

# 一种基于局部最小代价分水岭变换的 图像分割新方法

周军妮<sup>1,2</sup> 曹剑中<sup>1</sup> 刘波<sup>1</sup> 田雁<sup>1,2</sup> 杨小军<sup>1</sup> 李变侠<sup>1</sup> 杜云飞<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 利用数学形态学的基本理论, 提出了一种基于局部最小代价分水岭算法的图像分割新方法. 该方法应用数学形态学的腐蚀、膨胀及坎尼(canny)算子将图像中包含外边沿的部分分割出来; 对该局部区域进行最小代价的分水岭变换; 提出了解决过度分割问题的一些准则. 实验结果表明, 该方法不但节省运行时间, 而且其能够提取出目标的完整精确的外轮廓边沿, 从而在某些特定的应用领域具有独特的优势.

**关键词** 数学形态学; 分水岭算法; 坎尼(canny)算子; 最小代价; 图像分割

**中图分类号** T **文献标识码** A

## 0 引言

在对图像的研究和应用中, 人们往往仅对图像中的某些部分感兴趣. 这些部分常称为目标或者前景(其它部分称为背景), 为了辨识和分析图像中特定的、具有独特性质的区域(目标), 需要将有关区域分离提取出来, 在此基础上才能对目标进一步分析利用, 以使得更高层次的分析和理解成为可能<sup>[1,2]</sup>. 因此, 图像分割的优劣直接影响着目标识别、目标判读等后续的研究工作的进行, 而通过提取目标完整外轮廓的方法来实现目标与背景的有效分离不仅是提高图像分割质量的一个很好的方式, 而且在某些特定的应用领域有着重要的意义, 如在采用形心跟踪算法的自动跟踪系统中, 分割出完整的目标外轮廓有助于提高形心计算的准确性.

虽然传统的区域生长法可以得到封闭轮廓, 但难以确定生长的终止条件. 而基于数学形态学理论的分水岭(Watersheds)算法是由 S. Beucher 和 Lantuejoul 最早提出, 近几年来发展起来的一种图像分割方法. 该算法对微弱边缘敏感, 而且可以得到单像素宽的、连通的、封闭的及位置准确的轮廓<sup>[3,4]</sup>. 本文正是利用分水岭算法的这些优点, 并结合数学形态学的基本运算和坎尼(canny)算子以及最小代价等概念, 首先应用数学形态学的腐蚀、膨胀及坎尼(canny)算子将图像中包含外边沿的部分分割出来; 然后对该局部进行最小代价的分水岭变换. 实验结果表明, 这是一种实用可行的图像分割新方法, 能够快速分割出目标的完整外轮廓.

## 1 局部分水岭变换原理

### 1.1 分水岭变换原理

分水岭分割算法的思想最初源于测地学的地形

地貌, 而图像中每一点的灰度值则代表该点的海拔高度. 分水岭的概念可以通过模拟自底向上逐渐淹没该地形图的过程来形象理解. 首先我们称图像中具有均匀低灰值的区域为极小区域(the minima). 对于一个给定的极小区域, 水珠会滚入该区域的所有点构成的集合, 称为该极小区域的集水盆(catchments basin). 在每一个极小区域表面, 刺穿一个小孔, 然后不断有水逐渐匀速进入该小孔, 即地形图逐渐被淹没. 随着淹没过程的逐渐进行, 相对于每一个极小区域的集水盆逐渐外扩, 为了避免两个集水盆的汇合, 我们在汇合处筑起大坝, 直到地形图完全被淹没, 大坝即形成分水岭(Watersheds). 该模拟演示过程如图 1.



图 1 分水岭分割算法模拟演示过程

Fig. 1 Watersheds process analogy

在分水岭分割的具体实施过程中, 通常采用滤波和极小区域标记处理. 首先, 对不同的极小区域进行标记, 然后进行淹没, 对同一个极小区域的集水盆标记相同. 当且仅当不同的集水盆将要汇合时, 该汇合处才标记为分水岭. 在此基础上, Luc Vincent 和 Pierre Soille 提出了一种利用先进先出(FIFO)数据结构的快速分水岭分割算法. 该算法分两个步骤进行计算: 排序(Sorting)和淹没(Flooding)过程. 详细算法说明见参考文献[5,6]. 然而, 由于该算法是对图像中每一个像素点进行标注检测, 因此耗费时间, 还有过度分割的经典问题不能很好解决, 故而如何更好的利用分水岭变换的原理来解决图像分割的问题值得进一步探讨.

要进行图像分割, 由于目标与背景内部的变化较小, 而边缘变化较大. 为了缓解过度分割的问题, 得到目标的外轮廓信息, 通常把梯度图像作为输入

图像. 因而梯度函数的选择也至关重要.

### 1.2 局部区域分割

为了节省计算时间, 本文采用局部区域分割的方法. 具体实现过程如下:

1) 应用数学形态学的方法进行图像增强. 通常的图像增强是结合 Top-hat 变换与 Bottom-hat 变换. Top-hat 变换被定义为原图像减去其开运算 (Opening), 这种方法对在较亮的背景中求暗的像素聚集体, 或在较暗的背景中求亮的像素聚集体非常有效; Bottom-hat 变换被定义为原图像与闭运算 (Closing) 的差, 该运算突出了目标与背景之间的差别. 文中我们定义半径为 3 的圆作为结构元素, 利用原图像 + Top-hat - Bottom-hat 进行图像增强, 增强结果如图 6.

2) 由于 canny 边缘检测法利用高斯函数的一阶微分, 它把边缘检测的问题转换为检测单位函数极大值的问题, 且能在噪声抑制和边缘检测之间取得较好的平衡. 因此, 我们选择 canny 算子作为梯度算子对增强后的图像进行边缘检测.

3) 用膨胀运算对 canny 边缘检测后的图像进行膨胀, 然后填充孤立的小洞, 再经过多次腐蚀操作, 得到目标轮廓的较内侧轮廓; 同理经过多次膨胀操作可得到目标的较外侧轮廓. 最终, 得到如图 6 的局部区域. 即得到需要进行分水岭变换的区域.

局部区域分割的过程充分利用了数学形态学的腐蚀、膨胀、开、闭、Top-hat、Bottom-hat 等运算的各自优势. 不但得到了较好的局部区域分割效果, 而且为后续的分水岭变换提供了方便.

## 2 局部最小代价的分水岭变换

传统的分水岭算法中主要是通过求地形影响区 (geodesic influence zone) 来求测地 SKIZ, 从而得到分水岭. 但其会产生厚的分水线或分水区域等现象. 有关 SKIZ 的相关概念定义详见文献 [5~9], 这里不再重复. 本文主要利用基于梯度函数较低斜坡的代价函数确定的最小  $\pi$ -地形距离来标注集水盆. 设  $f(p)$  为梯度函数, 每一个像素  $p$  定义其距离为  $1(\text{dist}(p, p') = 1)$  的邻域集  $p' \in N(p)$ , 邻域一般可定义为 4 邻域或 8 邻域. 有关基本概念详述如下:

定义 1: 基于梯度函数的较低斜坡 (Lower slope) 定义为像素  $p$  到它较低邻域的最大陡度. 数学表示式为

$$LS(p) = \max_{p' \in N(p)} \frac{f(p) - f(p')}{\text{dist}(p, p')} | f(p') \leq f(p) \quad (1)$$

当  $f(p)' < f(p), \forall p' \in N(p)$  时定义为斜率最大的相邻点, 记为  $\max LS(p)$ ; 对于  $f(p)' > f(p), \forall p' \in N(p)$  的情况不包括在该定义中.

定义 2: 基于较低斜率的代价函数 (Cost function) 定义如下

$$\text{cost}(p_{i-1}, p_i) =$$

$$\begin{cases} LS(p_{i-1}) \text{dist}(p_{i-1}, p_i), & f(p_{i-1}) > f(p_i). \\ LS(p_i) \text{dist}(p_{i-1}, p_i), & f(p_{i-1}) < f(p_i). \\ \frac{1}{2} LS(p_{i-1}) + LS(p_i), & \text{dist}(p_{i-1}, p_i), f(p_{i-1}) = f(p_i). \end{cases} \quad (2)$$

定义 3: 最小  $\pi$ -地形距离 (The minimal  $\pi$ -topographical distance) 定义如下

$$TD_i^\pi(p, q) = \sum_{i=2}^n \text{cost}(p_{i-1}, p_i) \quad \pi = (p = p_1, p_2, \dots, p_n = q) \quad \forall i, p_i \in N(p_{i-1}) \quad (3)$$

根据定义 3, 像素  $p$  到局部极小区域  $m_i$  的最小  $\pi$ -地形距离是指  $p$  到极小区域  $m_i$  的最陡下降路线所确定的距离. 该距离严格确保了最小代价.

定义 4: 基于最小  $\pi$ -地形距离的标注 (Labeling based on the minimal  $\pi$ -topographical distance) 是指: 设  $L_{T\pi}(m_i)$  为极小区域  $m_i$  的标记, 若像素点  $p$  到  $m_i$  的距离为最小  $\pi$ -地形距离, 那么  $p$  点也标记为  $L_{T\pi}(m_i)$ .

定义 5: 基于最小  $\pi$ -地形距离的关于极小区域  $m_i$  积水盆  $CB(m_i)$  是指这样一些像素点的集合, 这些点 ( $p \in \Omega$ ) 距离  $m_i$  比其它极小区域  $m_j$  更近, 定义如下

$$CB(m_i) = \{p | f(m_i) + TD_i^\pi(p, m_i) < f(m_j) + TD_j^\pi(p, m_j) \quad \forall j \neq i \quad (4)$$

这样, 属于同一集水盆  $CB(m_i)$  的像素点具有同样的标志  $L_{T\pi}(m_i)$ .

定义 6: 分水岭 (Watershed) 的定义如下

$$WT(p) = \{p | p \notin \bigcup_{i=1}^n CB(m_i), \quad n \text{ 表示集水盆的个数} \} \quad (5)$$

## 3 过度分割问题的解决

由于已进行了局部区域分割, 因此图像被天然地分割为三部分: 需要进行分水岭算法的区域 ( $R_{ws}$ )、需要进行分水岭算法的区域的外部 ( $R_{L(m_1)}$ )、需要进行分水岭算法的区域的内部 ( $R_{L(m_2)}$ ). 并将  $R_{L(m_1)}$  标注为  $L(m_1)$ , 并将  $R_{L(m_2)}$  标注为  $L(m_2)$ . 具体标注如图 6.

分水岭算法本身对灰度级微弱变化敏感, 这既是优点, 也是弊端. 过度分割问题即是由本身特性决定的一个很大的缺陷, 但通过一些有效的准则也能很好的解决. 具体准则如下:

准则 1: 去除  $R_{ws}$  中孤立像素点准则

对于  $\forall p \in R_{ws}$  的像素点, 设  $p' \in N_8(p)$  ( $p'$  为  $p$  的 8 邻域), 若  $f(p) > f(p') = 0$ , 那么将  $p$  点淹没. 根据前述定义 4 进行标注, 此时,  $R_{ws}$  域即被更新.

准则 2: 淹没  $R_{ws}$  中局部极小值点准则

对于  $\forall p \in R_{ws}$  的像素点, 设  $p' \in N_8(p)$  ( $p'$  为  $p$  的 8 邻域), 若  $f(p) < f(p')$  (不考虑  $f(p') = 0$  的点), 那么将  $p$  点淹没, 并根据前述定义 4 进行标注. 为了避免淹没了图像的轮廓线, 当  $p$  的邻域点  $p'$  仅有两个像素点时, 只有以下十二种情况为合法的.

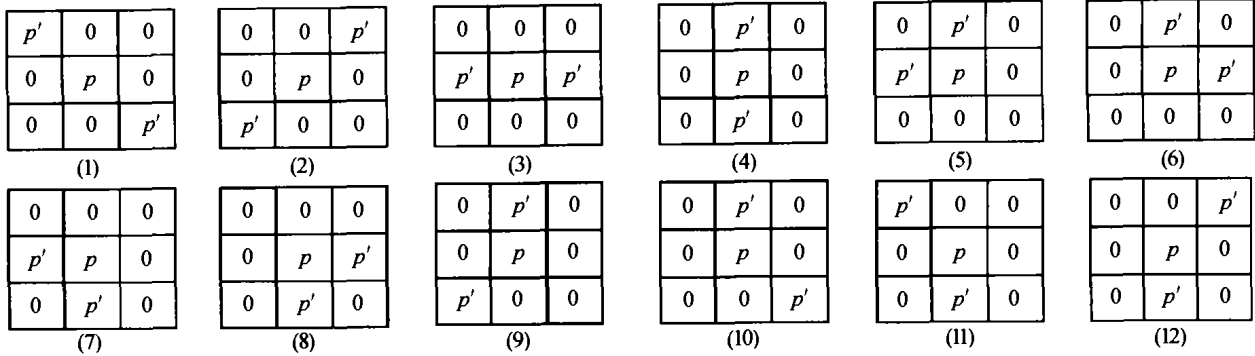


图2 准则2  
Fig. 2 The second rule

准则3: 去除厚边缘及锯齿状边缘准则

经过前两个准则处理后,有可能还存在过厚的边缘或锯齿状边缘. 如何在处理过程中既反映图像的真实细节,又去除某些厚边缘及锯齿状边缘,我们依据这样的一个准则来进行判断. 即确保该矩阵所包含的非零灰度值为同一集水连通区域. 具体处理过程如下所示:以下以图7处理过程中的真实数据简单说明该准则.

可以看出图3(1)所示的3×3矩阵所代表的边缘是一锯齿状边缘. 首先对该局部边缘进行前述的动态淹没过程,结果由图3(1)上的箭头标示. 可以看出局部边缘被分割为两个集水域,为了保证连通性,我们做了如图3(2)所示的调整. 然后对非连通区域的像素点进行淹没和标注,结果为图3(3).

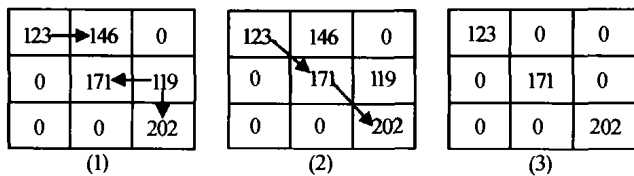


图3 准则3  
Fig. 3 The third rule

准则4: 局部区域内部极小区域的处理准则

对于局部区域内部的极小区域,我们应用2局部最小代价的分水岭变换进行运算.

4 算法仿真

采用本文所述的方法,我们在多组图像上进行了仿真实验,实验中采用了工程中常用的类间方差域值法、基于梯度图像的分水岭变换与文中所述的基于局部最小代价的图像分割算法作比较. 图4所示为需要处理的原始图像,图9、图5和图8分别为类间方差域值法、基于梯度图像的分水岭变换和基于局部最小代价的图像分割算法的处理结果. 从图示中可明显的看出,图5所示的基于梯度图像的分水岭变换其结果由于分水岭算法本身的特点,过分割现象非常明显,图9中所示采用类间方差域值法进行图像分割得到的结果,其目标外轮廓的连续性、完整性不够好. 而采用文中所述的基于局部最小代价分水岭变换的图像分割算法,首先经过局部化处理,如图6所示两条轮廓线中间的部分为需要处理

的局部部分. 局部化缩小了需要进行分水岭变换区域,在减少了计算量的同时也改善了过分割现象. 图7所示为对局部增强图像的梯度图像(本文选择canny算子),该图像仅仅是局部区域的梯度图像,是进行分水岭变换前的预处理. 分水岭变换的优势在于可以提供封闭完整的目标轮廓,因此本文所提出的算法旨在于通过局部分水岭变换,得到目标的



图4 原图  
Fig. 4 Original image



图5 梯度图像的分水岭变换结果(过分割)  
Fig. 5 The watershed transform of the gradient (over-segmentation)

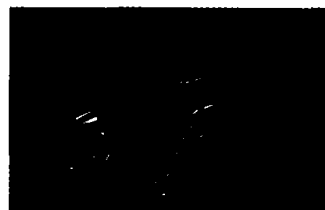


图6 增强后的图像及需要进行分水岭变换的局部区域的标志  
Fig. 6 Enhanced image of original image based on to-hat and low-hat transformation and local region needing watershed



图7 局部增强图像的canny边沿检测  
Fig. 7 Enhanced image's canny edge detection of local region(of Fig. 5)



图8 应用本文方法分割结果

Fig. 8 Segmentation result based upon methods in this paper



图9 类间方差域值分割结果

Fig. 9 Ostu segmentation result

完整外轮廓后,最终得到目标的二值分割图像,图8即为采用本文方法最终得到的分割结果.实验证明,该方法应用于对目标轮廓完整性要求强的场合的图像分割,效果良好.

## 5 结论

本文利用数学形态学的基本理论,提出了一种基于局部最小代价分水岭算法的图像分割新方法.该方法首先应用数学形态学的腐蚀、膨胀及坎尼(canny)算子将图像中包含外边沿的部分分割出来;然后对该局部区域进行最小代价的分水岭变换;最后提出了解决过度分割问题的一些准则.实验结果表明,该方法不但节省运行时间,而且其能够提取出目标的完整精确的外轮廓边沿,从而在某些特定的应用领域具有独特的优势.

## New Image Segmentation Methods Based on Regionally Minimal Cost Watershed Transform

Zhou Junni<sup>1,2</sup>, Cao Jianzhong<sup>1</sup>, Liu Bo<sup>1</sup>, Tian Yan<sup>1,2</sup>, Yang Xiaojun<sup>1</sup>, Li Bianxia<sup>1</sup>, Du Yunfen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-06-25

**Abstract** According to mathematical morphology, a new image segmentation method based on regionally minimal cost watershed transform is introduced. Firstly, local region needing watershed was segmented after erosion, dilation and edge detection by canny. Secondly, the local region of the picture is processed applying the methods in this paper. And in the last of this paper many rules solving over-segmentation are introduced. Experiments show that the new algorithm's time is low and the method in this paper has the advantage of giving accurate contour of object.

**Keywords** Mathematical morphology; Watershed transform; Canny edge; Minimal cost; Image segmentation

**Zhou Junni** was born in 1977 and received the B. S degree from Xi'an Jiaotong University in 2000. Now she is studying for her M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. Her research interests include the application of posture measurement, software designing and image processing.



## 参考文献

- 1 章毓晋. 图像分割. 北京: 科学出版社  
Zhang Y J. Image Segmentation. Beijing: Science Press
- 2 陈小梅, 倪国强, 刘明奇. 基于分水岭算法的红外图像分割方法. 光电子·激光, 2001, 12(10): 1072 ~ 1075  
Chen X M, Ni G Q, Liu M Q. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12(10): 1072 ~ 1075
- 3 谢凤英, 姜志国, 周付根. 基于数学形态学的免疫细胞图像分割. 中国图象图形学报, 2002, 7(11): 1119 ~ 1122  
Xie F Y, Jiang Z G, Zhou F G. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(11): 1119 ~ 1122
- 4 马兆勉, 陶纯堪. 自然背景下人工目标的检测与分割. 中国激光, 2000, 27(3): 237 ~ 242  
Ma Z M, Tao C K. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(3): 237 ~ 242
- 5 Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. IEEE Trans, 1991, 13(6): 583 ~ 598
- 6 Job B T M, Roerdink, Arnold Meijster. The watershed transform: definition, algorithms and parallelization strategies. IOS Press. Fundamental Information, 2001, 41: 187 ~ 228
- 7 Beucher S. The Watershed Transformation Applied To Image Segmentation. France
- 8 Bieniek A, Moga A. An efficient watershed algorithm based on connected components. Pattern Recognition, 2000, 33: 907 ~ 916
- 9 崔屹. 图像处理与分析-数学形态学方法及应用. 北京: 科学出版社  
Cui Y. Image Processing and Analyzing - Method and Application of Mathematical Morphology. Beijing: Science Press