 10 时,分割对比结果如图 5 所示。图 5(a) 为原始图像,图 5(b) 为文献[8]中方法的分割结果,图 5(c) 为文献[9]中方法的分割结果,图 5(d) 为文献[10]中方法的分割结果,图 5(e) 为本文算法的分割结果。从图 5 可以看出,相比其他 3 条文献中的分割算法,所提算法的分割结果最接近于人工分割结果。文献[8]中的算法造成了许多不合理的划分,其主要原因是基于分水岭算法的彩色图像分割策略使得子区域较多,进行区域合并时出现了过分割;而本文算法采用了随机区域合并技术,避免了过分割现象,取得了较理想的分割结果。

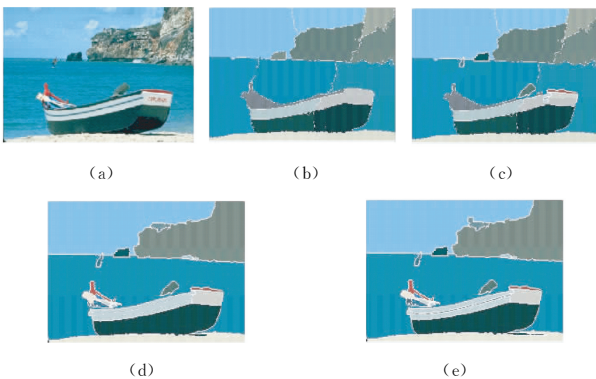


图 5 图像分割结果的对比

Fig. 5 Comparison of image segmentation results

在 BSDS 图像分割数据库中随机选取了 100 幅彩色图像,分别采用其他 3 种算法^[8-10]和本文算法进行了分割实验。表 1 列出了 4 种算法的概率边缘指数 PRI、信息变化指数 VoI 和区域重叠率 cover 的实验结果,并给出了分割 100 幅图像时各算法的平均运行时间。从表 1 中的数据可以看出,在 3 个指标上,本文分割算法均表现出了更好的性能。另外,虽然本文方法采用了局部结构、颜色信息和图像内容的多尺度分解,增加了算法的时间复杂度,但相较于其他基于区域分割的算法具有更高的分割精度与准确度。

表 1 彩色图像分割的评价指标对比

Table 1 Comparison of evaluation indexes of color image segmentation

算法	PRI	VoI	cover	时间/s
文献[8]方法	0.57	2.13	0.38	22.6
文献[9]方法	0.61	1.93	0.42	25.1
文献[10]方法	0.75	1.71	0.58	46.3
本文方法	0.84	1.64	0.63	35.2

结束语 本文提出了一种基于随机区域合并的自动分割彩色图像的算法,其具备空间结构特征约束。该算法运用了尺度-空间信息来定义和应用空间约束,能够在多个尺度上对彩色图像进行精确的分割。在分割过程中,充分利用区域内的各种特征,结合相邻的区域进行分割,以反映图像内的局部结构特点。采用 BSDS 标准彩色图像库进行分割实验,定性与定量的实验结果表明,在 cover, PRI 和 VoI 3 个指标上,本文提出的方法虽然采用了局部结构、颜色信息和图像内容的多尺度分解而增加了算法的时间复杂度,但相对其他基于区域分割的算法具有更高的分割精度与准确度。后续研究将从实践应用的角度对该算法进行更加深入的分析并加快分割的速度,同时在分割过程中加入先验知识等以进一步提高分割精度。

参考文献

- [1] WU D, HU S, HU L Z, et al. FSVM color image segmentation based on visual attention and improved membership[J]. Application of Computer System, 2017, 24(1): 1123-1134. (in Chinese) 吴迪, 胡胜, 胡灵芝, 等. 基于视觉注意和改进隶属度的 FSVM 彩色图像分割[J]. 计算机系统应用, 2017, 24(1): 1123-1134.
- [2] PENG J, ZHOU X Z, LEI Y J. Color image segmentation based on prior color covariance constraint[J]. Computer Engineering, 2017, 43(4): 251-256. (in Chinese) 彭浩, 周新志, 雷印杰. 基于先验色彩协方差约束的彩色图像分割[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 251-256.
- [3] LENG J W, SHEN F T. Hydrological image segmentation based on HSV color model and regional growth method[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 223-228. (in Chinese) 冷建伟, 沈芳婷. 基于 HSV 色彩模型与区域生长法的水文图像分割[J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 223-228.
- [4] CHEN K, CHEN F, DAI M, et al. Two-dimensional entropy multi-threshold image segmentation based on firefly algorithm [J]. Optical Precision Engineering, 2014, 22(2): 517-523. (in Chinese) 陈恺, 陈芳, 戴敏, 等. 基于萤火虫算法的二维熵多阈值快速图像分割[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 517-523.
- [5] SZCZYPI, SKI P, KLEPACZKO A, et al. Texture and color based image segmentation and pathology detection in capsule endoscopy videos[J]. Computer Methods & Programs in Biomedicine, 2014, 113(1): 396-411.
- [6] KHAN A, ULLAH J, JAFFAR M A, et al. Color image segmentation: a novel spatial fuzzy genetic algorithm[J]. Signal, Image and Video Processing, 2014, 8(7): 1233-1243.

0.9646,是一种有效的高光谱遥感地物分类方法。目前的方法中,像元的邻域是一个固定的方形结构。下一步工作中,将通过设计像元的自适应邻域结构,来更深入地挖掘高光谱数据的空间信息,从而进一步提高分类精度。

参 考 文 献

- [1] JOSE M B, ANTONIO P, GUSTAU C V, et al. Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(2): 6-36.
- [2] 张良培, 杜博, 张乐飞. 高光谱遥感影像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] OLSHAUSEN B A, FIELD D J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images [J]. *Nature*, 1996, 381(6583): 607-609.
- [4] CHEN Y, NASRABADI N M, TRAN T D. Hyperspectral image classification using dictionary-based sparse representation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3973-3985.
- [5] YUAN H L, TANG Y Y, LU Y, et al. Hyperspectral Image Classification Based on Regularized Sparse Representation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(6): 2174-2182.
- [6] CUI M, PRASAD S. Class-Dependent Sparse Representation Classifier for Robust Hyperspectral Image Classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(5): 2683-2695.
- [7] SONG X F, JIAO L C. Classification of Hyperspectral Remote Sensing Image Based on Sparse Representation and Spectral Information [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2012, 34(2): 268-272. (in Chinese)
宋相法, 焦李成. 基于稀疏表示及光谱信息的高光谱遥感图像分类[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(2): 268-272.
- [8] ROBERT T. Regression shrinkage and selection via the lasso [J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 1996, 58(1): 267-288.
- [9] ELAD M. *Sparse and Redundant Representations* [M]. Heidelberg: Springer, 2010.
- [10] CHARLES A S, OLSHAUSEN B A, ROZELL C J. Learning sparse codes for hyperspectral imagery [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(5): 963-978.
- [11] CASTRODAD A, XING Z, GREER J B, et al. Learning discriminative sparse representation for modeling, source separation, and mapping of hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4263-4281.
- [12] ALI S F, HAMID R R, SEYYED A H. Spatial-Aware Dictionary Learning for Hyperspectral Image Classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 53(1): 527-541.
- [13] MAIRAL J, BACH F, PONCE J, et al. Online learning for matrix factorization and sparse coding [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2010, 11: 19-60.
- [14] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: A library for support vector machines [J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2011, 2(3): 1-27.
- [15] YANG J C, YU K, GONG Y H, et al. Linear Spatial Pyramid Matching using Sparse Coding for Image Classification [C] // *Proceedings of 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2009: 1794-1801.
- [16] CULPEPPER B J, SOHL D J, OLSHAUSEN B A. Building a better probabilistic model of images by factorization [C] // *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2011: 2011-2017.
- [17] 罗小波, 赵春晖, 潘建平, 等. 遥感图像智能分类及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [18] 中国科学院空间应用工程与技术中心. 载人航天空间应用数据推广服务平台 [EB/OL]. http://www.msadc.cn/t1-cms/t1/dataProduct/dataProduct_dxzb_list.jsp.
- [19] UPV/EHU. Hyperspectral Remote Sensing Scenes [EB/OL]. http://www.ehu.eus/ccwintco/index.php?title=Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes.
- [20] KRZYWINSKI M. *Circos* [EB/OL]. <http://circos.ca>.
- [7] WONG A, SCHARCANSKI J, FIEGUTH P. Automatic skin lesion segmentation via iterative stochastic region merging [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2011, 15(6): 929-936.
- [8] BORA D J, GUPTA A K. A New Efficient Color Image Segmentation Approach Based on Combination of Histogram Equalization with Watershed Algorithm [J]. *International Journal of Computer & Engineering*, 2016, 4(6): 156-167.
- [9] RAJABY E, AHADI S M, AGHAEINIA H. Robust color image segmentation using fuzzy c-means with weighted hue and intensity [J]. *Digital Signal Processing*, 2016, 51(7): 170-183.
- [10] ZHOU C, WU D, QIN W, et al. An efficient two-stage region merging method for interactive image segmentation [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2016, 54(15): 220-229.
- [11] VASQUEZ D, SCHARCANSKI J, WONG A, et al. A novel 3D approach for the extraction of the wetting front in CT images of soil profiles [C] // *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE*, 2013: 1540-1543.
- [12] JYOTIBORA D, GUPTA A K. A New Approach towards Clustering based Color Image Segmentation [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, 107(12): 23-30.
- [13] SAĞ T, CUNKAS M. Color image segmentation based on multiobjective artificial bee colony optimization [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 34(C): 389-401.
- [14] SUN H J, DENG T Q, LI Y C. Improved watershed image segmentation algorithm [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(7): 857-864. (in Chinese)
孙惠杰, 邓廷权, 李艳超. 改进的分水岭图像分割算法 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(7): 857-864.

(上接第 282 页)