

基于改进滤波和标记提取的分水岭算法

余旺盛,侯志强,王朝英,刘 彬,宋 灏

(空军工程大学电讯工程学院,陕西西安 710077)

摘 要: 针对彩色图像分割中分水岭算法的过分割问题,提出了一种改进的基于标记提取的分水岭算法.改进后的算法由平滑滤波、彩色梯度计算、标记提取和分水岭变换组成.在平滑滤波阶段,设计了保边性能优于传统频域低通滤波器的频谱包络滤波器并运用于彩色图像及其梯度的平滑.彩色图像梯度计算直接在彩色向量空间进行.在标记提取阶段,利用局部极小值区的深度信息自适应控制扩展最小变换在平滑后的梯度图像中提取标记,然后融合极小值区的多重信息修改标记并将其叠加到原始梯度图像.对叠加标记后的梯度图像进行分水岭变换即得到最终的分割结果.实验结果表明,改进后的算法克服了传统算法边缘定位不准以及弱边缘提取困难等问题,参数选取更加合理,自适应程度提高.

关键词: 彩色图像分割;平滑滤波;分水岭;标记提取

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)04-0825-06

Watershed Algorithm Based on Modified Filter and Marker-Extraction

YU Wang-sheng, HOU Zhi-qiang, WANG Chao-ying, LIU Bin, SONG Hao

(Telecommunications Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: A modified marker-extraction based watershed algorithm was proposed in this paper to deal with the over-segmentation during color image segmentation. The modified algorithm was constituted of smooth filtering, color gradient calculation, marker-extraction and watershed transformation. During smooth filtering, a novel spectrum envelope filter was designed. The new filter had a better performance on edge-preserving which was used to smooth the imported color image and gradient image. The color gradient was calculated right in the color vector space. During the course of marker-extraction, H-minima transformation was used to extract minima-marker in smoothed gradient image firstly, whose parameter was adaptively controlled by the depth information of local minima region. Then, the extracted minima-marker was updated by more information of local minima region. Finally, the updated minima-marker was imposed on the original gradient image to get the marked gradient. The final result was gotten from the watershed transformation on the marked gradient. The experimental results indicate that the modified algorithm overcomes the difficulties in getting accurate edges and detecting weak edges. Furthermore, it has a more reasonable initialization rule of parameters and a better adaptability.

Key words: color image segmentation; smooth filtering; watershed; marker-extraction

1 引言

分水岭算法^[1,2]是图像分割中一种常用的技术,由于其能得到单像素宽、定位精确、连续封闭的分割边缘,一直以来都是图像分割中的研究热点.传统分水岭算法中,每一个局部极小值点对应一个分割区域,而这些局部极小值点中,既包含有代表真实目标的极小值点,又包含了大量由背景噪声和纹理细节引入的伪局部极小值点.大量伪局部极小值点经过分水岭变换形成了数以千计的细小区域,严重干扰了对真实目标的提取.对此,学者们提出在分水岭变换之前进行预处理^[3~5]的思想

来解决过分割问题.1999年 Soille^[3]提出了基于形态学的扩展最小变换(H-minima)技术,在分割过程中引入噪声和目标所具有的不同特征属性的相关先验知识,预先限制局部极小值的数量,从而达到控制分割区域数目、抑制过分割的目的.然而,H-minima的参数设置没有一个严格的理论标准,通常都是根据所要分割的图像进行人为设定.2004年 Bengtsson^[4]在结合模糊距离变换进行分水岭分割时引入H-minima技术提取标记,达到了抑制过分割的目的.由于平滑滤波可以平滑掉原始图像中的一些背景噪声和纹理细节,减少伪局部极小值点的数目,2006年高丽等人设计了一种结合频域低通滤波和

H-minima 技术的分水岭新算法^[5], 提出在梯度低频部分进行极小值标记, 然后将标记的极小值叠加到原始梯度图像形成标记图像. 所得结果过分割现象得到明显抑制, 但存在边缘定位不准和弱边缘提取困难等问题. 距离变换^[6-8]是分水岭算法的一种预处理方法, 它在对粘连的细胞图像、重叠的水果图像等的分割时能够提取粘连或重叠处的微弱边缘. Svensson^[6]提出基于模糊距离变换的细胞图像分割算法, 对距离变换和模糊距离变换的相关理论知识作了详细论述. Zhao^[7]以及 Zeng^[8]亦用到距离变换理论进行分水岭的标记提取, 然而, 距离变换本身并不能抑制过分割问题.

本文在文献[5]的基础上对平滑滤波、彩色梯度计算和标记提取分别作了改进, 提出了一种基于改进滤波和标记提取的分水岭算法, 克服了原文献中存在边缘定位不准以及弱边缘提取困难等问题.

2 基于标记的分水岭算法

基于标记的分水岭算法大体由平滑滤波、梯度计算、标记提取和分水岭变换四个步骤构成, 下面简要介绍文献[5]中算法步骤.

第一步: 对输入的彩色图像进行二阶巴特沃斯低通滤波.

第二步: 利用灰度级的形态学算子在 RGB 三个相关的颜色通道中独立地计算梯度, 最后的输出为各通道梯度的最大值.

第三步: 在梯度图像低频部分进行小阈值 H-minima 变换提取标记, 并将标记强制叠加于原始梯度图像.

第四步: 对标记的梯度图像进行分水岭变换得到分割结果.

3 基于改进滤波和标记提取的分水岭算法

在文献[5]的基础上, 本文主要做了如下改进: (1) 改进了频域低通滤波, 提出了频谱包络滤波器; (2) 彩色梯度计算时, 直接在彩色向量空间进行梯度计算; (3) 利用汇水盆地的深度信息自适应控制 H-minima 的参数, 并结合汇水盆地的多重信息对标记进行修改. 下面逐一介绍以上改进.

3.1 滤波改进与频谱包络滤波器

由于传统频域低通滤波器只保留了图像的低频成分, 在平滑背景噪声的同时不可避免地破坏了图像的边缘信息. 研究表明^[9], 除特殊情况外, 图像特定分量和其傅立叶变换之间不存在必然的联系. 这是因为每个频率分量 $F(u, v)$ 都包含了被指数项修正的 $f(x, y)$ 的所有值. 因此传统频域低通滤波理论对图像边缘在频域中的分布没有明确的描述. 然而, 由傅立叶逆变换公式可以看出, 频谱的主要特征在图像重构时起着关

键性的作用, 也即频谱中能量聚集的地方是重构图像的关键. 由傅立叶变换的性质可知, 对于周期性纹理较少的自然图像, 频谱中的能量主要聚集在谱的四个顶点附近, 其次是谱的四周(如图 1(a)所示). 对于中心平移变换后的频谱, 能量主要集中在几何中心和通过几何中心的两条交叉隆起附近(如图 1(b)所示). 通过对大量自然图像进行实验验证, 结果表明图像具体细节和形状的变化, 不会改变频谱的分布特性. 传统频域低通滤波器之所以在平滑背景噪声的同时模糊了图像的重要边缘, 正是因为它改变了原始图像的频谱分布特性(如图 1(c)所示), 截断了对重构图像起着重要作用的能量聚集区.

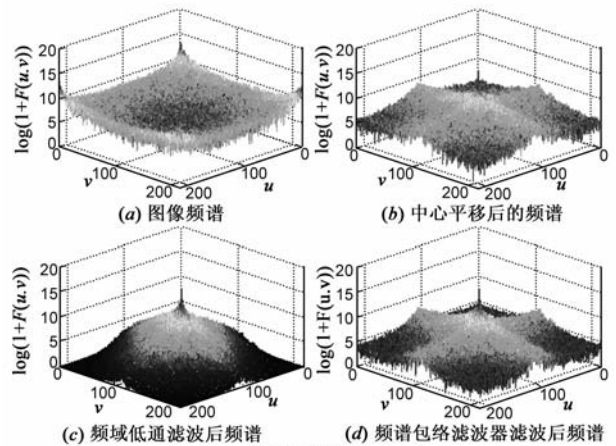


图1 图像频谱特性分析

基于以上分析, 本文根据图像频谱包络的形状, 设计了一种新型滤波器——频谱包络滤波器 (Spectrum Envelope Filter, SEF). SEF 的思想是尽量保留能量聚集区的频率而抑制非能量聚集区的频率, 和传统频域低通滤波的根本区别在于 SEF 基本保留了原始图像的频谱特性, 尤其是保留了对重构图像边缘起重要作用的能量聚集区, 使得重构后的图像边缘更加清晰. 这也是 SEF 的保边性能优于传统低通滤波器的原因所在. SEF 的核函数选择是开放的, 能够反应图像频谱包络形状的任何函数都可以当作核函数, 只要其形式上够简单, 含的参数够少, 这是 SEF 的一个优点. 下面将介绍一种重要的核函数 $S(u, v)$, 其表达式如下:

$$S(u, v) = (1 - \mu) D^k(u, v) + \mu \quad (1)$$

式中, $D(u, v)$ 是点 (u, v) 到核函数中心 $(\frac{M}{2} + 1, \frac{N}{2} + 1)$ 的归一化距离, 由下式给出:

$$D(u, v) = \left\{ \frac{4}{M^2 + N^2} \left[\left(u - \frac{M}{2} - 1 \right)^2 + \left(v - \frac{N}{2} - 1 \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(1)中参数 μ 代表滤波器中心的最小高度, k 是衰减控制因子, 通常取较小的自然数, 取值越大, 表示滤波

器的边缘衰减越剧烈;反之亦然.本文所有实验结果所取的参数为 $\mu = 0.1, k = 2$.图 1(d)显示了由 SEF 滤波后图像的频谱,基本保留了原始图像的频谱特性.

SEF 滤波无需对频谱作中心平移变换,执行效率略高于传统频域低通滤波器.步骤如下:

第一步:对输入图像 $f(x, y)$ 进行傅立叶变换得到 $F(u, v)$.

第二步:滤波 $F'(u, v) = F(u, v) \times S(u, v)$.

第三步:对 $F'(u, v)$ 进行傅立叶逆变换得到滤波结果 $f'(x, y)$.

3.2 彩色图像梯度计算

研究表明,对单独彩色平面的处理并不总是等于直接在颜色向量空间中的处理,分别计算图像梯度然后形成彩色图像可能得到与人眼视觉特性不一致的结果.因此,在彩色向量空间直接计算梯度比以单独分量图像为基础计算梯度具有更高的准确度.本文算法采用彩色向量空间梯度算法^[10],将梯度的概念扩展到向量函数,直接在 RGB 向量空间计算梯度.

设 $\mathbf{r}, \mathbf{g}, \mathbf{b}$ 是 RGB 彩色空间沿 R、G、B 轴的单位向量,像素沿水平方向和垂直方向的彩色梯度可用向量来表述:

$$\mathbf{u} = \frac{\partial R}{\partial x} \mathbf{r} + \frac{\partial G}{\partial x} \mathbf{g} + \frac{\partial B}{\partial x} \mathbf{b}, \mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial y} \mathbf{r} + \frac{\partial G}{\partial y} \mathbf{g} + \frac{\partial B}{\partial y} \mathbf{b} \quad (3)$$

g_{xx}, g_{yy}, g_{xy} 定义为这些向量的点乘:

$$\begin{cases} g_{xx} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} = (\mathbf{u})^T \mathbf{u} = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right|^2 \\ g_{yy} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = (\mathbf{v})^T \mathbf{v} = \left| \frac{\partial R}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial y} \right|^2 \\ g_{xy} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = (\mathbf{u})^T \mathbf{v} \\ = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right| \left| \frac{\partial R}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right| \left| \frac{\partial G}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right| \left| \frac{\partial B}{\partial y} \right| \end{cases} \quad (4)$$

彩色平面 R、G 和 B 以及由此而来的数量 g 都是坐标 (x, y) 的函数,利用该方法表示,彩色图像在 (x, y) 处最大变化率方向可以由角度给出:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2g_{xy}}{g_{xx} - g_{yy}} \right] \quad (5)$$

沿 θ 方向变化率的值,亦即彩色梯度幅度由以下公式给出:

$$\nabla I(\theta) = \left\{ \frac{1}{2} [(g_{xx} + g_{yy}) + (g_{xx} - g_{yy}) \cos 2\theta + 2g_{xy} \sin 2\theta] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

3.3 标记提取改进

标记提取是基于标记的分水岭算法成功分割图像的关键.但是,传统 H-minima 技术的参数选取存在屏蔽强纹理噪声和提取弱边缘的矛盾.过小时不能屏蔽强纹理噪声,过大则难以提取弱边缘.此外,对参数选取的鲁

棒性较差,同一参数对不同图像的分割结果差别很大.文献[5]提出在梯度的低频部分进行小阈值的 H-minima 技术提取标记,其建议参数取值为 2~4 之间.事实上,要提高 H-minima 技术的鲁棒性,人为设定参数是不科学的.本文根据对大量图像局部极小值的统计分析,总结出 H 参数的自适应取值方法如式(7)、(8)所示:

$$H = \alpha \cdot (M_2 - M_1) \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{(M_2 - M_0)^2 + (M_0 - M_1)^2}{(M_2 - M_1)^2} \quad (8)$$

式中, M_0 表示梯度图像的均值, M_1 表示梯度图像局部极小值的均值, M_2 表示梯度图像局部极大值的均值. $M_2 - M_1$ 为汇水盆地的平均深度, α 为自适应控制因子,取值范围为 $0.5 \leq \alpha < 1$.图 2 给出了较为直观的图示.

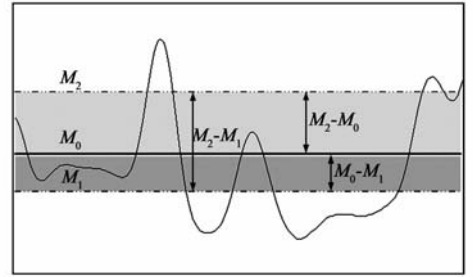


图2 H参数取值公式中相关参量含义图示

当 M_0 取 M_1 和 M_2 的平均值时,控制因子 $\alpha = 0.5$,表示深度小于平均深度一半的汇水盆地是由伪局部极小值点产生的;当 M_0 趋近于 M_1 时,表示原图像边缘较为明显,区域内部较为平坦,适当增大 H 参数可以在保留原始图像边缘的同时更大程度地减少伪局部极小值点,使分割的结果更为理想,此时 α 趋近于 1;当 M_0 趋近于 M_2 时,表示图像背景噪声和纹理细节较多,需要增大 H 参数来抑制强纹理细节引入的伪局部极小值点,此时 α 趋近于 1.化简式(7)、(8)可得 H 参数简单计算公式为:

$$H = \frac{(M_2 - M_0)^2 + (M_0 - M_1)^2}{M_2 - M_1} \quad (9)$$

仅对图像进行 H-minima 变换提取标记一般是不够的,要想获得更好的效果,需要结合汇水盆地的尺度和深度信息对标记进行修改.本文定义了两个汇水盆地综合信息参数:扩展后局部极小值区的面积- S 、扩展后局部极小值区的面积深度比- ∇S_h . S 表示扩展后局部极小值区域所包含的像素个数, ∇S_h 描述了 S 和扩展后局部极小值区平均深度 h 的比值.分别对 S 和 ∇S_h 进行由大到小排序后得到 $\alpha(S), \alpha(\nabla S_h)$.记 $\alpha(S), \alpha(\nabla S_h)$ 的中值为 $S^{\text{mid}}, \nabla S_h^{\text{mid}}$,挑选出同时满足大于各自中值的局部极小值区域,将小于各自中值的极小值区域作抛弃处理.将修改后的标记强制叠加到原始梯度图像上,形成修改标记后的梯度图像,在此基础上

进行分水岭变换可以得到较为满意的分割效果。

实际中,人们往往喜欢用较少的区域来分割一幅图像,当分割的区域数目大于一定的值就觉得分割的意义不大.因此,我们引入分割区域数目最大值限制参数 r 来控制最终分割区域的总数目不超过一定的上界.具体操作如下,

当局部极小值区域数目-Sum大于 $2r$ 时,只保留 S 和 ∇S_h 的前 $2r$ 项.在更新后的 S 和 ∇S_h 中再挑选出同时满足大于各自中值的局部极小值区域进行标记修改.由此得到的分割区域不会超过事先设定的参数 r .

本文改进算法的整体流程如图3所示.

4 实验结果与分析

为验证算法改进前后的效果,设计了一系列实验如图4所示.(a1)为标注有两个关注区的原始lena图像;(a2)为文献[5]算法的分割结果(59个区域);在(a2)基础上改进滤波方案得到(a3)所示结果;在(a2)基础上改进标记提取方案得到(a4)所示结果.(b1)~

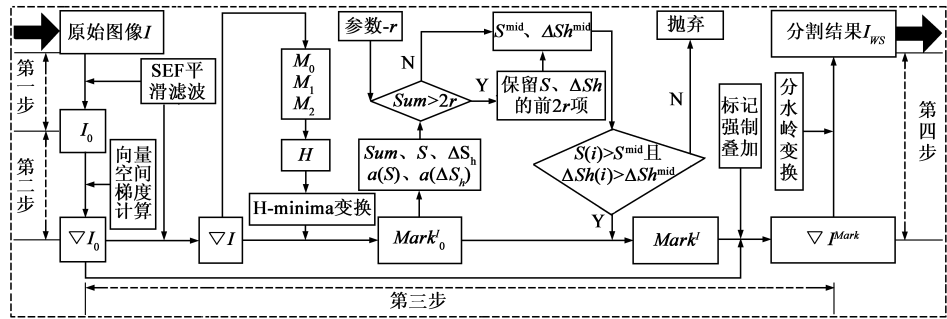


图3 改进算法流程图

(b4)为本文算法在不同 r 参数下的分割结果,参数 r 依次设为40、35、30、25,所得区域数依次为39、34、30、24.随着 r 的减小,分割结果中由强纹理细节(头发)产生的区域明显减少,由此可知,调整 r 参数可以有效抑制图像的背景噪声和纹理细节所产生的伪局部极小值点,从而使分割所得结果更为合理.对于一些简单的图像,经过扩展最小变换后所得的标记数目已经小于 r ,这时的 r 不起作用;只有对较为复杂的图像进行分割时,引入 r 参数可以规定分割区域数目的上限,使得分割结果不至因为所的区域过多而失去意义.在实际应用中,通过调整 r 的大小,可以满足不同分割精度的需求.(c2)、(c4)分别为本文算法对关注区1、2的分割结

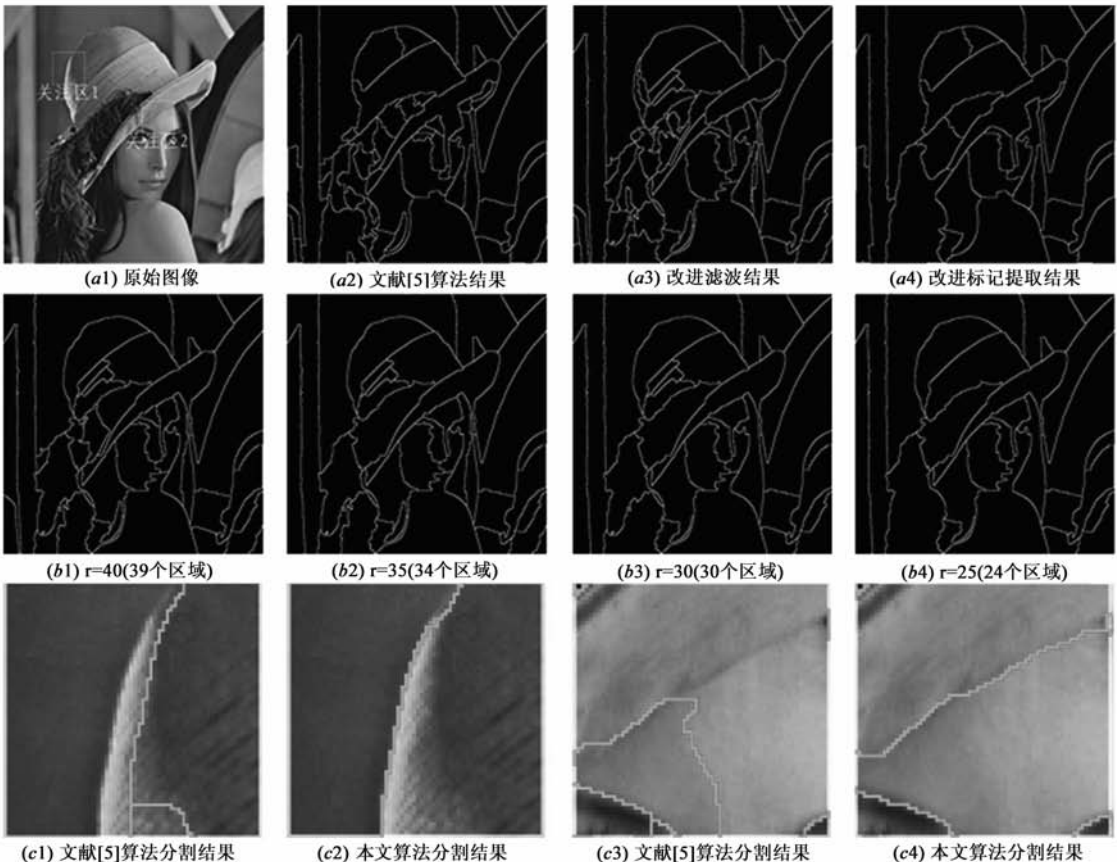


图4 算法改进前后分割结果比较

果,可见本文算法克服了文献[5]算法存在边缘定位不准((c1)所示)、弱边缘提取不全((c3)所示)等问题。

为了更充分地验证本文改进算法,我们对 Berkerly 彩色图像数据库^[11]中的彩色图像进行了大量的仿真测试,并引入 Sobel 算子分割结果、Canny 算子分割结果、文献[5]算法分割结果作为比较,结果表明本文算法具有更强的鲁棒性.图 5 给出了部分实验结果.图中(a)组为原始图像;(b)、(c)组依次为 Sobel 算子、Canny 算



图5 更多实验结果比较

子分割的结果,存在共同的缺点就是对目标边缘的分割过细,对纹理细节敏感;(d)组为文献[5]算法分割的结果,除了对弱边缘提取不全之外,目标内部仍然存在过分割,如第 4 幅图像树枝和鸟身都出现了过分割;(e)组为本文算法分割的结果,由图可以看出,对目标边缘的提取基本完整,目标内部无明显过分割现象,能够用较为合理的区域数(见表 1)描述分割的结果;(f)组为本文分割结果叠加于原始图像的效果;(g)组为 Berkerly 数据库提供的人工标记分割结果.通过比较可以发现,本文算法具有更好的分割效果,与人工标记分割的结果非常接近。

表 1 记录了在 1.61GHz, 1.37GB 环境下,运用 Matlab 软件对图 5 所列 6 幅图像($321 \times 481 \times 3$)进行分割所消耗的时间比较.可以看出,Sobel 算子和 Canny 算子具有较快的运行速度,本文算法比这两种算子稍慢,但是比文献[5]的速度稍有提高,平均每幅图像的分割时间缩短了 0.1782s.这主要得益于两个方面,首先改进后的滤波方案在滤波过程中不需要对频谱作中心平移变换,核函数的计算比巴特沃斯核函数计算要略简单,因此执行效率要略高;其次在彩色图像梯度计算时,文献[5]采用的是复杂度较高的形态学梯度算子,在选取模板进行膨胀和腐蚀的时候,模板大小会影响算法的执行效率,本文采用的是彩色向量空间梯度算子,直接在 RGB 空间求取彩色图像的梯度.实验中发现,改进后的滤波方案滤波速度比巴特沃斯低通滤波提高了 0.1s 左右,彩色梯度计算提高了约 0.13s,标记提取阶段的耗时则略长。

表 1 分割耗时(s)以及文献[5]和本文算法分割所得区域数比较

图片	Sobel 算子 耗时	Canny 算子 耗时	文献[5]算法		本文算法					区域数
			耗时	区域数	耗时					
					步骤一	步骤二	步骤三	步骤四	合计	
1	0.6532	1.2021	2.2126	6	0.6485	0.4124	0.5233	0.2845	1.8688	4
2	0.6117	1.1934	2.1963	17	0.6254	0.4225	0.6759	0.2662	1.9899	14
3	0.5991	1.2125	2.1039	10	0.6431	0.4164	0.7552	0.2649	2.0796	7
4	0.6013	1.0966	2.0947	39	0.6343	0.4119	0.7412	0.2192	2.0066	8
5	0.5847	1.0317	2.3133	21	0.6264	0.4186	0.8871	0.2650	2.1971	14
6	0.5922	1.0743	2.1014	4	0.6215	0.4252	0.5545	0.2100	1.8112	10

5 结论

本文通过传统基于标记的分水岭算法基础上改进平滑滤波方案,有效解决了传统算法边缘定位不准、对弱边缘提取困难等问题;通过引入彩色向量空间梯度算法在 RGB 空间直接求取彩色图像梯度,获得了更充分的彩色梯度信息;通过改进标记提取的方案,增强了标记提取的自适应性和鲁棒性,进一步优化了分割的结果.仿真中发现,对于强纹理背景下的小目标分

割,本文算法还不是十分理想,如何更充分地利用原始图像提供的丰富的彩色信息进行标记提取是我们下一步的工作。

参考文献

- [1] L Vincent, et al. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583 - 598.
- [2] M Fernand. Topographic distance and watershed lines[J]. Sig-

- nal Processing, 1994, 38(1): 113 – 125.
- [3] P Soille. Morphological Image Analysis Principles and Applications[M]. Berlin, Germany: Springer Verlag, 1999. 123 – 140.
- [4] E Bengtsson, et al. Robust cell image segmentation methods [J]. Pattern Recogn. Image Anal, 2004, 14(2): 157 – 167.
- [5] 高丽, 等. 基于标记的 Watershed 图像分割新算法[J]. 电子学报, 2006, 34(11): 2018 – 2023.
- L Gao, et al. A new marked-based watershed algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(11): 2018 – 2023. (in Chinese)
- [6] S Svensson. Aspects on the reverse fuzzy distance transform [J]. Pattern Recognition Letters, 2008. 29(7): 888 – 896.
- [7] Y Q Zhao, et al. Improved Watershed Algorithm for Dowels Image Segmentation [A]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA2008) [C]. Chongqing, China. 2008. 7644 – 7648.
- [8] Q B Zeng, et al. Algorithm based on marker-controlled watershed transform for overlapping plant fruit segmentation[J]. Optical Engineering, 2009, 48(2): 027201 – (1 – 10).
- [9] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007. 123 – 124.
- [10] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 172 – 178.

- [11] Martin D, et al. A Database of Human Segmented Natural and Its Application to Evaluating Segmentation Algorithms and Measuring Ecological Statistics [A]. IEEE 8th International Conference on Computer Vision (ICCV2001) [C]. Vancouver, Canada, 2001. 416 – 423.

作者简介



余旺盛 男, 1985 年出生于湖南平江. 现为空军工程大学电讯工程学院硕士研究生, 2008 年获空军工程大学学士学位. 主要研究方向为彩色图像消噪、平滑与分割等.
E-mail: xing_fu_yu@sina.com



侯志强 男, 1973 年出生于陕西眉县. 2005 年获西安交通大学电子与信息工程学院控制科学与工程专业博士学位. 主要研究领域为多传感器信息融合、机动目标跟踪、图像处理等.
E-mail: hou_zhq@sohu.com

