

基于特征灰度和分水岭变换的甲藻横沟区域分割

乔小燕

(山东工商学院数学与信息科学学院 烟台 264005)

摘 要 针对分水岭变换存在的过分割问题,提出了一种新的图像分割方法。该方法利用灰度包容球获取图像特征灰度集合,通过降低图像中灰度级数目减少无意义的局部极小值区域,对灰度重构后的梯度图像极小值区域采用自动阈值法进行标记并对标记加以质心、形状和面积约束,对修改后的梯度图像采用分水岭变换实现甲藻显微图像中横沟区域的分割。实验证明,该方法可比传统方法更合理地分割出横沟区域,有效抑制了过分割现象。

关键词 赤潮藻,显微图像分割,分水岭变换

中图法分类号 TP391.4 **文献标识码** A

Method of Pyrrophyta Cingulum Segmentation Based on Dominant Gray Levels and Watershed Transform

QIAO Xiao-yan

(College of Mathematic and Information Science, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China)

Abstract To tackle the over-segmentation problem in watershed algorithm, a method based on dominant gray levels and constraint marker watershed was proposed to extract cingulum region. In this algorithm, original image was reconstructed by dominant gray levels, eliminating local minima and noise disturber. Then markers of regional minima were extracted from gradient image by using auto-threshold, and imposed by shape, area and centroid constraints. The watershed transform of the maker-modified gradient image was performed to achieve the cingulum region segmentation. Simulation results show that the new scheduling algorithm has the benefits of less over-segmentation areas, the more accurate segmentation result and higher flexibility compared to the traditional algorithms.

Keywords Harmful algae, Microscopic image segmentation, Watershed transform

1 引言

有害赤潮是世界性的一大生态灾害,也是国际社会共同关注的重大海洋环境问题^[1]。鉴于赤潮对海洋环境和人类健康的负面影响,对有害赤潮进行自动识别以便有效预防和快速鉴定赤潮就显得尤为重要。赤潮生物的种类和数量是决定赤潮危害程度的关键因素,因此快速有效地鉴定赤潮主要藻种是赤潮自动监测的一个重要环节,其中依据藻类形态结构特征所进行的显微图像识别方法是一种发展潜力大而且很实用的方法^[2]。

利用机器视觉技术分析和处理海洋浮游生物的研究开始于 20 世纪 80 年代,其主要是采用图像处理方法对浮游生物的轮廓尺寸进行简单测量、分类和计数。欧共体最早启动了“硅藻识别和分类的自动系统(ADIAC)”在硅藻玻片的自动扫描、标本图像处理及模式识别技术应用等方面开展了大量工作,实现了淡水硅藻的自动识别和分类,初步建立了硅藻鉴定的专家系统^[3];英国普利茅斯研究组^[4]在“人工神经网络甲藻鉴定(DiCANN)”课题中,采用离散傅立叶变换、二阶统计量和 Gabor 小波变换提取目标形状及纹理特征。美国伍兹霍尔海洋研究所研究人员 Davis^[5]与 Tang^[6]等利用水下拖曳式浮游生物摄像机记录设备(Video Plankton Recorder, VPR)实时

采集水下浮游动物图像,对目标及悬浮颗粒的外形、轮廓等进行简单测量分类,提出了按灰度等级对像素粒度进行划分的特征提取方法。

由上可见,藻种识别方法所涉及的特征提取技术均是对藻种外形、轮廓、纹理等参数的测量,并未针对藻种本身的生物形态学信息进行研究。实际上,如图 1 所示,赤潮藻细胞的形状是分类的首要特征;其次,其角毛、横沟和壳面花纹等细节特征也是准确有效识别和分类的关键所在。本文将主要研究一种可精确分离藻种横沟区域的图像分割算法。

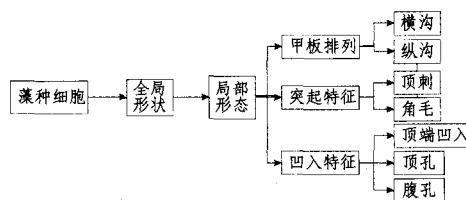


图 1 甲藻藻种生物形态学分类

在众多的图像分割方法中,分水岭变换因其计算速度快,且能够产生闭合的单像素宽区域轮廓而受到广泛应用^[7]。然而,将分水岭变换直接用于梯度图像时仍然会产生过分割问题:由于噪声和梯度的局部不规则性使图像中存在很多极小值点,致使分割结果淹没在大量的不相关结果中。如何解决

本文受国家自然科学基金(11171191)和山东省高等学校科研计划项目(J11LG13)资助。

乔小燕(1982—),女,博士,讲师,主要研究方向为图像处理与模式识别,E-mail:mihaohao@126.com。

过度分割问题是分水岭变换研究的热点之一,许多学者在分水岭算法的各个阶段进行了多方面的改进。

数学形态学中的开闭重建滤波器^[8]被广泛地应用于分水岭分割与处理阶段,开闭运算能滤除噪声和复杂细小的纹理,重建过程能恢复目标大的轮廓,简化图像的同时保留了图像的主要轮廓。T. Yaakov 等人^[9]提出从梯度图像的低频成分中提取目标内的局部极小区,然后将这些局部极小区作为标记点进行分水岭分割,这种方法能较精确地标记出目标区域内部的极小区,使分割的边界更为准确,可有效地消除噪声点。K. Haris 等人^[10,11]在分水岭分割后进行了层次性区域合并,但是由于所得区域过多,融合过程计算量大,很难找到最优的区域合并准则,因此在分割前尽量抑制噪声和细密纹理的影响,同时保留重要轮廓信息,合理降低区域数目才是解决过分分割问题的关键。本文采用了一种获取图像特征灰度集合的方法,其通过有效地降低图像中总灰度数来消除噪声,从而在分水岭变换之前尽可能减少无意义的局部极小值区域的数目。

2 横沟特征分析

横沟是单细胞赤潮藻(甲藻)的重要生物学特征,该类藻种体形结构多为一个横沟将细胞分为上、下两半;纵沟位于腹面与横沟相交处并向上下延伸,延伸的程度则依种类而异,有的可达下壳^[12]。图2展示了具有横沟这类生物特征的甲藻藻种。

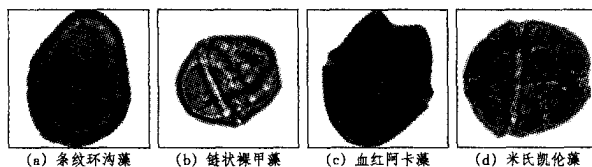


图2 有横沟特征的甲藻藻种示意图

横沟区域的几何形状、灰度特性等特征往往可作为感兴趣区域提取的先验知识,观察图2可发现横沟特征具体表现在图像上:①一般亮度较高(灰度值较大);②在亮度较高的所有区域中所占面积通常较大且呈环带状;③位于细胞体中部或中部略偏。

对图像中横沟区域的提取,难点在于如何将横沟区域从那些与它交叠的细胞体致密组织中分割出来,既能去除致密组织形成的高亮背景区域,又能保留形状及特征与横沟类似的区域。

3 横沟区域分割

3.1 特征灰度

根据对横沟区域综合分析,本文采用了选取图像的特征灰度值集合^[13]的方法降低图像中的灰度值数目,使与横沟区域灰度相似的区域归类到同一个灰度值下,有利于后续的分割工作。

要确定特征灰度值集合 Y , 须依照两个原则,首先是主成分原则,其次是灰度相容原则。主成分原则保证特征灰度集合 Y 中的 k 个灰度值代表了图像中灰度的主成分分布;灰度相容性原则要求各特征灰度在灰度空间中具有相对均匀的分布,即使各灰度值之间有较大的差异性。这里使用了灰度相容球体的方法,即每种特征灰度值拥有一个半径为 R 的球体

空间,通过将原图中在此空间内的灰度全部归并为该特征灰度对图像进行重构。各特征灰度彼此间距大于 R , 即

$$\{d(y_m, y_n) > R, y_m \neq y_n \in Y\}$$

显然,相容范围越大,即 R 越大,特征灰度的数量越少。

假定图像中共有 N 种灰度值,给定相容球体半径 R , 根据上面提出的两个原则,按以下算法确定特征灰度集合:

①统计图像中各灰度 $y_n, n \in [1, 2, \dots, N]$ 的出现次数,得到直方图 $P(y_n)$;

②将 $P(y_n)$ 按降序排列,得到灰度值序列 $y_1', y_2', \dots, y_N'$;

③从出现频率最多的灰度值 y_1' 开始,以 y_1' 为中心,将相容球体内的灰度归并,对剩余灰度,仍从最大频率灰度开始归并其相容球体内的颜色,反复迭代进行该归并过程,直到 N 种灰度值全部处理完毕;

④将得到的特征灰度记录在集合 Y 中,即为特征灰度集合;

⑤将图像中各像素的灰度值量化为与之最邻近的特征灰度值,对原图像进行重构。

执行该算法后,得到的新图像中仅有几种灰度值,与感兴趣区域灰度值相似的目标区域被赋予了相同的特征灰度。

3.2 分水岭变换

分水岭变换(Watershed Transformation)^[8]将图像看成是一幅地形图,灰度图像可被视为地形表面,图像中每个像素的灰度代表该点的海拔高度,每个局部极小值及其影响区域称为蓄水盆地,通过建造蓄水盆地的堤坝完成图像分割。

在使用分水岭变换之前,通常要使用梯度幅度来预处理图像。形态学梯度使输入图像中灰度级的跃变更加急剧,对于图像 $f(x, y)$, 结构元素 $S(x, y)$, 形态学梯度 $g(x, y)$ 为

$$g(x, y) = f(x, y) \oplus S(x, y) - f(x, y) \ominus S(x, y) \quad (1)$$

因为对称性结构元素具有同向同性,所以可以消除梯度对边缘方向的依赖性,本文中选用圆盘状结构元素。

3.3 约束标记控制

图像中灰度值数目降低虽然消除了大部分的区域极值和噪声,但是还会存在一些与横沟区域无关的极小值点,它们仍然会导致目标被分割成许多细小区域。若在进行分水岭变换之前能得到属于感兴趣目标的像素点,用这些点来抑制与感兴趣目标无关的极小值点,就可以有效地避免过分分割现象。

本文选取阈值法对梯度图像 $g(x, y)$ 进行标记提取,获取属于感兴趣目标的点。首先检测梯度图像中所有局部极小值点,判断每个极小值点是否大于指定阈值,将大于阈值的点标记出来。经过上述处理,得到一幅二值图像 $g_t^{bin}(x, y)$, 该二值图像的前景像素标记了在阈值为 t (t 为非负整数) 时的深局部最小值位置,即

$$g_t^{bin}(x, y) = \begin{cases} 1, & g(x, y) > t \\ 0, & g(x, y) \leq t \end{cases} \quad (2)$$

横沟区域在显微图像中呈现高亮度特性,灰度比背景区域大,获取图像特征色集合后,可采用自动阈值法^[14]求得用于提取标记的阈值 t 。此时得到的控制标记符包含了与横沟区域灰度值近似的其他局部极小值区域,通过对横沟区域的生物形态学特征分析,本文对标记加以3个约束条件:

①面积约束:采用各标记符区域 g_t^{bin} 的面积与细胞体面积比值作为约束:

$$\frac{S_{g_{r,t}^{bin}}}{S_{cell}} > Th_s \quad (3)$$

式中, Th_s 为面积阈值。

②质心位置约束:由于横沟位居在细胞体中部或中部略前,采用各标记子区域 $g_{r,t}^{bin}$ 质心与细胞体质心的距离作为约束:

$$\frac{\|(\bar{x}_{cell}, \bar{y}_{cell}) - (\bar{x}_{g_{r,t}^{bin}}, \bar{y}_{g_{r,t}^{bin}})\|}{rec_L} < Th_d \quad (4)$$

式中, $(\bar{x}_{cell}, \bar{y}_{cell})$ 为细胞区域的质心位置, $(\bar{x}_{g_{r,t}^{bin}}, \bar{y}_{g_{r,t}^{bin}})$ 为第 r 个标记符区域的质心位置, rec_L 为细胞区域的最小外接矩形的长, Th_d 为经验阈值(一般取 $Th_d = 0.4$)。

③形状约束:由于横沟为环带状区域,因此采用各标记符区域 $g_{r,t}^{bin}$ 的最小外接矩形的长宽比作为约束:

$$\frac{L_{g_{r,t}^{bin}}}{W_{g_{r,t}^{bin}}} > Th_l \quad (5)$$

式中, Th_l 为形状阈值。

接下来借助数学形态学强制最小技术^[7],将约束标记控制后保留的局部极小值点作为标记点来修改梯度图像,以便局部最小区域仅出现在标记的位置,其他像素灰度按需要“上推”,屏蔽掉原先所有的局部最小值。最后,对修改的梯度图像进行分水岭变换。

3.4 算法描述

综上所述,基于约束标记控制的分水岭变换细胞横沟区域分割算法的完整描述如下:

①图像预处理:确定原始图像 I 的灰度特征集合,并将其重构为灰度特征图像 I_{rep} ;

②求取梯度图像:根据式(1),得到图像 I_{rep} 的形态学梯度图像 $g(I_{rep})$;

③标记控制:阈值法对梯度图像 $g(I_{rep})$ 进行标记提取,获取属于感兴趣目标的候选区域集合 $\{g^{bin}(I_{rep})\}$;

④约束标记:对得到的候选区域 $\{g^{bin}(I_{rep})\}$ 采用约束准则,删除不符合约束条件的局部极小值区域;

⑤极小值标定:将约束标记控制后保留的局部极小值区域 $\{g^{bin}(I_{rep})\}$ 作为标记点来修改梯度图像;

⑥分水岭变换:对修改后的梯度图像 $g'(I_{rep})$ 进行快速分水岭变换。

4 实验结果

本文以条纹环沟藻和链状裸甲藻显微图像为例与传统分水岭变换、标记控制分水岭变换方法对比,来验证本文算法的有效性。图3与图4分别为两种藻种横沟提取结果,在图3中,(a)为原始灰度图像;(b)为不选用控制标记,直接对其梯度图像作分水岭分割的脊线结果,可见产生了由大量局部极小区域导致的过分割结果;(c)为选取特征色集合后转化得到的特征灰度图像,相容球体半径 $R=25$;(d)为对重构后图像做分水岭分割的结果,该结果表明选取特征灰度集合可在一定程度上控制由噪声影响而造成的错误分割,产生比(b)组更有意义的分割区域;(e)为在图像(c)上以灰度值为200的灰色气泡形式叠加在局部最小区域;(f)为使用未约束的标记控制作分水岭分割的脊线结果;(g)为对控制标记采用约束准则后,叠加局部最小区域的结果,阈值 $Th_s=0.05$, $Th_d=0.4$, $Th_l=2.5$;(h)为对图像(g)运用形态学强制最小技术后,采用

约束控制标记分水岭方法的脊线结果。图4类似。

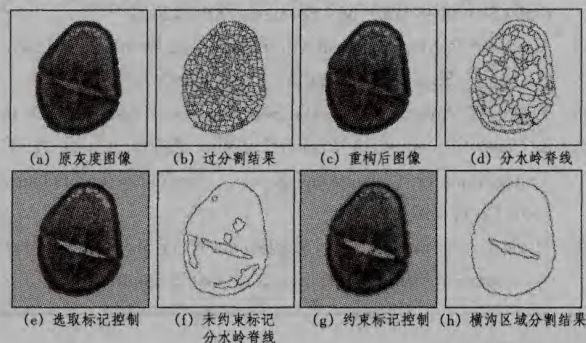


图3 条纹环沟藻横沟提取结果对比

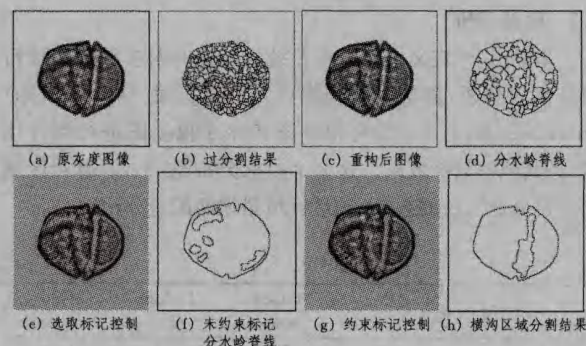


图4 链状裸甲藻横沟提取结果

实验结果表明,本算法中采用的约束准则增加了区域面积、质心距离和形状的度量,这些度量因子充分考虑了图像的二维因素,使标记控制的策略更合理。对特征灰度重构图像的梯度图像进行分水岭变换可在一定程度上控制由噪声影响而造成的错误分割,对标记控制进行约束可以合理有效地分割藻种横沟区域,去除无意义的候选区域。

结束语 本文针对分水岭变换存在的过分割问题,提出了一种基于特征灰度和约束标记分水岭变换的图像分割方法。实验证明,利用图像特征灰度集合重构图像有效地降低了图像中的灰度数目,减少了无意义的局部极小值区域,对重构后的梯度图像极小值区域标记并对标记加以三重约束条件可以合理有效地分割藻种横沟区域。

参考文献

- [1] 苏纪兰. 中国的赤潮研究[J]. 中国科学院院刊, 2001, 5: 339-342
- [2] 高亚辉, 杨军霞, 骆巧琦, 等. 海洋浮游植物自动分析和识别技术[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45(A02): 40-45
- [3] du Buf H, Bayer M M. Automatic Diatom Identification[M]. World Scientific, Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, 2002, 51: 316
- [4] Culverhouse P F, Simpson R G, Ellis R, et al. Automatic classification of field collected dinoflagellates by artificial neural network[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 139: 281-287
- [5] Davis C S, Fredrik T, et al. A three-axis fast-tow digital Video Plankton Recorder for rapid surveys of plankton taxa and hydrography[J]. American Society of Limnology and Oceanography: Methods 3, 2005: 59-74
- [6] Tang X, Lin F, Andrew Remsen. Binary plankton image classification[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(3): 728-735

- [7] Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications (Second edition) [M]. Springer-Verlag, 2008
- [8] Salembier P. Morphological Multi-scale Segmentation for Image Coding [J]. Signal Processing, 1994, 38: 359-386
- [9] Yaakov T, Amir A. Automatic Segmentation of Moving Objects in Video Sequences: A Region Labeling Approach [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(7): 597-612
- [10] Haris K, Efstratiadis S N, Maglaveras N, et al. Hybrid Image Segmentation Using Watersheds and Fast Region Merging [J]. Image Processing, 1998, 7(12): 1684-1699
- [11] Malpica N, Ortuno J E, Santos A. A multichannel watershed-based algorithm for supervised texture segmentation [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24: 1545-1554
- [12] 郭皓. 中国近海赤潮生物图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 2004
- [13] 马东, 程敬之, 李斌. 细胞图像的彩色纹理分析方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(1): 108-110
- [14] Ridler T W, Calvard S. Picture threshold Picture thresholding using an iterative selection method [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybern, 1978, SMC-8: 630-632

(上接第 521 页)

法+自适应区域生长修正算法求解。

4.2 性能评价

文献[1]中定义了 2 个重要统计指标并对各种算法进行定量比较分析, 算法也是根据这几个指标对 Tsukuba、Venus、Cones 和 Teddy 最终视差图和标准视差图进行测评比较, 而其他图只看效果。这 2 个指标分别是 B_0 (非遮挡区域错误百分比)、 B_D (视差不连续区域错误匹配百分比)。

由于本文的算法非常适合并行, 因此算法效率依赖硬件 (多核 CPU 或 GPU), 并且文中已对算法时间复杂度进行了分析, 所以不再对算法的时间效率进行详细分析, 只对本算法和其他算法进行一个不太系统的比较。本程序是用 C++ 基于部分 openCV 库编写的, 并在 CPU 配置为 intel® Core Duo CPU P8700、主频为 2.53 的情况下运行得到实验结果。下面的其他算法的性能结果来自于 <http://www.vision.deis.unibo.it/spe/SPEresults.aspx>。

表 1 定量分析对比表

Algorithm	Tsukuba nonocc	Tsukuba disc	Venus nonocc	Venus disc	Cones nonocc	Cones disc	Teddy nonocc	Teddy disc	Time Teddy mm:ss
Our result	6.25	13.13	4.13	25.75	10.01	21.59	10.11	24.71	<2s
Locally Consistent+ Fixed Window ^[4]	3.07	9.63	0.66	5.11	10.60	21.80	5.30	11.60	00.15
Adaptive weight ^[5]	4.66	8.65	4.61	13.30	12.70	22.40	5.50	11.90	20.35
Variable windows ^[6]	3.12	12.40	2.42	13.30	17.70	25.50	21.20	27.30	00.26
Multiple windows(9W) ^[7]	7.60	25.70	6.18	29.00	18.00	35.60	11.80	27.10	00.14
Shiftable windows ^[1]	9.58	14.40	9.66	16.50	23.60	31.20	24.40	33.60	00.05
Segmentation based ^[11]	2.25	8.87	1.37	9.40	12.70	24.80	11.10	20.10	05.14
Fixed window	9.58	27.10	10.60	42.50	25.10	42.40	19.70	36.00	<1s

结束语 实验结果表明, 本文的算法效果不比传统的变窗口或多窗口的算法差, 且时间复杂度比相关算法大有改进, 非常适合并行处理。本算法虽然无法和半全局或全局方法以及某些局部算法效果相比, 但是在实际应用中我们常常需要实时处理, 这是本算法的优势; 同时本算法很容易和其他半全局或全局方法结合在一起, 并且不会影响时间复杂度。相比复杂背景的场景, 本算法更加适合处理低纹理平滑等场景。

参考文献

- [1] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. Int. Jour. Computer Vision, 2002, 47(1/2/3): 7-42
- [2] Kolmogorov V, Zabih R. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts [C]//ICCV. 2001
- [3] Sun Jian, Zheng Nan-ning, Shum H Y. Stereo Matching Using Belief Propagation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(7): 787-800
- [4] Kim J, Lee K, Choi B, et al. A dense stereo matching using two-pass dynamic programming with generalized ground control points [C]//Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005). 2005: 1075-1082
- [5] Mc Donnell M. Box-filtering techniques [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 17: 65-70
- [6] Crow F. Summed-area tables for texture mapping [J]. Computer Graphics, 1984, 18(3): 207-212
- [7] Mattoccia S. A locally global approach to stereo correspondence [C]//IEEE Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2009). 2009
- [8] Gerrits M, Bekaert P. Local Stereo Matching with Segmentation-based Outlier Rejection [C]//Proc. Canadian Conf. on Computer and Robot Vision (CRV 2006). 2006: 66-66
- [9] Veksler O. Fast variable window for stereo correspondence using integral images [C]//Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2003). 2003: 556-561
- [10] Hirschmuller H, Innocent P, Garibaldi J. Real-time correlation-based stereo vision with reduced border errors [J]. Int. Journ. of Computer Vision, 2002, 47: 1-3
- [11] Gerrits M, Bekaert P. Local Stereo Matching with Segmentation-based Outlier Rejection [C]//Proc. Canadian Conf. on Computer and Robot Vision (CRV 2006). 2006: 66-66
- [12] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619