



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
12
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



特征点检测 P1639



第20卷第12期（总第236期）

2015年12月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文
编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

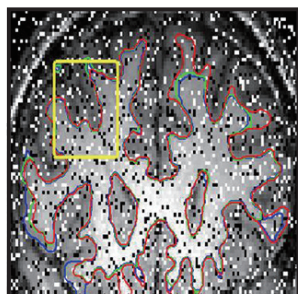
Title inscription: Song Jian Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

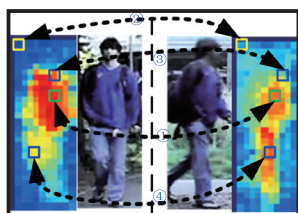
Editor-in-Chief LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 50.00元



融合全局和局部相关熵的图像分割(第1619页)



多方向显著性权值学习的行人再识别(第1674页)



混合编码差分进化粒子群算法及多示例学习的高光谱影像降维与分类(第1689页)

综述

遥感影像变化检测算法综述

佟国峰, 李勇, 丁伟利, 岳晓阳1561

图像处理和编码

紧框架域混合正则化模型在图像恢复中的应用

李旭超, 马松岩, 边素轩1572

色彩熵在图像质量评价中的应用

徐琳, 陈强, 汪青1583

图像分析和识别

字典学习和稀疏表示的海马子区图像分割

时永刚, 王东青, 刘志文1593

阈值标记的分水岭彩色图像分割

张海涛, 李雅男1602

改进K-means活动轮廓模型

张倩颖, 吴纪桃, 谢晓振, 王晓涛1612

融合全局和局部相关熵的图像分割

黄扬, 郭立君, 张荣1619

递进的迭代脉冲噪声检测

孙劲光, 黄旭1629

对数极坐标系下尺度不变特征点的检测与描述

陶涛, 张云1639

子块鉴别分析的路面裂缝检测

钱彬, 唐振民, 徐威, 陶玉婷1652

多尺度构图先验的显著目标检测

王娇娇, 刘政怡1664

多方向显著性权值学习的行人再识别

陈莹, 霍中花1674

基于最大相关熵准则的2维主成分分析

赵丽美, 贾维敏, 王标标, 于强1684

遥感图像处理

混合编码差分进化粒子群算法及多示例学习的高光谱影像降维与分类

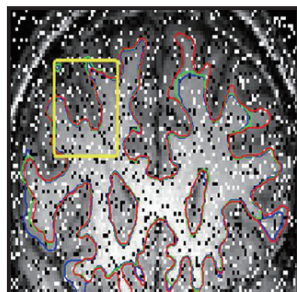
高红民, 李臣明, 王艳, 谢科伟, 陈玲慧, 何振宇1689

InSAR中应用可靠度导向改进的分级表相位展开算法

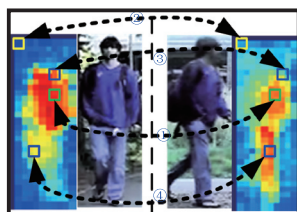
宋芳, 李勇, 余涛1699

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Integration of global and local correntropy image segmentation algorithm(P1612)



Person re-identification based on multi-directional saliency metric learning(P1674)



Dimension reduction and classification for hyperspectral image based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm with hybrid encoding and multiple instance learning(P1689)

Review

Review of remote sensing image change detection

Tong Guofeng, Li Yong, Ding Weili, Yue Xiaoyang 1561

Image Processing and Coding

Applying a hybrid regularization model in a tight frame domain to image restoration

Li Xuchao, Ma Songyan, Bian Suxuan 1572

Application of color entropy to image quality assessment

Xu Lin, Chen Qiang, Wang Qing 1583

Image Analysis and Recognition

Segmentation of hippocampal subfields using dictionary learning and sparse representation

Shi Yonggang, Wang Dongqing, Liu Zhiwen 1593

Watershed algorithm of color image segmentation with threshold mark

Zhang Haitao, Li Yanan 1602

Improved K-means active contours stem

Zhang Qianying, Wu Jitao, Xie Xiaozhen, Wang Xiaotao 1612

Integration of global and local correntropy image segmentation algorithm

Huang Yang, Guo Lijun, Zhang Rong 1619

Progressive iterative impulse noise detection

Sun Jinguang, Huang Xu 1629

Detection and description of scale-invariant keypoints in log-polar space

Tao Tao, Zhang Yun 1639

Pavement crack detection algorithm based on sub-patch discriminant analysis

Qian Bin, Tang Zhenmin, Xu Wei, Tao Yuting 1652

Multi-scale saliency detection based on composition prior

Wang Jiaojiao, Liu Zhengyi 1664

Person re-identification based on multi-directional saliency metric learning

Chen Ying, Huo Zhonghua 1674

Two-dimensional principal component analysis based on maximum correntropy criterion

Zhao Limei, Jia Weimin, Wang Biaobiao, Yu Qiang 1684

Remote Sensing Image Processing

Dimension reduction and classification for hyperspectral image based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm with hybrid encoding and multiple instance learning

Gao Hongmin, Li Chenming, Wang Yan, Xie Kewei, Chen Linghui,

He Zhenyu 1689

Reliability-guided phase unwrapping algorithm based on improved classification table for InSAR

Song Fang, Li Yong, Yu Tao 1699

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)12-1602-10

论文引用格式: Zhang H T, Li Y N. Watershed algorithm with threshold mark for color image segmentation[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(12): 1602-1611. [张海涛, 李雅男. 阈值标记的分水岭彩色图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(12): 1602-1611.] [DOI: 10.11834/jig.20151205]

阈值标记的分水岭彩色图像分割

张海涛, 李雅男

辽宁工程技术大学软件学院, 葫芦岛 125105

摘要: 目的 针对传统分水岭算法中产生的过分割问题, 提出一种基于阈值标记的分水岭彩色图像分割算法。方法 该方法将分水岭算法直接应用到原始梯度图像上而不是简化之后的图像, 这样做的目的是可以保护边缘信息不受损失; 利用不同尺寸结构元求取彩色图像形态学梯度, 解决了关于保护边缘和图像简化之间的矛盾。同时算法设计一种阈值自动选取与标记提取方法, 从梯度的低频成分中提取与物体相关的局部极小值, 用这些极小值构成的二值图像强制标定原始梯度图像, 在修改后的梯度上进行分水岭分割。结果 在仿真实验中, 利用本文算法针对不同 RGB 彩色图像进行分割, 获得准确、连续封闭的分割边界, 与其他同类方法相比, 得到符合人类视觉的最小分割区域数, 同时在运行效率上也有很大提高。结论 该方法可以自适应提取标记而不需要先验知识, 有效解决了分水岭算法的过分割问题, 相对于传统的算法, 提高了分割性能, 有较好的适用性和鲁棒性, 可将其应用于机器视觉、生物医学以及高光谱遥感图像分割领域。

关键词: 彩色图像分割; 多尺度梯度; 最大熵阈值; 巴特沃斯低通滤波; 标记提取; 分水岭

Watershed algorithm with threshold mark for color image segmentation

Zhang Haitao, Li Yanan

School of Software, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China

Abstract: **Objective** In view of the segmentation problem caused by the traditional watershed algorithm, a new improved watershed algorithm for color image segmentation based on threshold mark is proposed. **Method** The method applied watershed algorithm directly to the original gradient image but not the simplified image, the purpose of which is to insure the loss edge information can be avoided. With different size structure element for color morphological gradient image, solved the contradiction between the protection of the edge and the image is simplified. At the same time, the new algorithm designed a method of threshold automatically selection and marker extraction-extracting local minimum value related to the objects from the low-frequency components of the gradient, with these minimal values constituting the binary image force calibration of the original gradient image, then used watershed segmentation on the modified gradient. **Result** In the simulation experiment, the algorithm in this paper is compared with similar segmentation method. Algorithm obtained accurate and continuous closed boundary for the different RGB color images segmented, which got the minimum segmentation number that conforming to human vision, and improved the working efficiency. **Conclusion** The method can adaptively extract marker with-

收稿日期: 2015-06-29; 修回日期: 2015-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61172144)

第一作者简介: 张海涛 (1974—), 男, 副教授, 2014 年于辽宁工程技术大学获地图制图学与地理信息工程专业博士学位, 主要研究方向为图形图像处理、高光谱图像压缩。E-mail: lntuzht@163.com

通信作者: 李雅男, 硕士研究生, E-mail: yanangrace@126.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61172144)

out the need for prior knowledge, effectively solved the over segmentation problem of watershed, compared with the traditional algorithm improved the segmentation performance and having good applicability and robustness. It can be applied to the machine vision, biomedicine and hyperspectral remote sensing image segmentation.

Key words: color image segmentation; multi-scale gradient; maximum entropy threshold; BTW low pass filter; marker extraction; watershed algorithm

0 引言

图像分割是将一幅图像细分为其组成区域或对象,是更高层次图像分析和模式识别的首要问题。由于彩色图像提供了更加丰富的信息,而且随着计算机处理能力的快速提高,彩色图像分割具有十分重要的意义。目前大部分彩色图像分割技术都可以由灰度图像分割技术扩展而来。图像分割有很多经典算法,例如阈值分割、区域增长、分水岭、聚类算法等,其中比较有代表性的就是基于形态学的分水岭算法,因其能够快速得到单像素宽、连续封闭的目标边界而得以广泛应用。然而由于图像中存在非规则扰动和噪声等因素造成的过分割使其不能广泛应用,因此有效降低分水岭算法存在的过分割问题一直是该领域研究的焦点。目前很多学者提出了分水岭的多种改进算法,大致可以将其分为3类:

1) 对原始图像应用分水岭变换然后利用合适的区域合并算法将同质区域融合以消除过分割现象^[1-3]。文献[1]提出的基于区域块的高斯混合模型聚类分割新算法有一定提高,但是算法比较耗时;文献[3]提出了基于粒子群和区域生长的改进分水岭算法,将灰度值接近的极小区域合并成为一个区域,但是该算法仍然存在一定程度的过分割,且算法复杂度高。

2) 对原始图像空间域进行某种特定的变换^[4-6],例如文献[6]将小波变换与分水岭结合将其应用到高分辨率遥感图像进行分割。

3) 对原始图像进行预处理(如平滑滤波等)^[7-9],文献[7]与文献[9]提出了一种基于内外标记的改进分水岭算法,对图像进行形态学开闭重建平滑滤波去除噪声;文献[8]采用多尺度形态学滤波器对图像进行平滑,简化图像。以上提到的3类分水岭算法虽然在一定程度可以抑制过分割现象,但是到目前为止仍未找到一种合适的分水岭算法能够有效解决分水岭算法过分割问题。

分水岭算法本质上是利用数学形态学、基于区

域增长的分割算法。Vincent 等人于1991年最早提出基于浸没模型的分水岭算法^[10]。该算法源于地形学概念,模拟了地貌浸水过程。基本思想是把梯度幅值图像看成地形,像素值高的区域代表高山,低的区域代表低谷。下雨时水会在低洼处形成汇水盆地^[11]。把汇水盆地中的最低点看成一个极小值,考虑如果在极小值点打一个小洞,以均匀速率向小洞注水,当不同汇水盆地水位不断上升,在每个汇水盆地交界处修建大坝阻止水向其他汇水盆地溢出,这些大坝边界就是所要找的分水线。然而图像中的暗纹理细节及噪声所产生的伪极小值会和真正的极小值一起产生相应的灰水盆地,淹没感兴趣目标,出现伪局部极小值,即出现分水岭过分割问题。带标记的分水岭算法是目前解决过分割的有效方法。通过提取与物体相关的标记,获得准确的分割结果。目前对标记的提取没有确定的方法,关键在于找到一组与图像中各个物体区域相关的种子点。

本文提出了一种新的改进的基于标记阈值的彩色图像分水岭算法。该算法解决了一般算法中为了减少噪声而进行的图像简化与保护图像物体边缘不受破坏之间的矛盾,在计算彩色图像梯度的过程中使用了一种融合多尺度形态学梯度的算法,且通过2维最大熵自动获取阈值对局部极小值判别,克服了人工提取标记的困难,有效解决了分水岭算法的过分割问题。

1 新算法描述及原理

通常一般的改进算法^[12-13]会在简化后的图像上进行分水岭,在图像的简化过程中为了保护边缘信息使得噪声不能有效去除,造成图像简化与保护物体边缘信息之间矛盾体的出现,即导致过分割与误分割现象。本文算法直接在原始彩色图像的梯度图像而非简化后的图像上进行极小值标记,保证没有边缘信息的丢失。在计算彩色图像梯度的过程中,抽取不同彩色分量,对不同彩色分量使用多尺度

形态学结构元计算彩色图像梯度,选取最大的分量作为最终的梯度,获得了理想的梯度图像。新算法将图像处理中的照度—反射模型应用到彩色图像梯度计算中,在梯度图像的低频成分寻找与物体相关的局部极小值,这是因为图像的照度分量通常以空间域的慢变化为特征,反射分量通常引起巨变。照度分量特征使图像的低频成分对应图像的基本内容,而图像中的高频成分则与图像的细节纹理、边缘

以及噪声相对应。因而,图像的低频成分中的局部极小值与图像中的物体内容有很强的相关性,利用该模型能够获取正确的标记。然后对标记进行阈值处理,提出了一种自动2维最大熵阈值方法,将得到的标记强制作为分割图像的局部极小值,屏蔽非规则扰动及噪声所产生的伪局部伪极小值。最后将分水岭应用在经过修改的梯度图像上获得理想的分割效果。本文算法流程如图1所示。

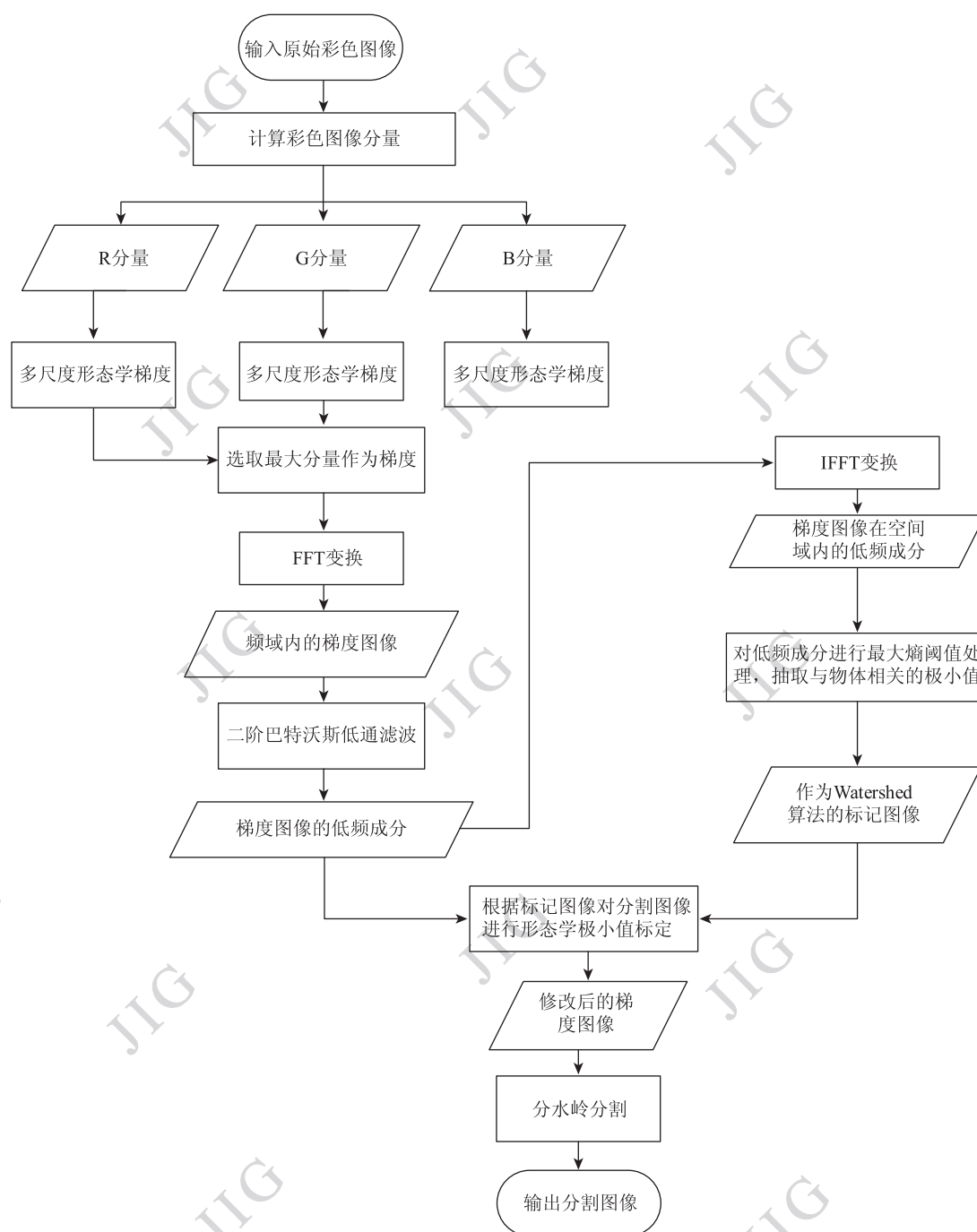


图1 阈值标记的分水岭彩色图像分割算法流程图

Fig. 1 Diagram of the color image watershed segmentation algorithm based on threshold mark

2 形态学多尺度彩色梯度

利用分水岭算法对图像进行分割的关键是提取区域的极小值,以此确定图像的分水线。分水岭可以理解为图像中强度骤变的分界线,因此通常会预先对图像处理来突出图像中的明暗变化^[14]。梯度能够增强图像中灰度变化比较剧烈的边缘,突出区域之间的边缘轮廓。理想情况下,分水岭变换会在对象边缘处产生分水岭脊线,因此分水岭分割的结果在很大程度上依赖于图像的梯度。传统的图像梯度^[15]是通过一些如 Sobel、Prewitt 等的微分算子求得,还有一些经典的计算方法例如基于矢量梯度的计算方法^[16],基于 PCA 主成分分析的梯度降维算法^[17],以及基于彩色空间模型转换的预处理彩色梯度等。本文采用一种多尺度形态学梯度计算方法。

数学形态学理论由法国巴黎矿业学院塞拉 (Serra) 和导师马瑟荣于 1964 年提出。其所用语言是数学集合论,基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状以达到对图像分析的目的。具有天然并行实现结构的数学形态学能够实现形态学分析和处理算法的并行处理,使图像分析和处理的速度得以大大提高^[18]。

腐蚀和膨胀是形态学图像处理的两个最基本操作。腐蚀是在图像中“收缩”或“细化”的操作。结构元素 b 对一幅图像 f 在位置 (x, y) 的腐蚀定义为

$$(f \odot b)(x, y) = \min \{f(x + s, y + t) - b(s, t) \mid (s, t) \in D_b\}$$

也就是说当把结构元的原点放在图像每一个像素的位置,腐蚀是由包含在与 b 重合区域中的 f 的所有值中选取的最小值决定。

膨胀是在图像中“加长”或“变粗”的操作。结构元素 b 对一幅图像 f 在位置 (x, y) 的膨胀定义为

$$(f \oplus b)(x, y) = \max \{f(x - s, y - t) + b(s, t) \mid (s, t) \in D_b\}$$

也就是说当把结构元的原点放在图像每一个像素的位置,膨胀是由包含在与 b 重合区域中的 f 的所有值中选取的最大值决定。

设 $F(x, y)$ 是一幅输入图像,则 $F(x, y)$ 的形态学梯度定义为

$$\nabla F(x, y) = (f \oplus b_n)(x, y) - (f \odot b_n)(x, y) \quad (1)$$

式(1)是单尺度形态学梯度,梯度图像计算结果主要取决于结构元素的尺寸和形状。本文选择具有各向同性的圆盘状“disk”结构元素,可以避免图像特征的畸变。如果结构元素尺寸过大会导致图像物体边缘受损,造成边缘与梯度值的不一致性;如果结构元素过小,会致使梯度算子对斜坡边缘产生小的输出,影响分割结果。因此,本文使用多尺度特性计算梯度。设 $r_i (i = \min, \dots, \max)$ 为结构元素 b 的半径, $r_{\max}$ 为结构元素的最大半径, $r_{\min}$ 为结构元素的最小半径。 ρ_i 表示权值, rF_i 表示不同彩色分量的不同尺寸下的形态学梯度,本文的多尺度形态学梯度定义为

$$F_{\text{Grad}} = \sum_{i=r_{\min}}^{r_{\max}} \rho_i rF_i \quad (2)$$

本文算法中不仅考虑到了亮度信息同时结合彩色信息,在 RGB 空间计算彩色分量的梯度。令 F 代表待分割彩色图像, $F_i (i = R, G, B)$ 分别代表彩色图像 F 的 RGB 的 3 个彩色分量,本文彩色图像转换为梯度图像的定义为

$$\text{Grad} = \max \{ \nabla F_R, \nabla F_G, \nabla F_B \} \quad (3)$$

式中, $\nabla F_i (i = R, G, B)$ 分别代表彩色图像 F 的 RGB 的 3 个彩色分量的形态学梯度。这样通过计算彩色图像梯度,可以将彩色图像转化为灰度图像。

3 标记提取及分水岭分割

3.1 二阶巴特沃斯低通滤波

分水岭模拟地貌浸水过程,本质上是一种从图像的局部极小值开始增长的区域增长算法。分水岭算法产生的过分割主要是由于图像中的细节纹理和噪声产生的伪极小值造成的。基于标记约束的分水岭算法是从预先指定的种子点开始浸水,因此只要能够对物体进行准确的相关标记即可得到理想的实验目标,达到识别图像的目的。梯度幅度图像在沿对象的边缘处有较高的像素值,能够突显图像的噪声,与此同时还能减弱图像中较为平坦的区域,从而增强图像中的噪声与图像物体内容之间的差异,此时使用滤波器能够很容易将那些凸显出来的孤立噪声滤除掉。因此从梯度图像的低频成分中提取与物体相关的极小值能够得到比从原始图像的低频成分中更加准确的结果。本文算法对形态学梯度图像使用了滤波器以此来计算图像的低频成分,有效地

克服了先验知识对标记提取的困难。

低通滤波器能够滤除高频成分,使得图像模糊。理想低通滤波器的过渡特性过于急峻,会产生振铃现象。相对于高斯低通滤波与中值滤波,使用二阶巴特沃斯低通滤波(BLPF-2)具有较强的适应性且不会出现振铃现象,能够获得更高的平滑效果,结合本文算法能够取得最优的分割效果。

首先将梯度图像 Grad 经过 FFT^[19] 变换到频率域中,才能在频率域进行二阶 BLPF 以获得低频成分。

$$F(\text{Grad})(u, v) = \zeta[\text{Grad}(x, y)(-1)^{x+y}] \quad (4)$$

然后在频域内的梯度图像 $F(\text{Grad})(u, v)$ 上应用二阶 BLPF 获得其低频成分

$$\begin{aligned} L_{\text{BLPF}}(\text{Grad})(u, v) = \\ H_{\text{BLPF}}(u, v) \times F(\text{Grad})(u, v) = \\ \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1) \{[(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2]^{1/2} D_0\}^{2n}} \times \\ F(\text{Grad})(u, v) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $L_{\text{BLPF}}(\text{Grad})(u, v)$ 代表经过 BLPF-2 处理之后获得的低频成分,然后利用 IFFT 算法将其从频率域转换到空间域。式中 D_0 是截止频率参数,事实上,图像的低频与高频成分之间并没有严格的界限,它们只是相对的概念。但是低频成分都是通过较大程度滤除高频成分也就是将大部分的暗噪声滤除之后得到的。标记的成功提取会受到 D_0 的影响,在本文中, D_0 大约集中在 15 ~ 30 之间。最后,获得空间域内的彩色图像梯度。用 $I^{\text{BLPF}}(x, y)$ 表示,即

$$\begin{aligned} I^{\text{BLPF}}(x, y) = \\ (-1)^{x+y} \zeta^{-1}[R[F(\text{Grad})(u, v)]] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $R(\cdot)$ 代表对 $F(\text{Grad})(u, v)$ 进行取实部计算。

3.2 阈值处理与标记提取

在图像分割领域阈值法是常用也是最简单的一种方法。其算法的核心就是寻找一个最佳阈值,通过将图像中的像素与这个最佳阈值做比较得到图像的目标与背景。传统 H-minima 技术中的人为设定阈值过小会凸显强纹理噪声,过大则容易屏蔽弱边缘。而且针对不同性质的图像分割结果差别显著,鲁棒性较差。为提高 H-minima 的鲁棒性,应该寻求一种阈值自动获取方法。目前已经提出很多阈值化分割方法,依据算法本身所特有的准则和特性,可以分为灰度直方图的峰谷法、最小误差法^[20]、基于信

息论的最大熵法^[21]、最大类间方差(Otsu)^[22]法以及各种基于图谱理论的阈值分割方法等等。基于信息论的方法通过图像的直方图及直方图定义的目标函数来选取最佳分割阈值,图像的信息熵能够反映图像的总体概貌。若图像中存在目标,则信息熵在目标与背景的可分割边界处具有最大值。继 Pun^[21] 在 1980 年首先提出基于最大熵阈值选择方法之后, Abutaleb^[23] 提出了 2 维最大熵的图像分割算法,该方法充分利用了图像各像素间的空间相关信息以及像素的灰度分布信息,采用由像素灰度和邻域平均灰度构成的 2 维直方图搜索阈值,获得较为理想的分割效果。

对 3.1 节梯度图像的低频成分的局部极小值点采用 2 维最大熵算法来自动获取阈值,滤除图像中的伪极小值区域。最大熵阈值分割方法是通过利用直方图灰度统计信息来构造判别函数取极值的模式来获取最佳分割阈值。假设 $I^{\text{BLPF}}(x, y)$ 的灰度级为 $1, 2, \dots, L$ 。 $f_1, f_2, \dots, f_L$ 表示图像中各个灰度级出现的频率,梯度图像邻域的平均灰度也有 L 级。用 N 表示总的像素, 2 维直方图为 $h(i, j) = p_{ij}$, $0 \leq i \leq L-1, 0 \leq j \leq L-1$, i 是像素灰度, j 是邻域平均灰度。梯度图像中灰度为 i 及其邻域灰度均值为 j 的像素点数由 f_{ij} 表示,那么 p_{ij} 为

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{N} \text{ 且 } p_{ij} \text{ 满足 } \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} = 1$$

目标和背景的概率累计分布 p_1, p_2 分别为

$$\begin{aligned} p_1 &= \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t p_{ij} \\ p_2 &= \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} p_{ij} \end{aligned}$$

定义其目标和背景的 2 维熵为

$$\begin{aligned} H_1 &= - \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t p_{ij} \lg p_{ij} \\ H_2 &= - \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} p_{ij} \lg p_{ij} \end{aligned}$$

因此梯度图像总熵的判别函数通过变换定义为

$$\begin{aligned} H(s, t) &= H_1 + H_2 = \\ &\lg \left(p_1(1 - p_1) + \frac{H_1}{p_1} + \frac{H_2 - H_1}{1 - p_1} \right) \end{aligned}$$

最终选取的阈值 $H(s^*, t^*)$ 满足

$$H(s^*, t^*) = \max \{ H(s, t) \} \quad (7)$$

式中, $H_L = - \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L p_{ij} \lg p_{ij}$ 。

通过这种2维最大熵算法自动获取阈值对标记进行扩展最小值变换,有效屏蔽了伪极小值对分割结果的影响,使局部极小值仅出现标记的位置,消除了人工标记的困难,避免了认为设定阈值的不合理性,能够获得很好的分割效果,具有较高的鲁棒性。

3.3 基于标记的分水岭分割

通过采用梯度图像 G 作为分水岭的分割图像,用提取到的标记对原始梯度图像 G 进行修改,屏蔽掉原有图像中的所有局部极小值,修改后的梯度图像中,局部极小值只存在二值标记图像 G_{mark} 中不为零的地方。修改后的标记图像用 $G_{\text{mark}}^{\text{mod}}$ 表示,即

$$G_{\text{mark}}^{\text{mod}} = \text{Min}(G \mid G_{\text{mark}}) \quad (8)$$

式中, $\text{Min}(\cdot)$ 表示形态学极小值标定技术的操作。

然后在修改后的梯度图像 $G_{\text{mark}}^{\text{mod}}$ 上应用分水岭分割,得到最终的理想分割结果,用 G^{ws} 表示, $\text{WaterShed}(\cdot)$ 表示分水岭算法的分割操作算子,即

$$G^{\text{ws}} = \text{WaterShed}(G_{\text{mark}}^{\text{mod}}) \quad (9)$$

4 仿真实验及分析

选用图像分割领域公开的较为经典的 Lena 彩色图像进行仿真实验,图像大小为 256×256 像素,得到图2所示的实验结果,实验给出了利用本文算法得到的梯度图如图2(b)以及得到的标记图2(d),并与直接在原始梯度图像上进行分水岭分割做了对比图2(c)。

图2为采用本文算法对实验图像的分割结果图。如图2(c)所示,若直接在梯度图像上进行分水岭分割而没有标记提取等处理会由于伪极小值产生严重的过分割现象,致使分割结果毫无意义。使用本文算法,可以准确获取标记,如图2(d)所示,而且能够有效地抑制过分割,获得理想的分割效果。图2(b)中的多尺度梯度结果是本文第2节中提到的圆盘状形态学结构元素 b 在 $r_{\min}=4, r_{\max}=6$ 下的梯度结果。2维最大熵自动阈值获取方法的阈值为10.3414,由此阈值自动标记图像的结果为图2(d)所示。同时本文算法还有一个参数需要调节,是3.1节中的BLPF-2中的截止频率 D_0 ,图2中 D_0 为23。调节不同的参数会得到不同的分割结果,例如 $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$,这两个参数的不同选取会影响图像中细节与主干区域轮廓的完整性。同时在巴特沃斯低通

滤波中,截止频率 D_0 的取值对图像去除暗噪声的程度会产生一定的影响继而导致获取的阈值出现变化,从而产生分割结果的差异。

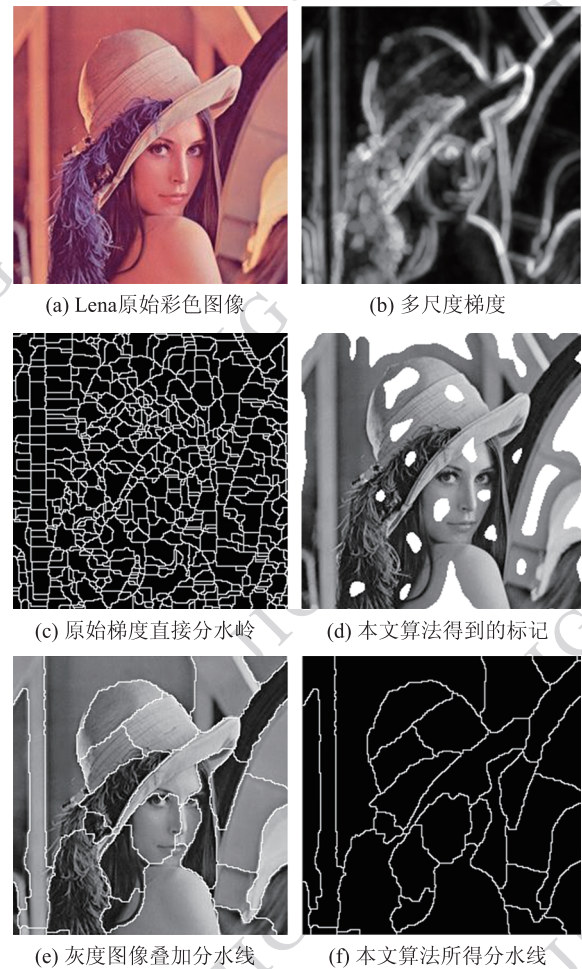


图2 本文算法的实验结果

Fig. 2 Experimental results of the proposed algorithm

仍然以 Lena 图像作为输入图像,如图3所示显示了不同的参数选取对实验结果的影响。

如图3(b)所示,相对于图3(a)来说,当最小半径减小时,图像的整体轮廓没有发生改变,但是增加了分割区域,即有微小的细节被分割出来。可以看到图3(b)中 Lena 图像中帽子上的装饰物多出来一个分割区域,而图像的其他分割效果没有发生变化。当最大半径增大时,在实验结果中可以发现会产生对图像整体轮廓的分割影响,导致重要的图像边缘被滤除掉,如图3(c)中 Lena 图像的左半边脸出现一定程度破坏而没被分割出来,但是并不影响实验整体的分割效果,因此本文仍然选择图3(c)作为与其他文献算法的实验对比图。同时在

实验中适当减小 D_0 取值会减少分割区域产生更清晰的轮廓,这在图 3(d)可以得到验证。

选取大量不同类型图像进行分割实验来验证本文算法的有效性,给出部分实验结果说明算法的有效性,图 4 显示了针对彩色图像 Lotus 和 Plane 的实

验结果。

从图 4 中可以看出,利用本文提出的针对不同类型的图像均能取得很好的实验效果。分别用本文算法和文献[17,24-25]提出的算法对 Lena 图像进行仿真实验,其结果如图 5 所示。

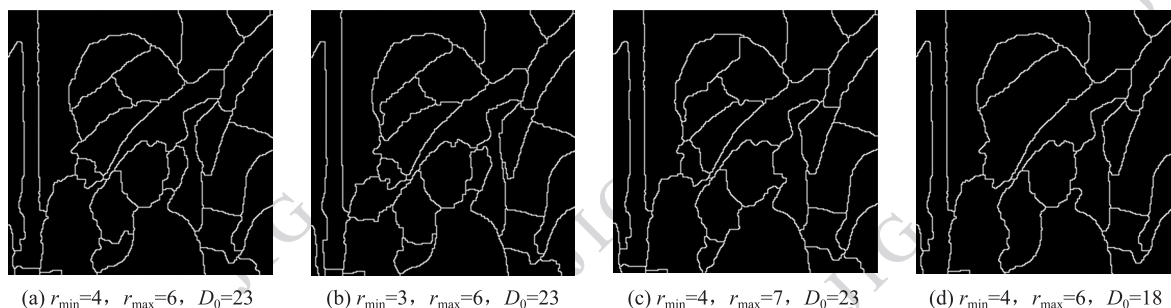


图 3 不同参数 $r_{\min}$ 、 $r_{\max}$ 和 D_0 的几组实验结果

Fig. 3 Results of different parameter

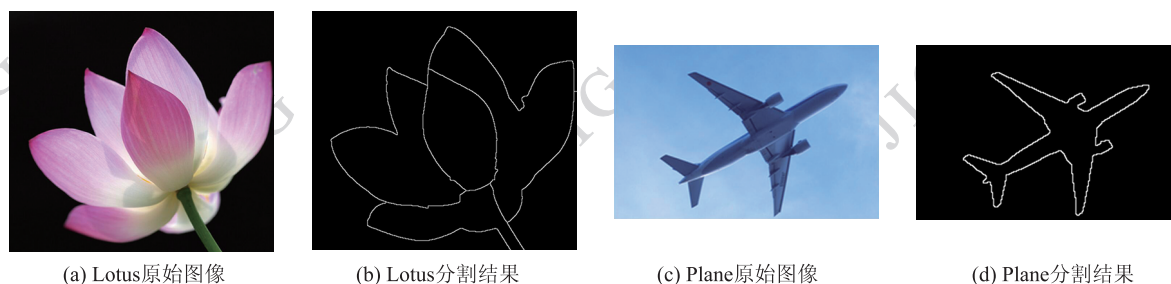


图 4 利用本文算法彩色图像 Lotus 和 Plane 分割结果

Fig. 4 Results of Lotus and Plane

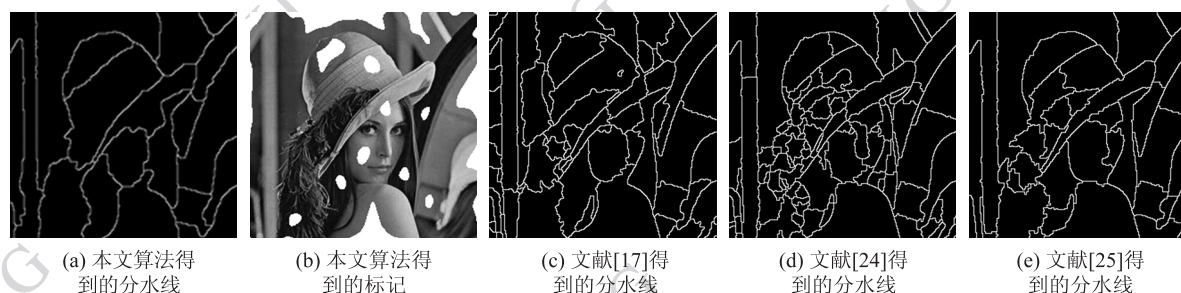


图 5 本文算法与文献[17,24-25]的分割结果比较

Fig. 5 The compare of segmentation results between the proposed algorithm and algorithm of reference[17,24-25] for Lena

从图 5(b)可以看出,利用本文算法能够正确得到标记,在不破坏图像边缘的基础上,能够得到如图 5(a)所示的分水线。可以很明显地看出,本文算法能够很好地抑制过分割,获取相对较好的分割效果。文献[17]提出的算法利用 PCA 技术对彩色图像进行降维,采用一种自适应梯度重建的算法进行分水岭分割,没有涉及标记提取,使得获得的分水线

不够圆滑,如图 5(c)所示,利用文献[17]提出的算法针对不同彩色图像进行实验发现,分割结果中总会出现一些小的封闭圆,这在 Lena 图像分割结果中也可看到,如图 5(c)中 Lena 帽子上侧可以得到验证。同时文献[17]提出的算法在进行自适应梯度重建的过程中比较复杂,算法比较耗时。文献[24]提出的基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法,

利用了新的彩色空间转换算法,但是该算法针对抑制受反射亮光以及阴影影响的图像产生的过分割有一定的意义,无法有效抑制由于纹理细节和噪声产生的过分割,如图 5(d)所示。依据文献[25]提出的算法获得的实验结果依然存在一定程度的过分割,这是因为其在计算彩色图像梯度的过程中,使用了传统的形态学梯度,形态学结构元尺寸单一,不能有效去除噪声因而容易产生伪局部极小值从而导致

过分割。而且文献[25]中算法中Hminima极小值变换技术需要人为设定分割阈值,不具有普遍意义。本文算法能够有效解决上述问题,取得了很明显的实验效果,在有效抑制由于图像背景噪声以及纹理细节产生的过分割的同时,获得了与目标轮廓接近的效果。

同样利用本文算法以 Peppers (512 × 384 像素) 为例,进行对比实验得到如图 6 所示的实验结果。

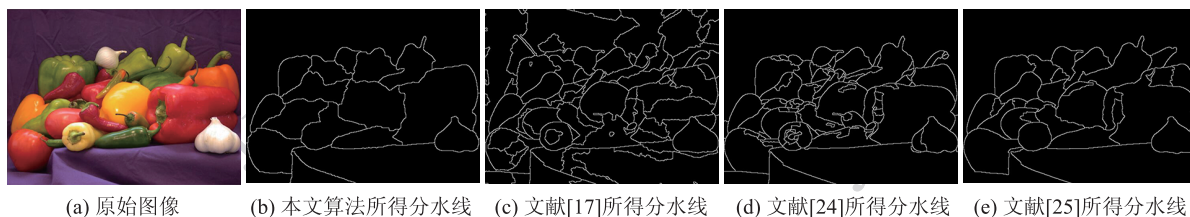


图 6 以 Peppers 为例本文算法的分割结果与文献[17,24-25]的分割结果进行比较

Fig. 6 The compare of segmentation results between the proposed algorithm and algorithm of [17,24-25] for Peppers

如图 6 以 Peppers 作为输入图像的实验结果同样可以看出,本文提出的算法具有明显的实验效果,有效去除了伪极小值及噪声细节,得到与目标轮廓相符合的区域,在一定程度上抑制了过分割,具有较好的鲁棒性。文献[17,24-25]由于其算法本身的弊端均产生了一定程度的过分割与误分割,这样的实验结果对于图像分析与识别是没有意义的。

表 1 给出了本文实验中实验参数的选取以及所自动获取的阈值。

表 1 本文不同图像的参数选取及获得的阈值

Table 1 Parameters chose and threshold obtained of different image in the proposed algorithm

图像	D_0	$r_{\min}$	$r_{\max}$	H
Lena	18	4	6	9.900 4
Peppers	21	4	6	8.411 1
Lotus	22	1	3	6.697 7
Plane	20	1	3	6.740 4

由于分水岭算法最大的弊端就是过分割,过分割致使分割的区域数目过多,分割结果中包含大量的小区域,因此通常情况下会使用分割的区域数来度量算法的分割效果。本文不仅对不同算法的分割区域进行衡量,同时对算法的实时性进行了考察。分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 相同 PC 机和 Matlab 编程环境下以 Lena 和 Peppers 为例本文算法分割区域数与文献[17,24-25]分割区域数进行比较

Table 2 The compare of segmented region numbers between the proposed algorithm and algorithm of reference[17,24-25] for Lena and Peppers

图像及大小	文献[17]	文献[24]	文献[25]	本文算法
Lena. jpg (256 × 256 像素)	106	106	37	22
Peppers. png (512 × 384 像素)	68	100	31	19

表 3 相同 PC 机和 Matlab 编程环境下以 Lena 和 Peppers 为例本文算法运行时间与文献[17,24-25]运行时间进行比较

Table 3 The compare of processing times between the proposed algorithm and algorithm of reference[17,24-25] for Lena and Peppers

图像及大小	文献[17]	文献[24]	文献[25]	本文算法
Lena. jpg (256 × 256 像素)	0.613	0.382	0.491	0.461
Peppers. png (512 × 384 像素)	0.930	0.549	0.913	0.907

表 2 和表 3 为本文算法和文献[17,24-25]算法的分割所产生的区域数和运行时间。本文实验环境

为: PC 机, 英特尔(R) i5-2430 处理器, 主频 2.4 GHz, 4 GB 内存, 编程软件为 MATLAB R2012b, 从表 2 可以看出, 本文算法在分割区域上要明显优于文献[17]、文献[24]、文献[25]。文献[17, 24]中分割数目较多, 过分割比较严重。本文算法的分割数量达到了分割效果与人眼视觉效果相似的最小值。表 3 中的运行时间是实验经多次运行所取平均值, 可以看出本在处理 Lena 图像时, 本文算法相对于文献[17, 25]在运行效率上也有较大的提高。与文献[24]相比, 算法实时性略差一些, 这是由于本文在计算多尺度形态学梯度时有一定的时耗, 但是相对其他算法在整体时耗方面, 本文算法仍有很大的优势。

5 结 论

图像分割是计算机视觉领域的关键环节, 针对抑制彩色图像分水岭分割算法中的过分割问题, 提出一种改进的基于阈值标记的分水岭新算法。利用多尺寸形态学结构元计算彩色图像梯度, 同时本文算法在原始梯度图像上进行极小值标记而非简化后的图像, 有效解决了图像简化与保护物体边缘信息之间矛盾。使用 2 维最大熵阈值选取方法自动获取阈值, 具有较好的鲁棒性与适应性。实验结果表明, 本文算法能够很好抑制过分割, 准确的标记提取实现了对图像的成功分割, 且在运行时间上有比较明显的优势。在进一步优化的基础上, 可将算法应用到机器视觉以及生物医学的图像分割中, 同时这种算法对于高光谱遥感图像也具备广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] Li X H, Wu J F, Zhang G F, et al. New color segmentation based on watershed and region merging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(3): 247-252. [李小红, 武敬飞, 张国富, 等. 结合分水岭和区域合并的彩色图像分割[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 247-252.]
- [2] Li L, Jin L M, Song E M. Unsupervised color image segmentation using region merging and graph cuts[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Natural Science Edition, 2013, 41(12): 44-47. [李磊, 金良梅, 宋恩民. 基于区域合并和图像的非监督彩色图像分割算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(12): 44-47.]
- [3] Sun H J. Watershed image segmentation algorithm base on particle swarm and region growing[C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things. Harbin: IEEE, 2014: 51-54.
- [4] Jung C R. Combining wavelets and watersheds for robust multi-scale image segmentation[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25: 24-33.
- [5] Flores F C, Lotufo R A. Watershed from propagated markers: an interactive method to morphological object segmentation in image sequences[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28: 1491-1514.
- [6] Chen J, Deng M, Xiao P F, et al. 2011 Multi-scale watershed segmentation of high-resolution multi-spectral remote sensing image using wavelet transform[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(5): 908-926.
- [7] Chen J, Hu Y, Liu Z G. Research on image segmentation based on marked-watershed[J]. Software, 2012, 33(9): 115-117. [陈洁, 胡永, 刘泽国. 基于标记的分水岭图像分割算法研究[J]. 软件, 2012, 33(9): 115-117.]
- [8] Luo L, Xie M, Chen S. Watershed segmentation based on multi-scale morphological filtering[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(2): 168-173. [罗玲, 解梅, 陈杉. 基于多尺度形态滤波的分水岭图像分割方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(2): 168-173.]
- [9] Zhu J L, Wang M Z, Guo K. Watershed segmentation method based on morphological preprocessing and marker extraction[J]. Information Technology, 2010, 17(4): 17-20. [朱俊良, 王茂芝, 郭科. 基于形态学预处理和标记提取的分水岭分割算法[J]. 信息技术, 2010, 17(4): 17-20.]
- [10] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Transactions on Pattern, Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583-598.
- [11] Soille P. Morphological image analysis principles and applications[M]. 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002: 268-270.
- [12] O'Callaghan R J, Bull D R. Combined morphological-spectral unsupervised image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(1): 49-62.
- [13] Gao H, Siu W C, Hou C H. Improved techniques for automatic image segmentation[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(12): 1273-1280.
- [14] Chen L L, Yang C, Li M J, et al. Study on the improvement of watershed algorithm based on morphological gradient reconstruction[J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 4(5): 112-118. [陈林林, 杨晨, 李敏娟, 等. 基于形态学梯度重建的分水岭算法改进研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 4(5): 112-118.]
- [15] Yang J, Zhang D, Frangi Alejandro F, et al. Two-dimensional

- PCA: a new approach to appearance-based face representation and recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(1): 131-137.
- [16] Yu W S, Hou Z Q, Wang C Y, et al. Watershed algorithm based on modified filter and marker-extraction [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 825-829. [余旺盛, 侯志强, 王朝英, 等. 基于改进滤波和标记提取的分水岭算法[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 825-829.]
- [17] Zhang Z Y, Meng L H, Lei T. Adaptive gradient reconstruction for watershed based image segmentation [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(10): 1430-1437. [张志禹, 孟令辉, 雷涛. 自适应梯度重建分水岭分割算法[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(10): 1430-1437.] [DOI:10.11834/jig.20141004.]
- [18] Yilihamu Yaermainait. Based on the improved adaptive watershed image segmentation method researched [J]. Computer Simulation, 2013, 30(2): 377-405. [伊力哈木·亚尔买买提. 基于改进的自适应分水岭图像分割方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 377-405.]
- [19] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 468-471.
- [20] Long J W, Shen X J, Chen H P. Adaptive minimum error thresholding algorithm [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(7): 1134-1144. [龙建武, 申铨京, 陈海鹏. 自适应最小误差阈值分割算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(7): 1134-1144.]
- [21] Pun T. A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. Signal Processing, 1980, 2(3): 223-237.
- [22] He Z Y, Sun L N, Chen L G. Fast computation of threshold based on otsu criterion [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 269-272. [何志勇, 孙立宁, 陈立国. Otsu 准则下分割阈值的快速计算[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 269-272.]
- [23] Abutaleb A S. Automatic thresholding of grey-level pictures using two-dimension entropy [J]. Computer Vision Graphics and Image Proc, 1989, 47(1): 22-32.
- [24] Zhang G M, Zhou M M, Ma K. Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(5): 641-647. [张桂梅, 周明明, 马珂. 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 641-647.] [DOI: 10.11834/jig.20120506]
- [25] Gao L, Yang S Y, Li H Q. New unsupervised image segmentation via Marker-based watershed [J]. Journal of Image Graphics, 2007, 12(6): 1025-1032. [高丽, 杨树元, 李海强. 一种基于标记的分水岭图像分割新算法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(6): 1025-1032.] [DOI:10.11834/jig.20070612]