

国家自然科学基金—青年科学基金项目，面上项目（项目编号：61502065，61173184）
重庆市科委基础科学与前沿技术研究重点项目（项目编号：cstc2015jcyjBX0127）
重庆市教委人文社科研究重点项目（项目编号：17SKG136）
重庆市教委科学技术研究项目（项目编号：KJ1500922）
重庆理工大学科研启动基金（项目编号：2014ZD27）
重庆理工大学优秀学术著作出版基金资助

龙建武 闫 河 张建勋 田 芳 / 著

智能图像 分割技术



科学出版社

国家自然科学基金——青年科学基金项目,面上项目(项目编号:61502065,61173184)

重庆市科委基础科学与前沿技术研究重点项目(项目编号:cstc2015jcyjBX0127)

重庆市教委人文社科研究重点项目(项目编号:17SKG136)

重庆市教委科学技术研究项目(项目编号:KJ1500922)

重庆理工大学科研启动基金项目(项目编号:2014ZD27)

重庆理工大学优秀学术著作出版基金资助

智能图像分割技术

龙建武 闫 河 张建勋 田 芳 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以直方图阈值划分为基础,对智能图像分割关键技术进行研究:在参考国内外学者研究方法的基础上,根据近几年的研究成果,较系统地研究了现有经典全局阈值分割算法,提出一种采用高斯拟合的全局阈值算法阈值优化框架;对二维最小误差法进行三维推广,并结合三维直方图重建和降维思想提出一种鲁棒的最小误差阈值分割算法;为有效分割非均匀光照下的大目标图像,提出一种在高斯尺度空间下估计背景的自适应阈值分割算法;结合基于分块的局部分割思想以及交互式分割思想,提出一种基于图像区域的交互式 Otsu 阈值分割算法;为有效提高现有彩色图像聚类算法的执行效率和聚类性能,提出一种基于直方图多级划分的彩色图像聚类算法。

本书可供光电信息类、电子信息类、计算机应用等专业高年级本科生、研究生、教师和科研人员阅读,也可作为图像处理专业相关课程的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能图像分割技术/龙建武等著.—北京:科学出版社,2017.8
ISBN 978-7-03-053949-6

I.①智… II.①龙… III.①图象分割 IV.①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 168573 号

责任编辑:张 展 黄明冀/责任校对:杨悦蕾

责任印制:罗科/封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2017年8月第一次印刷 印张:12

字数:243千字

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着计算机科学技术的迅猛发展,图像处理技术及计算机视觉技术得到了快速发展,并已广泛应用到实际生产生活当中,如医学图像处理、工业生产过程中的产品质量检测、军事领域中的军事目标定位与跟踪、智能交通系统中的视频跟踪与监控、对珍贵历史文献处理过程中的文本分割与识别、人们生活当中对拍摄图像与视频的编辑等。在上述这些应用当中,图像分割技术扮演了非常关键的角色,是图像处理技术和计算机视觉技术的研究基础,分割结果质量的优劣将直接影响后续操作如目标定位、识别、跟踪、图像理解和场景分析等的有效进行。因此,研究图像分割关键技术具有非常重要的意义。

在现有众多的图像分割技术当中,考虑到阈值分割技术具有实时、简单有效、自动、应用广泛等特性,本书将以直方图阈值划分为基础对智能图像分割关键技术展开研究,主要解决阈值分割技术对于噪声、非均匀光照等干扰因素的抵抗性能。具体内容如下:

(1)针对采用最大类间方差法(Otsu法)、最大熵法和最小误差法三种经典全局阈值方法获得的阈值均非最佳阈值这一问题,本书提出一种采用高斯拟合的全局阈值算法阈值优化框架。相对于上述三种全局阈值分割算法,本算法所获得的阈值更为准确,同时具有鲁棒的抗噪性能和较高的执行效率。

(2)本书对二维最小误差法进行三维推广,并结合三维直方图重建和降维思想,提出了一种鲁棒的最小误差阈值分割算法。该算法有效解决了非均匀光照条件下小目标图像的分割问题。

(3)为了有效分割非均匀光照图像,本书提出一种在高斯尺度空间下估计背景的自适应阈值分割算法。该算法有效解决了非均匀光照条件下的图像分割问题,包括小目标图像及大目标图像。

(4)结合基于分块的局部分割思想及交互式分割思想,本书提出一种基于图像区域的交互式 Otsu 阈值分割算法。该算法不仅解决了全局阈值算法受光照影响较大的问题,而且解决了局部方法对参数敏感和执行效率低的问题,使本算法普适性更好。

(5)为了有效提高彩色图像模糊聚类算法的执行效率和聚类性能,本书还提出一种基于直方图的彩色图像模糊聚类算法。该算法两次利用波峰波谷快速定位算法对彩色图像各通道一维直方图及其合并后的一维直方图进行阈值分割,然后采用模糊 C 均值(fuzzy C-means, FCM)算法进行聚类,使整体分割性能得到有效提高。

本书的出版得到科学出版社的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢。同时要感谢国家自然科学基金——青年科学基金项目,面上项目(基于全局阈值分割和局部聚类的自然图像超像素分割技术研究,项目编号:61502065;移不变抗混叠多尺度几何分析基础理论研究,项目编号:61173184)、重庆市科委基础科学与前沿技术研究重点项目(联合像素和超像素的医学图像分割关键技术研究,项目编号:cstc2015jcyjBX0127)、重庆市教委人文社科研究重点项目(图书馆古籍文献数字化中的智能文本分割关键技术研究,项目编号:17SKG136)、重庆市教委科学技术研究项目(基于自动阈值分割的超像素分割技术研究,项目编号:KJ1500922)、重庆理工大学科研启动基金项目(医学图像多阈值分割关键技术研究,项目编号:2014ZD27)及重庆理工大学优秀学术著作出版基金对本书出版的资助。由于本书所引用的参考文献较多,难以一一列出,在此向原作者致敬。

由于受作者学识和视野所限,加之本书成书时间仓促,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

龙建武

2017年2月25日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 图像分割研究综述	5
1.3 研究内容组织结构	12
第 2 章 高斯拟合的全局阈值算法阈值优化框架	15
2.1 引言	15
2.2 全局阈值分割算法	16
2.2.1 Otsu 阈值分割算法	17
2.2.2 最小误差阈值分割算法	18
2.2.3 最大熵阈值分割算法	18
2.3 改进方法	19
2.3.1 采用高斯拟合的全局阈值算法阈值优化框架	19
2.3.2 鲁棒的采用高斯拟合的全局阈值算法阈值优化框架	24
2.3.3 收敛性分析	29
2.4 实验结果及分析	30
2.5 本章小结	39
第 3 章 自适应最小误差阈值分割算法	41
3.1 引言	41
3.2 Water Flow 模型	41

3.3 鲁棒去噪模型	43
3.4 鲁棒的最小误差法	46
3.5 自适应最小误差阈值分割算法流程	48
3.6 算法时间复杂度对比分析	50
3.7 实验结果及分析	51
3.7.1 均匀光照条件下分割结果	51
3.7.2 非均匀光照条件下分割结果	53
3.7.3 非均匀光照下噪声对本章算法分割性能的影响	57
3.7.4 参数 γ 对本章算法分割性能的影响	59
3.8 本章小结	60
第4章 高斯尺度空间下估计背景的自适应阈值分割算法	62
4.1 引言	62
4.2 本章算法	62
4.2.1 预处理	64
4.2.2 消除背景	65
4.2.3 图像增强	69
4.2.4 阈值分割	70
4.3 实验结果及分析	70
4.3.1 非均匀光照下文本图像分割测试	71
4.3.2 非均匀光照下非文本图像分割测试	75
4.3.3 参数敏感性测试	79
4.4 本章小结	81
第5章 基于图像区域的交互式 Otsu 阈值分割算法	83
5.1 引言	83
5.2 本章算法	84
5.2.1 预处理	84
5.2.2 图像分块	85

5.2.3	图像块排序	86
5.2.4	图像块分类	87
5.2.5	图像块二值化	88
5.3	实验结果及分析	90
5.3.1	实验一: 均匀光照情况	90
5.3.2	实验二: 非均匀光照情况	93
5.4	本章小结	102
第 6 章	基于直方图的彩色图像模糊聚类算法	103
6.1	引言	103
6.2	相关算法	104
6.2.1	FCM 算法	104
6.2.2	DSRPCL 算法	104
6.2.3	HTFCM 算法	105
6.3	HCIFCM 聚类算法	106
6.3.1	直方图预处理	107
6.3.2	直方图多级划分	108
6.3.3	RGB 直方图合并	109
6.3.4	初始化聚类中心	110
6.3.5	初始化样本数据	110
6.3.6	FCM 算法	111
6.3.7	实例分析	111
6.4	实验结果及分析	114
6.4.1	实验一	114
6.4.2	实验二	116
6.5	本章小结	122
第 7 章	总结与展望	124
7.1	总结	124

7.2 展望	126
参考文献	129
索引	137
附录 基于图像区域的交互式 Otsu 阈值分割算法源码	139

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

在图像处理领域,根据图像操作对象数据大小和图像语义抽象程度高低的不同,可将图像技术分为图像处理、图像分析和图像理解三个层次,如图 1.1 所示。其中,图像分割技术^[1]处于中底层视觉位置并具有非常关键的地位,为中高层视觉如图像分析与理解提供研究基础与技术保证。图像分割技术是指遵循一定的相似度准则,利用图像中的某些特征信息(如亮度、梯度、颜色、纹理等),将图像划分为若干内部一致而彼此特征各异的内质连通区域,即区域内部各像素点间在灰度、颜色、梯度、纹理等特征上具有较高的相似度,而不同区域各像素点间在这些特征上的差异较大^[1]。图像分割的主要目的:一是通过对图像进行区域划分可有效简化图像的表示方式,减少冗余信息,以进一步提高后续操作的效率;二是通过区域划分可有效完成感兴趣目标的定位、提取及后续识别工作^[1-3]。由图 1.1 很容易发现,特征提取和目标识别都建立在图像分割的基础之上,通过对目标信息的表征和量化,原始图像被转化为更具语义特征的抽象形式,从而使后续操作如图像分析和图像理解成为可能。因此,图像分割技术是图像处理和计算机视觉领域中的一个研究重点,对于一幅待处理图像,其分割质量的优劣将直接影响后续任务执行的有效性^[2,3]。

随着科学技术的迅猛发展,计算机视觉技术及图像处理技术在工业、农业、

医学、军事、教育等领域得到广泛应用^[2,3]。作为计算机视觉领域中的基础研究问题及难题,图像分割技术同样在这些领域发挥至关重要的作用^[1-3]。例如,在医学领域,即使在科学技术高速发展的今天,疾病仍然是人们生活质量和寿命长短的主要威胁。因此,如何利用现有的先进科学技术对这些疾病进行及时有效的诊断及治疗,是人们关注的热点问题和不懈努力的目标。随着医学、物理学、电子技术、计算机技术等快速发展,医学影像在科研和临床诊断中发挥了重要的作用,为医学图像分割的有效执行提供了有力基础。医学成像技术是医护工作者的“第三只眼睛”,临床医生由此可以窥探人体内部器官、审视病患及获取有力的诊断线索。利用计算机对医学图像进行辅助诊断,改变了自古以来“望、闻、问、切”的诊断方式,大幅度推进了医疗水平的发展与进步。

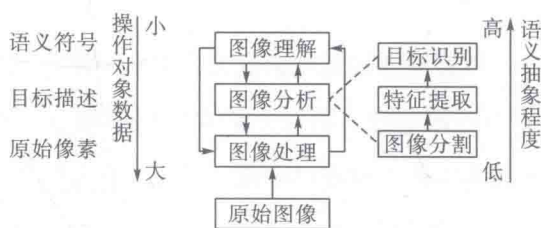
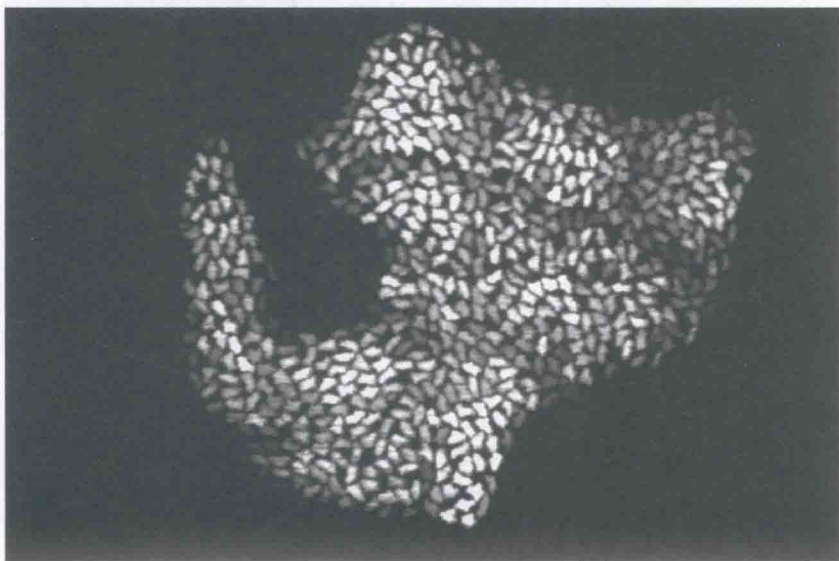


图 1.1 图像技术的三层模型

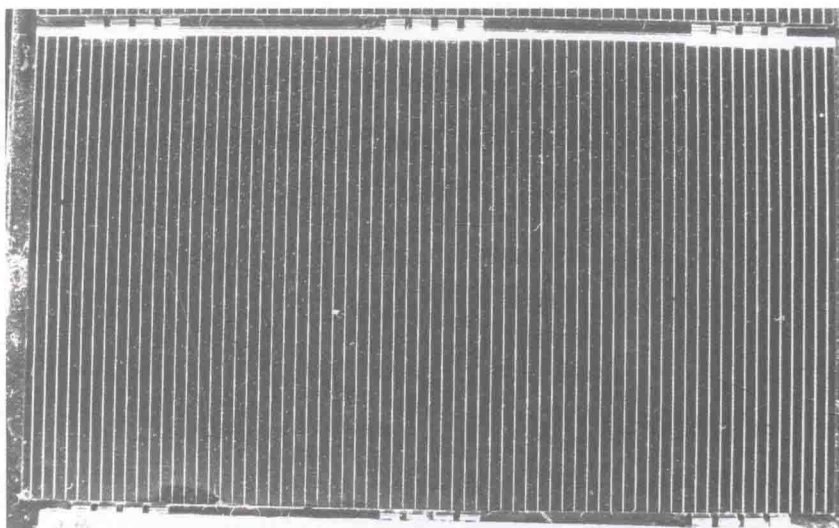
随着医学影像在临床医学诊断中的广泛应用,作为医学图像处理中的关键一步,图像分割技术在医学中逐渐发挥越来越大的作用。例如,对复杂大脑图像的分割,其结果是否准确,直接关系到是否能够准确检测和诊断如脑部肿瘤、脑水肿、多发性脑硬化、组织坏死等疾病,同时这也是检测大脑活动变化的一种手段。又如血管图像的精准分割也是许多检测系统进行病症检测的前提条件,视网膜血管、心脑血管等的形态都是相应病症诊断的主要指标之一。如今,心脑血管疾病、各种癌症等十分常见且致命率极高,利用计算机技术对其进行有效诊断有着极为重要的研究意义。在医学领域中,图像分割是提取医学影像中特殊组织的定量信息所不可缺少的手段,其被广泛应用于各个方面,如组织容积的定量分析、解剖结构的研究、病变组织的定位、治疗规划、功能成像数据的局部体效应校正、计算机辅助诊断、计算机引导手术等。因此,研究图像分割关键技术具有

非常重要的意义。

又如在工业生产过程中,虽然计算机技术已经得到了迅速普及,但是现有的人力作业并没有完全被计算机所取代。例如,在工业生产过程中的产品质量检测方面,仍有生产企业采用人力来检测产品是否合格。这在很大程度上限制了工业生产效率、检测效率及检测精度。因此,采用计算机技术来取代人工检测,是工业生产的一个发展趋势。其基本过程并不复杂,首先利用摄像机进行图像采集,然后送入计算机进行处理即可。图 1.2 所示为两幅工业生产图像,其中,对于化纤图像,主要检测每一束化纤中的化纤丝条数是否满足规定标准条数的有效范围;而对于太阳能电池片图像,主要检测电池片表面是否存在裂痕。由于工业生产产量巨大,若采用人工检测方式,其检测工作量及检测难度都将非常巨大。然而,现今工业生产过程中仍然采用人工检测方式,为实现工业生产自动化,对图像分割技术展开研究具有非常重要的意义。图 1.3 所示为图 1.2 中两幅图像的分割结果,此检测结果可有效完成工业图像质量检测及评估问题。

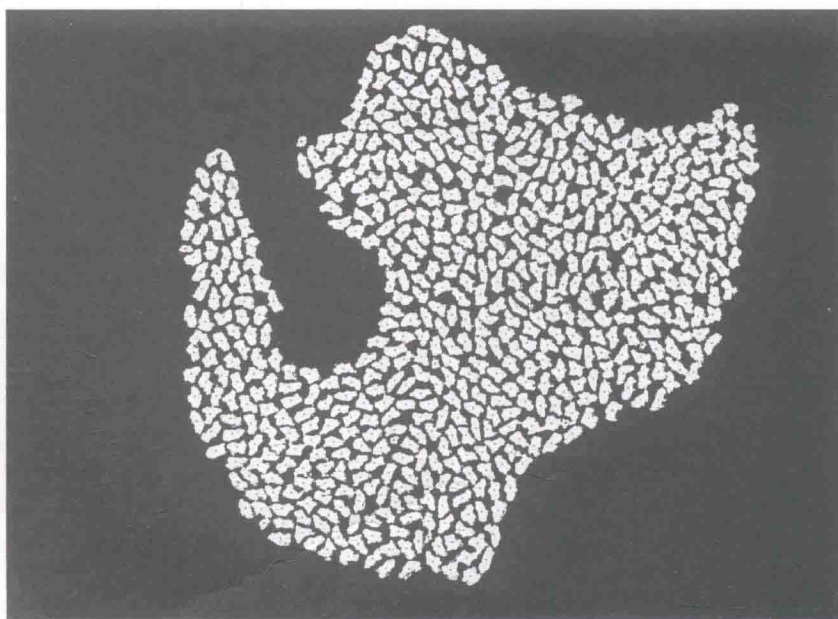


(a) 化纤截面图像

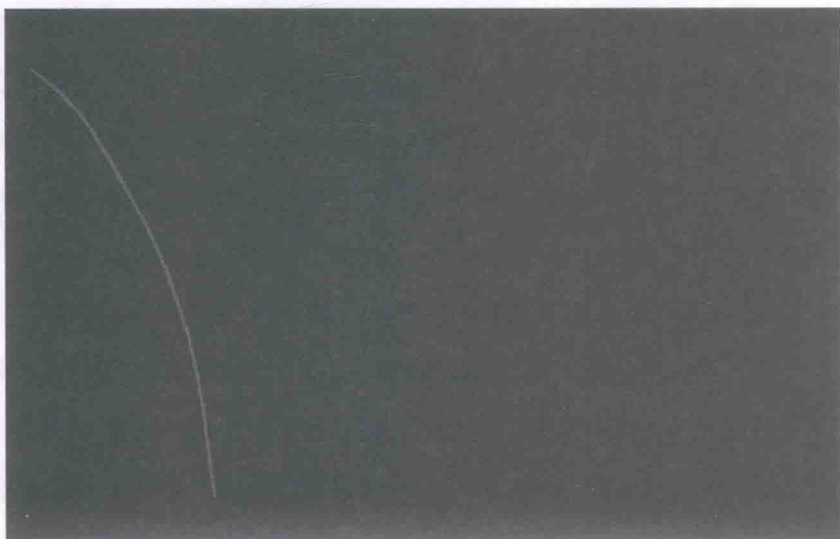


(b)太阳能电池片图像

图 1.2 工业图像



(a)化纤截面图像检测结果



(b)太阳能电池片图像裂痕检测结果

图 1.3 工业图像分割结果

1.2 图像分割研究综述

经过数十年的发展，国内外研究学者相继提出了大量的图像分割技术^[4-8]。图 1.4 所示为按照图像类型、用户交互、图像表示(I 和 II)、图像属性、操作空间及驱动方式对图像分割技术的 7 种不同划分^[4-8]。

(1)根据图像类型，可将图像分割技术分为灰度图像分割^[4,5]和彩色图像分割^[6-8]。灰度图像分割主要用于处理医学图像^[9,10]、文本图像^[11-20]、工业图像^[21,22]等，主要包括全局阈值分割技术^[23-29]、自适应阈值分割技术^[11-22]、聚类技术^[30-34]、基于偏微分方程的分割技术^[5,35-43]等。彩色图像分割主要用于处理自然图像^[6-8]等，主要包括聚类技术^[44-47]、区域生长和合并技术^[48,49]、基于图论的分割技术^[50-57]等。

(2)根据用户是否参与交互，可将分割技术分为非监督式分割技术^[4,7,8](即自动分割技术)和监督式分割技术^[5-8,58,59](即交互式分割技术)。自动分割技术主要

用于处理图像背景信息较为单一的文本图像^[11-20]、工业图像等^[21,22]。对于这类图像,其目标与背景在亮度等特征上通常具有较为明显的差异,从而有助于自动分割技术的有效执行^[4]。而对于那些背景信息较为复杂,目标与背景在亮度、颜色、纹理等特征上差异较小的待处理图像,如医学图像、自然图像等,为了能够获得较为理想的分割效果,通常需要用用户提供先验信息作为指导以更好地完成分割过程^[6-8]。随着数字信息技术的迅猛发展及人们生活水平的不断提高,交互式分割技术已在人们的生产生活中得到了广泛的应用,如对图像和视频的编辑^[60-62]等。交互式分割技术主要有基于图论的分割技术^[50-57],经典算法如 Graph Cut 算法^[50-53]、Random Walks 算法^[54]、Lazy Snapping 算法^[55]、Grab Cut 算法^[56]、Geodesic 算法^[57]等。



图 1.4 图像分割技术 7 种不同的划分方式

(3)根据图像表示方式不同,可将图像分割技术分为基于像素级的分割技术^[4-8]和超像素分割技术^[63-70],以及基于超像素的分割技术^[53,55,56,59]。目前,绝大多数分割技术属于基于像素级的分割技术^[4-8],即将原始图像像素作为处理单元,因此这种技术通常具有较高的处理精度。但随着数码硬件技术及摄影技术的快速发展,当前获取的图像通常具有较高的分辨率,这导致待分割图像的数据量大幅度增加,从而使分割效率急剧降低。近年来,用区域取代像素点的超像素分割技术是一个新的研究热点^[63-70]。超像素是图像局部区域中有相似性质的像素点的一种聚集,它将图像划分成内部同质的小区域,其聚集结果是可以很方便地以整体的形式代表整个区域中所有的像素点。超像素算法即决定将像素点如何划分

成具有感知意义(通常是性质的相似)的小区域,超像素的提出有效减少了后续处理中无足轻重的冗余图像信息,不仅简化了图像的拓扑结构,而且降低了后续处理步骤的复杂度。

最基础及最为经典的超像素分割算法当属分水岭算法^[63],该算法是一种基于拓扑理论的数学形态学的分割方法,其实时性较高但过分割现象较为严重。Shi等^[64]于2000年提出了一种将改进的频谱聚类应用到图像分割中的Normalized Cut算法,由该算法得到的超像素边界贴合良好且规则,但其复杂度较高。Felzenszwalb等^[65]在2004年提出了一种符合格式塔分割的多区域分割算法:高效图割。此算法基于最小生成树的权重,在区域合并中完成超像素的生成。该算法执行速度较快,但是超像素区域形状不规则,密度不可控。Mean Shift也是一种经典的图像分割算法^[66],虽然理论成熟,但是通过它衍生的超像素算法极度不规则,不适用于对大小要求一致的后续处理过程。Levinshtein等^[67]于2009年提出的Turbopixel算法(简称TP算法),启发了很多自此以后的超像素算法。但该算法数值实现稳定性较差,在水平集演化过程中需要不断初始化,执行效率较差。2012年,Achanta等^[68]提出了SLIC(simple linear iterative clustering)算法,SLIC巧妙地利用K-means算法,以种子点为中心局部聚类,迭代得到超像素块,该算法得到的超像素分布规则可控制性好且复杂度较低。同样受到K-means聚类算法的启发,Wang等^[69]提出了VCells算法。该算法在预先划分好的规则六边形棋盘格上局部聚类,规则可控,并且对于噪声有着良好的鲁棒性。2013年,Wang等^[70]提出了一种基于测地距离的结构敏感的超像素算法,相比利用欧氏距离的超像素算法,其边缘贴合度更为准确,但执行效率仍是制约该算法的一大瓶颈。2014年,Liu等^[71]提出了一种熵率超像素分割算法,该算法利用图上随机游走的熵率,并通过最大化一个亚膜函数,最后利用贪婪算法获取局部最优解。

目前,超像素表示已在计算机视觉领域得到了广泛的应用。例如,在交互式图像分割过程中,Li等^[55]于2004年提出了基于超像素的Lazy Snapping分割算法,该算法首先采用Watershed算法^[63]对图像进行预分割,将分割区域作为节

点重新构建一个加权有向图,然后采用最大流最小割算法^[51]进行全局求解。2010年,Ning等^[59]利用Mean Shift算法^[66]进行预分割,并采用颜色直方图表示每个区域,提出了一种基于最大相似度的区域合并(maximal similarity based region mending,MSRM)算法。不同于最大流最小割算法,MSRM算法利用一种区域自动合并机制完成彩色图像分割。2011年,Peng等^[53]同样利用Watershed算法^[63]进行预分割,提出了一种迭代区域合并的局部图割算法等。另外在显著性检测领域,超像素方法同样得到了广泛应用^[72-74]。例如,2011年,Cheng等^[72]利用高效图割进行预分割并提出了一种基于全局对比度的显著性区域检测算法;2012年,Perazzi等^[73]利用SLIC算法对图像进行超像素表示,提出了一种显著性滤波算法;2013年,Yan等^[74]利用Watershed算法建立分层模型并提出了一种分层显著性检测算法等。

(4)根据另一种图像表示方式,可将图像分割算法分为单一尺度分割和多尺度分割。现有的绝大多数分割算法均是在原始尺度空间上构建相关的分割模型,如以像素点或超像素为节点构建图模型^[8]、水平集曲率演化模型^[5]等。而结合多尺度信息^[75]的分割算法由于充分挖掘了图像信息,使分割算法在如抗噪性等上更具鲁棒性^[76]。

(5)根据图像属性可将图像分割技术分为基于单一属性的分割方法^[4-8]和多属性的分割方法^[77,78]。单一属性的分割方法仅利用如灰度、梯度、颜色、纹理等特征中的一种属性进行分割,目前大部分分割算法均属于此类,如阈值分割算法^[4]、聚类算法^[7]、基于图论(graphcut)的算法^[8]、基于水平集(levelset)的算法^[5]等。若能有效综合多种图像属性进行图像分割,整体分割性能将会大幅度提高。2004年,Martin等^[77]充分结合灰度、颜色、梯度和纹理信息提出了一种自然图像边缘检测算法,由于以上诸多信息的有效结合使边缘检测准确度得到了有效提高。2011年,Arbelaez等^[78]在Martin等工作的基础上做了进一步完善,提出了一种出色的边缘检测算法gPb和一种有效的区域检测算法gPb-owt-ucm。

(6)根据分割算法是否有效利用图像空间位置信息,可将图像分割算法分为仅利用图像特征信息(如灰度、颜色、梯度、纹理等)而未利用空间位置信息的分