基于邻接表的分水岭变换快速区域合并算法

李苏祺 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对图像分水岭变换存在的过分割问题, 提出了一种快速区域合并算法. 该算法先对梯度图像进行Lee滤波以降低分水岭变换的过分割程度, 在传统分水岭变换初步分割的基础上, 利用区域邻接图(RAG, Region Adjacency Graph)的邻接表数据结构描述过分割区域之间的关系, 采用分级阈值合并的方式完成区域合并, 以降低合并计算的复杂度. 合并过程中, 将基于区域相对边界强度和边界长度的相似度度量准则与传统的区域灰度均值差异度准则相结合, 构成新的区域可合并度综合评价函数, 以保证区域合并准确可靠. 实验结果表明, 与传统的分水岭变换区域合并算法相比, 该算法有效地提高了区域合并的准确性, 并大幅提升了运算速度.

关 键 词: 图像分割; 分水岭; 过分割; 区域合并; 区域邻接图

中图分类号: TP 391. 41

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2008) 11-1327-04

Fast region merging algorithm for watershed transform based on adjacency list

Li Suqi Zhang Guangjun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A fast region merging algorithm was proposed to solve the oversegmentation problem produced by the watershed transform for image segmentation. Firstly, the gradient image was preprocessed with Lee filter to reduce the oversegmentation initially. Then the region adjacency graph (RAG) with its adjacency list of data structure was used to represent the image partitions after the initial partitioning with the classical watershed transform. On the basis of the adjacency lists the region merging process followed a two-step threshold merging strategy in order to reduce the computation complexity. A hybrid region dissimilarity function was presented to measure the degree of similarity between two regions for the region merging. It combined the relative boundary integrity criteria and the boundary length criteria with the traditional region homogeneity criteria to increase the contour accuracy of merged regions. Experimental results show that this algorithm improves the region merging accuracy and processing speed greatly.

Key words: image segmentation; watersheds; oversegmentation; region merging; region adjacency graph

分水岭变换作为一种有效的图像分割方法, 其具有区域边界封闭、全局区域边缘定位的特点. 但由于分水岭变换对微弱边缘十分敏感, 图像中的自然背景、噪声、物体表面细微的灰度变化, 会导致过分割现象的出现. 针对过分割问题, 研究人员提出了许多解决办法. 常用的方法是在分割前对图像进行平滑降噪等预处理[1-3]以及图像梯度重建[3-4], 但简单平滑或梯度重建后依然会存在过分割现象, 而当平滑过度或梯度重建结构元素较大时, 容易使重要的轮廓信息模糊甚至丢失, 造成区域轮廓位置偏移. 多尺度分析方法[5]也能降低过分割程度, 这类算法在分辨率降低较大时也

收稿日期: 2007-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50727502)

作者简介: 李苏祺(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士生, lisuq@buaa.edu.cn.

容易产生区域轮廓模糊和移位. 在分水岭分割后处理方面, 文献[6]提出了 watersnake边界提取算法, 通过 snakes运算确定能量函数最小极值代表准确边界, 该算法复杂度较高. 相比而言, 区域合并[7]作为一类直接有效的后处理方法, 得到了更广泛的研究应用[3-8-9], 但由于初始分水岭分割所得区域数目往往较多, 这类算法通过迭代运算寻求最优合并区域过程的计算量较大, 使其在速度方面受到限制. 为提高区域合并速度, 本文在图像梯度预处理的基础上, 提出基于邻接表的分级阈值区域合并算法, 以避免迭代运算及其相应的数据更新, 降低合并复杂度; 同时, 在构造区域相似度评价函数时, 除考虑区域平均灰度差异外, 还增加了相对边界强度、边界长度等度量准则, 保证了合并的准确性.

1 图像梯度 Lee滤波

分水岭变换进行图像分割时使用的是梯度幅值(通常简称为梯度)图像, 梯度图像中由噪声、量化误差以及一些细小纹理引起的局部极值, 是导致分水岭变换过分割现象出现的直接因素. 常规的平滑预处理是对原图像进行去噪滤波, 然后再求梯度进行后续分割. 原图像的平滑处理, 对噪声这类在图像中分布独立、与其邻域像素灰度值差别明显的干扰能够起到较好的抑制作用, 而对于如图 1中所示的量化误差等成片分布、灰度值变化微小的干扰因素抑制效果不明显. 相比而言, 在梯度图像中量化误差等细微灰度变化对应的局部极值分布比较零散, 更容易利用平滑滤波去除.

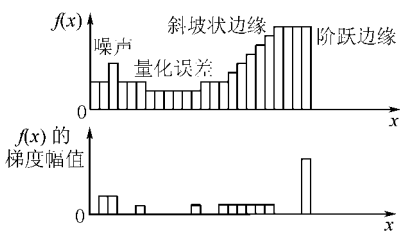


图 1 一维灰度值分布及其对应梯度分布

考虑到图像梯度上述特点, 本文采用先由原图像求梯度图像, 然后再对梯度图像进行平滑滤波的预处理方式, 达到在一定程度上降低过分割程度的目的. 本文采用一种充分利用了图像信号局部统计特性的 Lee滤波[10]进行中值滤波平滑处理, 去除梯度图像中零散分布的局部极值.

2 基于邻接表的快速区域合并

利用上述平滑后的梯度图像进行分水岭变换得到的初步分割结果, 只能在一定程度上抑制过分割现象, 对于复杂图像, 分割后区域数量依然会较多, 需按照区域之间的相似度进一步进行合并, 以得到各具特性且能体现图像中景物轮廓特征的合理分割区域.

2.1 区域相似度度量准则

区域相似度度量准则是合并的基础, 直接影响到区域合并的次序和次数. 传统区域合并大多建立在灰度差异的基础上, 文献[7]中基于区域平均灰度差异的相似度评价函数被广泛采用, 其定义为

$$\delta(R_i, R_j) = \frac{\|R_i\| \cdot \|R_j\|}{\|R_i\| + \|R_j\|}[\mu(R_i) - \mu(R_j)]^2 \tag{1}$$

其中, R_i 和 R_j 表示标号分别为 i, j 的两个相邻区域; $\|R_i\|$ 和 $\mu(R_i)$ 分别代表区域 i 的势(即区域中像素个数)和灰度均值.

除利用灰度差异衡量区域之间的相似度之外, 区域之间边界的特性也是重要指标. 文献[3]指出两个区域之间的边界的强度应作为合并判断准则, 具体通过边界中强点(strong pixels)的比例进行衡量, 边界像素是否为强点通过其梯度值与阈值比较而决定. 然而自然图像中很少存在分布均匀的阶跃边缘, 通常为灰度值渐变、梯度值不均衡的斜坡边缘, 在图像灰度变化比较缓慢、对比度不大的情况下, 不同边缘的梯度值差别较大. 采用边界像素的梯度值作为边界强度直接判别边缘特征, 往往会导致区域合并后边缘丢失. 为防止重要边缘丢失, 本文提出采用相对边界强度来衡量区域边界是否为边缘, 即通过边界像素的梯度均值与该边界两边的区域像素梯度均值进行对比来确定区域可合并度, 具体定义为

$$\delta^{\mathrm{RI}}(R_i, R_j) = \frac{\upsilon(B_{ij})}{\min(\upsilon(R_i), \upsilon(R_j))} \tag{2}$$

其中 $\upsilon(R_i)$, $\upsilon(R_j)$ 和 $\upsilon(B_{ij})$ 分别表示区域 i, j 的梯度均值及其之间边界的梯度均值.

分割图像中一个区域的相邻区域通常不止一个, 按邻域不同该区域的边界可以分成不同部分, 各部分边界长度不尽相同. 在特殊情况下, 区域边界长度也是衡量区域可合并度的指标, 如后文将要提到的在分级合并过程中在大区域边缘会形成小区域, 将这类小区域合并到同质大区域时, 即可用边界长度作为可合并度衡量指标. 具体定义为

$$\delta^{\mathrm{L}}(R_i, R_j) = \frac{\psi(B_{ij})}{\psi(R_i)} \tag{3}$$

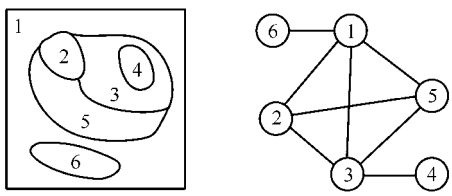
其中, $\psi(R_i)$ 表示区域 i 的边界像素总个数;

$\Phi(B_{i,j})$表示区域 i, j之间的边界像素个数.

综合以上区域合并因素, 本文根据分级合并不同阶段的特点, 选择上述 3个或其中部分因素衡量区域可合并度引导区域合并, 具体应用方式及对应公式在下文阐述.

2 2　基于邻接表分级阈值合并方法

初步分割得到的过分割区域可采用区域邻接图 (RAG, Region Adjacency Graph)[11] 的数据结构进行描述, 如图 2a中所示分割图像 6个区域之间的关系可用如图 2b中区域邻接图表示. RAG可定义为 $G=(V, E)$, 其中 $V=\{1, 2, \cdots, K\}$表示 K 个顶点, 每个顶点代表一个区域; $E\subset V\times V$表示 RAG每条边 (或弧), 边 (或弧)的权重表示两个区域之间的差异度. 区域合并的过程就是 RAG顶点合并同时进行相应数据更新的过程.



a　分割区域　　b　区域邻接图

图 2　分割图像及其对应的区域邻接图

RAG的数据操作比较耗时, 主要集中在图的创建和遍历等方面, 这与图的存储数据结构直接相关. 分水岭变换过分割区域数量较多, 但每个区域的邻域通常只有几个, RAG属于边稀疏图, 本文采用邻接表的链式存储结构存储 RAG信息, 并按照阈值分级合并的方式进行区域融合, 避免逐一合并的迭代过程, 节省在 RAG数据更新、排序、搜索等方面所消耗的大量时间. 阈值分级合并分为基于无向图的初步合并和基于有向图的小区域合并.

2 2 1　基于无向图的初步合并

利用 RAG根据阈值限制, 建立类似 RAG的区域合并图 (RMG, Region Merging Graph), 表示符合阈值要求、满足合并条件的各区域之间的关系. RMG为 RAG的子图, 利用 RMG同时进行多个区域合并, 具体步骤如下:

1) 建立 RAG邻接表. 将 RAG定义为特殊有向图, 即每条边用方向为区域序号大的顶点指向序号小的顶点的弧代替. RAG邻接表为单链表数组, 第 i 个单链表存储区域 R_i 的信息以及 R_i 与区域序号小于 i 的各邻域 R_i 之间相关信息 (R_N^j代表区域序号为 j与区域 R_i 相邻的区域), 其头结点的数据域存储区域 R_i 相关信息, 各表结点的邻接点域存储 R_N^j的序号 j, 表结点的数据域存储 R_i 与 R_{iN}^j的灰度差异和边界相关信息.

2) 建立 RMG邻接表. 设置区域灰度均值差异度阈值 T_G 和相对边界强度阈值 T_R, 扫描 RAG邻接表, 设第 i个单链表的第 n 个表结点 N_i^n 存储的是区域 R_i 与 R_{iN}^j的相关信息, 若 $\delta^G(R_i, R_{iN}^j)<T_G$ 且 $\delta^{RI}(R_i, R_{iN}^j)<T_R$, 则在 RMG邻接表的第 i 个单链表添加表结点 N_i^n.

3) 按顺序合并区域. 根据 RMG按区域序号由大到小进行区域合并, 被合并的区域只能合并到其序号最大的可合并邻域中. 按合并规则所进行的区域合并实际是构建 RMG的生成森林的过程.

4) 根据 RMG生成森林更新当前 RAG邻接表.

通过以上步骤, 大部分同质区域将实现合并, 形成面积较大的新区域. 由于区域边界强度的不均匀性, 在利用相对边界强度度量准则进行合并后, 得到的大区域边缘将存在少量边界强度较大的小区域, 在此基础上需进行第 2级合并.

2 2 2　基于有向图的小区域合并

考虑到小区域的面积和边界特点, 本阶段在合并评价函数中加入边界长度因素, 同时将灰度均值差异度函数和相对边界强度函数进行变换, 使其值域都为 $[0, 1]$, 并在统一尺度后加权求和, 成为区域可合并度综合评价函数, 具体定义如下:

$$\hat{\delta}(R_i, R_j)=k^G\times\hat{\delta}^G(R_i, R_j)+k^{RI}\times(1/\delta^{RI}(R_i, R_j))+k^L\times\delta^L(R_i, R_j)\quad(4)$$

其中, k^G, k^{RI}和 k^L为各评价因素的权重系数.

$$\hat{\delta}^G(R_i, R_j)=1-(|\mu(R_i)-\mu(R_j)|)/255\quad(5)$$

由于边界长度评价函数不具备对称性, 因此根据综合评价函数确定的 RAG是有向图. 在有向 RAG的基础上进行小区域合并的步骤与前面初步合并类似, 不同之处在于根据 RAG建立 RMG时, 只有面积小于一定阈值的小区域才能与其可合并度最大的邻域进行合并. 在通过 RMG进行合并时还应注意防止可合并区域之间存在连环套关系.

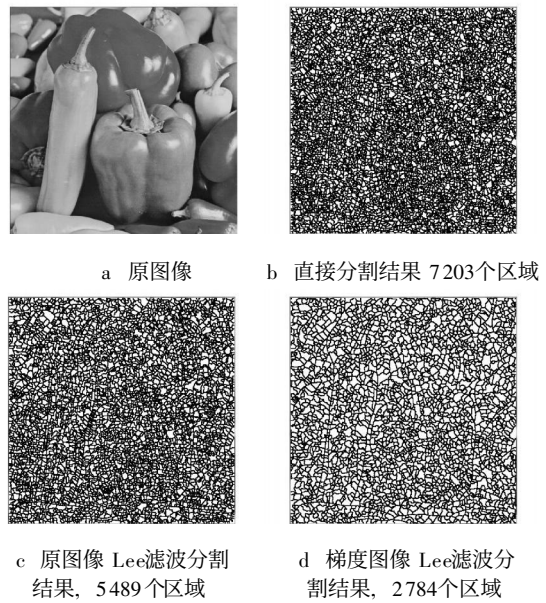
通过以上再次合并, 孤立的小区域可合并到大区域中, 若出现小区域互相合并而未最终被大区域合并的情况时, 则可按照相同的方法再次合并新出现的小区域, 最终得到理想结果.

3　实验结果和分析

为验证本文算法效果, 对一组图像进行分水

岭变换区域合并实验. 首先是验证图像梯度 Lee 滤波预处理对分水岭变换的影响. 在不同预处理情况下进行分水岭变换初步分割, 结果如图 3所示, 由结果可知, 对梯度图像进行平滑滤波在保证分割准确的同时更能有效降低过分割程度, 为后续快速区域合并提供基础.

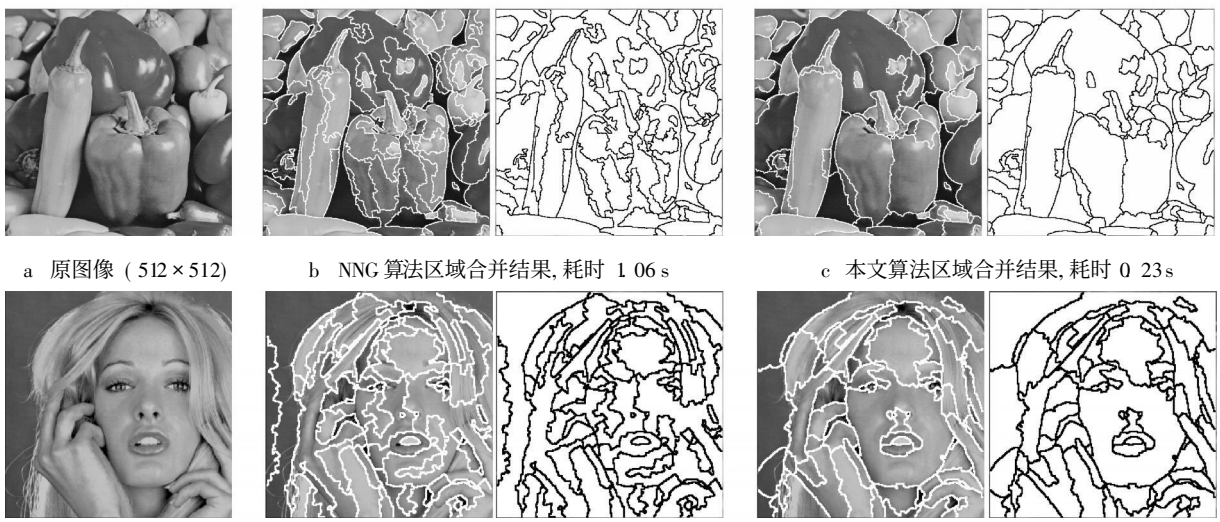
为比较衡量本文区域合并算法的性能, 在上述相同初步分割的基础上, 将本文算法与经典的基于 NNG (Nearest Neighbor Graph)区域合并算法[7]进行对比. 在合并后区域数目相同的前提下, 两组不同图像实验结果如图 4所示, 其中 NNG算法只采用区域灰度均值差异度准则, 通过最优迭代逐一完成合并, 而本文合并算法通过初步合并及两次小区域合并得到最终结果. 从实验结果可知, 本文算法由于在合并过程中考虑了边界因素的综合影响, 得到的最终分割区域更好地体现了图像中物体的轮廓, 在图像特征细节表现方面, 效果也更理想.



a 原图像　b 直接分割结果 7203个区域

c 原图像 Lee滤波分割结果, 5489个区域　d 梯度图像 Lee滤波分割结果, 2784个区域

图 3 不同预处理分水岭变换初步分割结果



a 原图像 (512×512)　b NNG 算法区域合并结果, 耗时 1 06 s　c 本文算法区域合并结果, 耗时 0 23 s

d 原图像 (256×256)　e NNG算法区域合并结果, 耗时 0 30 s　f 本文算法区域合并结果, 耗时 0 05 s

图 4 分水岭变换区域合并实验结果

虽然本文算法综合了更多区域相似度因素, 但由于 RAG 采用邻接表存储结构形式并根据阈值进行分步合并, 其算法复杂度更低. 相比 NNG 算法本文算法在建立 RMG 时需消耗 $O(\|E\|)$ 的时间, 合并复杂度为 $O(\|E_{RMG}\|)$, E_{RMG}代表 RMG 的弧, 两步合并过程的总体复杂度要远小于 NNG 算法每步合并的累加总和. 图 4中的实验数据是在 P4 2 4GHz PC 机上 VC 6 0的实验环境中获得的, 从算法速度方面来看, 本文算法具有明显优势.

4 结 论

本文算法提出的区域可合并度综合评价函数, 将体现区域全局性灰度分布特征的合并约束与体现局部边缘特征的合并约束较好地融合在一起, 使合并后的区域更好地体现了图像中景物轮廓信息, 保证了图像分割的准确性. 算法在 RAG 邻接表存储结构的基础上, 采用分级阈值区域合并方式避免了迭代运算及其相应数据更新, 降低了区域合并复杂度. 实验结果表明, 本文提出的分水岭变换区域合并算法有效地提高了区域合并速度和区域轮廓定位精度. 在处理不同类型的图像时, 为获得理想分割效果, 各项阈值及可合并度评价函数各项权重系数需进行调整, 使算法在智能化方面存在不足, 在以后的工作中有待进一步深入研究并加以解决.

(下转第 **1348**页)

5 结束语

本文在原有 VPML语言的基础上,扩展出了一种面向服务的可视化过程建模语言 VPML-S,分析了它相对于其它过程建模语言的优势. VPML-S提供了对业务人员友好的可视化界面、灵活的用户扩展机制和严格的元模型定义,并且为面向服务的体系结构的业务过程建模提供了原生支持.有效解决了业务过程建模语言的过程复用,协作和互操作的问题.本文中 VPML-S的形式化定义只是初步的定义,下一步,将在 VPML-S的形式化 pi演算模型、模拟验证等方面做进一步的深入研究.

参考文献 (References)

[1] Ouyang C, Dumas M, HM A, et al. From BPMN process models to BPEL web services[C]// ICWS06. Chicago: IEEE, 2006: 285-292

[2] OASIS-wsbpel-v2.0-OS-2007, Web services for business process execution language[S]

[3] 周伯生,张社英.可视化过程建模语言 VPML[J].软件学报, 1997(增刊): 535-545
Zhou Bosheng, Zhang Sheying. Visual process modeling language VPML[J]. Journal of Software, 1997 (Supplement): 535-545(in Chinese)

[4] WFMC-TC-1025-2005, Process definition interface-XML process definition language[S]

[5] Kavantzas N, Burdett D, Ritzinger G, et al. Web services choreography description language version 1.0[R/OL], W3C, 2005. http://www.w3.org/TR/ws-cdl-10

[6] Martin D, Paolucci M, McIlraith S, et al. Bringing semantics to web services: the OWL-S approach[C]// SWSWPC 2004. California: Springer-Verlag, 2004: 26-42

[7] 张社英,刘又诚.过程模型建造环境 PMBE[J].软件学报, 1997(增刊): 563-564
Zhang Sheying, Liu Youcheng. Process model building environment PMBE[J]. Journal of Software, 1997(Supplement): 563-564(in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)

(上接 1330页)

参考文献 (References)

[1] 常志明,周海芳,蒋艳凰,等.流域变换算法中过度分割的平滑解决方法[J].计算机工程与科学, 2005, 27(3): 29-31
Chang Zhiming, Zhou Haifang, Jiang Yanhuang, et al. A new method of solving over-segmentation in watershed algorithms[J]. Computer Engineering & Science, 2005, 27(3): 29-31(in Chinese)

[2] Wang Demin. A multiscale gradient algorithm for image segmentation using watersheds[J]. Pattern Recognition, 1997, 678(12): 2043-2052

[3] Hernandez S, Barner K. Joint region merging criteria for watershed-based image segmentation[C]// IEEE International Conference on Image Processing. Vancouver, Canada: IEEE, 2000, 2: 108-111

[4] 王小鹏,罗进文.基于形态学梯度重建的分水岭分割[J].光电子·激光, 2005, 16(1): 98-101
Wang Xiaopeng, Luo Jinwen. Watershed segmentation based on morphological gradient reconstruction[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2005, 16(1): 98-101(in Chinese)

[5] Gauch JM. Image segmentation and analysis via multiscale gradient watershed hierarchies[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(1): 69-79

[6] Park J, Keller JM. Snakes on the watershed[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(10): 1201-1205

[7] Haris K, Efstratiadis S N, Maglaveras N, et al. Hybrid image segmentation using watersheds and fast region merging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(12): 1684-1699

[8] 崔明,孙守迁,潘云鹤.基于改进快速分水岭变换的图像区域融合[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(3): 546-552
Cui Ming, Sun Shouqian, Pan Yunhe. An image region merging algorithm based on modified fast watershed transform[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(3): 546-552(in Chinese)

[9] Wang Jia, Lu Hanqing, Eude G, et al. A fast region merging algorithm for watershed segmentation[C]//Proceedings of ICSP'04: the 7th International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2004, 1: 781-784

[10] 王欣,王德隽.离散信号的滤波[M].北京:电子工业出版社, 2002: 161-165
Wang Xin, Wang Dejuan. The filtering of discrete signal[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 161-165(in Chinese)

[11] Wu Xiaolin. Adaptive split-and-merge segmentation based on piecewise least-square approximation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(8): 808-815

(责任编辑:赵海容)