Image Segmentation

Application Research of Partial Differential and Variational Techniques in Image Segmentation

偏微分与变分技术在图像分割中的应用研究

李钢 著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

Application Research of Partial Differential and Variational Techniques in Image Segmentation

偏微分与变分技术在图像分割中的应用研究

李钢 著

中国科学技术大学 图书馆藏

RFID

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书总结了笔者近年来在图像分割方面的研究成果，主要介绍了基于变分水平集的分割技术及其应用，并在对该领域基本概念、相关技术、研究进展进行总结分析和深入研究的基础上，提出了几种新的分割方法和理论。本书在内容上力求做到深入浅出、通俗易懂，不仅具有一定的深度和广度，而且反映学科的新问题、新动向，介绍学科前沿的新成果和新内容。本书可作为高等学校图像处理相关专业的参考书，也可供相关科技人员参考。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

偏微分与变分技术在图像分割中的应用研究/李钢著. —北京：北京理工大学出版社，2019.7

ISBN 978-7-5682-7160-8

Ⅰ.①偏…　Ⅱ.①李…　Ⅲ.①偏微分方程-应用-图象分割-研究②变分法-应用-图象分割-研究　Ⅳ.①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 122869 号

出版发行／北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址／北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编／100081
电　　话／（010）68914775（总编室）
　　（010）82562903（教材售后服务热线）
　　（010）68948351（其他图书服务热线）
网　　址／http：//www.bitpress.com.cn
经　　销／全国各地新华书店
印　　刷／三河市华骏印务包装有限公司
开　　本／710 毫米×1000 毫米　1/16
印　　张／13.75
彩　　插／10
字　　数／165 千字
版　　次／2019 年 7 月第 1 版　2019 年 7 月第 1 次印刷
定　　价／66.00 元

责任编辑／梁铜华
文案编辑／曾　仙
责任校对／周瑞红
责任印制／李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

PREFACE

前言

在大数据时代，人们每时每刻都在产出和接收形式多样的海量数据和信息。图像在传递信息时具有信息量大、直观易懂等优势，以图像、视频为载体的视觉信息在人们日常获取的信息量中占75%以上，数字化的图像信息已遍及人们生活的每个角落。例如，人脸识别、智能安防、自动驾驶等基于数字图像处理、识别和理解的人工智能产品在逐渐改变着人们的日常生活。

随着计算机视觉、人工智能和思维科学的不断发展，数字图像处理的研究和应用正在向更高、更深、更广的层次迈进。互联网产品积累的海量图像数据已成为人工智能和机器学习技术发展的重要基础，这使得计算机视觉领域成为产品化程度最高、最成熟的人工智能领域之一。图像分割作为模式识别、目标跟踪、图像理解和机器视觉等领域基础且关键的研究课题，其主要目的是把图像划分成若干个具有特定性质的互不重叠的子区域，将符合特定应用场景的目标从背景中提取

出来，作为后续工作必要的基础数据。

图像分割几乎渗透图像处理的各个环节，迄今为止，研究人员已经为之付出了很大的努力并提出了很多模型和算法。其中，基于水平集方法的活动轮廓模型因具有自由改变拓扑结构、多信息共融和无监督性的优势，受到众多学者的持续关注与研究。然而，由于视觉信息的多样性、复杂性和海量性，图像分割技术仍然面临着巨大的挑战，为了得到通用性更好、分割精度和效率更高的算法模型，国内外学者至今仍在不断地研究探索。

本书以变分水平集方法和偏微分方程为基础，针对背景复杂、灰度不均匀和噪声污染图像的分割问题，对基于变分理论的经典主动轮廓模型做了深入研究，从降低模型对初始轮廓的敏感性、提高噪声的鲁棒性以及分割的准确性等若干方面着手开展研究工作，着重讲解了几种适用于噪声污染、灰度不均匀和背景复杂图像的分割模型。此外，结合机器学习在现有变分水平集方法的基础上进行了深入研究与改进，扩展了现有变分水平集方法的研究框架。

本书共分为9章。第1章概述了图像分割的概念及领域内的研究现状，对传统的分割方法进行了综述。第2章主要介绍了基于偏微分方程的图像分割相关知识，包括变分法、水平集方法和

几种经典的几何活动轮廓模型。第3章针对噪声污染和灰度不均匀复杂图像的分割问题，提出了一种结合局部灰度差异的噪声图像分割模型。第4章针对传统活动轮廓模型无法准确分割具有弱边界的概率噪声图像且容易陷入局部极小等问题，提出了一种基于梯度信息的邻域自适应分割模型。第5章针对现有局部模型在求解能量泛函过程中遇到灰度不均匀图像容易陷入局部极小的问题，提出了一种能够对灰度不均匀图像进行稳健准确分割的局部灰度差异模型。第6章将机器学习的SVM引入水平集模型，提出了一种在多种强度椒盐噪声环境下的表现优于传统噪声鲁棒模型的新方法，改善了现有噪声鲁棒的变分水平集方法的缺陷。第7章结合最大类间方差思想提出了一种改进的能够有效解决局部极小问题的模型(VLIF)。第8章基于图像熵理论，提出了一种权重自适应的融合图像全局信息和局部信息的活动轮廓模型，对于不同类型的灰度不均匀和噪声图像，能够完成快速准确且稳定的分割，对初始轮廓的位置也不敏感。第9章对本书所做的工作进行了总结。

在本书的编写过程中，张玲老师给予了大力支持和悉心帮助，在此深表感谢。感谢李海芳教授，她作为笔者的博士生导师，长期给予笔者关怀和指导。感谢李灯熬教授、郭发云高级工程师、

王兴伟教授、郭浩副教授、邓红霞副教授，他们对笔者及研究团队提供了支持和帮助。同时，课题组的尚方信、赵怡、刘剑超、杨子固等同学也付出了辛勤劳动，非常感谢。

本书总结了笔者近几年的研究成果和此领域的国内外研究前沿，以供领域内相关研究人员、研究生、爱好者参考，希望可以起到抛砖引玉的作用。

由于笔者水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

目 录
CONTENTS

第 1 章　绪论 …… 001

1.1　研究背景和意义 …… 001

1.2　国内外研究现状 …… 005

1.2.1　图像分割的传统方法综述 …… 005

1.2.2　基于偏微分方程图像的分割方法综述 …… 012

1.3　本书结构 …… 021

第 2 章　图像处理的偏微分与变分技术 …… 025

2.1　变分法 …… 025

2.1.1　变分原理 …… 026

2.1.2　梯度下降流方程 …… 028

2.2　水平集方法的基本理论 …… 029

2.2.1　曲线演化理论 …… 029

2.2.2 水平集方法 …… 030
2.2.3 变分水平集方法 …… 032
2.2.4 水平集方法的数值求解 …… 034
2.3 经典的活动轮廓模型 …… 038
2.3.1 Snake 模型 …… 038
2.3.2 Mumford – Shah 模型 …… 039
2.3.3 CV 模型 …… 040
2.3.4 RSF 模型 …… 042
2.3.5 LCK 模型 …… 044
2.4 本章小结 …… 046

第 3 章 基于局部灰度差异的噪声自纠正分割模型 …… 047

3.1 引言 …… 047
3.2 研究背景 …… 048
3.3 噪声自纠正的活动轮廓模型 …… 052
3.3.1 噪声修正函数的构建 …… 052
3.3.2 能量泛函的建立 …… 054
3.3.3 模型的数值实现及算法步骤 …… 055
3.4 实验结果与分析 …… 057
3.4.1 参数的设置及评价方法 …… 058
3.4.2 模型的性能 …… 060
3.4.3 与相关模型的比较 …… 064
3.4.4 分割精度对比 …… 071
3.5 本章小结 …… 072

第 4 章 一种邻域自适应的噪声图像分割模型 …… 074

4.1 引言 …… 074

4.2　研究背景 …… 075
4.3　梯度自适应的活动轮廓模型 …… 076
4.3.1　自适应核函数的构造 …… 077
4.3.2　能量泛函极小化 …… 080
4.3.3　模型的数值实现及算法步骤 …… 082
4.4　实验结果与分析 …… 083
4.4.1　参数设置及评价方法 …… 083
4.4.2　初始轮廓的鲁棒性 …… 084
4.4.3　应用于合成图像 …… 086
4.4.4　应用于自然图像 …… 091
4.4.5　分割效率的对比 …… 094
4.5　本章小结 …… 099

第5章　修正局部极小的局部灰度差异分割模型 …… 100

5.1　引言 …… 100
5.2　研究背景 …… 101
5.3　模型的提出 …… 102
5.3.1　局部灰度差异项的构建 …… 102
5.3.2　模型的水平集表示 …… 107
5.3.3　模型的数值解法及其算法的概述 …… 109
5.4　实验结果分析 …… 110
5.4.1　对初始轮廓的敏感性对比 …… 110
5.4.2　对含有噪声和模糊边界图像的分割 …… 113
5.4.3　与相关模型的对比实验 …… 113
5.4.4　分割精度对比 …… 118
5.5　本章小结 …… 120

第 6 章　基于支持向量机的噪声图像分割模型 …… 121

6.1　研究背景 …… 121
6.2　相关理论 …… 123
6.2.1　基于 K 均值的局部相关系数方法 …… 123
6.2.2　One – Class SVM 异常值检测方法 …… 125
6.3　异常值检测与鲁棒的噪声图像分割方法 …… 127
6.4　实验结果与分析 …… 132
6.4.1　椒盐噪声环境下合成图像分割实验 …… 134
6.4.2　椒盐噪声环境下自然图像分割实验 …… 136
6.4.3　迭代耗时分析 …… 138
6.5　本章小结 …… 140

第 7 章　结合 OTSU 的图像分割模型 …… 142

7.1　研究背景 …… 142
7.2　相关模型 …… 144
7.2.1　RSF 模型 …… 144
7.2.2　LIF 模型 …… 144
7.2.3　最大类间方差思想 …… 148
7.3　基于最大类间方差的 VLIF 模型 …… 149
7.4　能量泛函求解 …… 151
7.5　实验结果与分析 …… 155
7.5.1　对灰度不均匀图像的分割 …… 155
7.5.2　对医学图像的分割 …… 157
7.5.3　对场景复杂的自然图像的分割 …… 159
7.5.4　分割精度 …… 161
7.6　本章小结 …… 164

第 8 章　基于熵的全局和局部权重自适应模型 …… 166

8.1　研究背景 …… 166
8.2　相关理论 …… 168
8.2.1　图像熵理论 …… 168
8.2.2　局部图像熵 …… 168
8.2.3　C－V 模型 …… 169
8.3　基于图像熵的权重自动调节活动轮廓模型 …… 170
8.4　能量泛函求解 …… 172
8.5　实验结果与分析 …… 174
8.5.1　对初始轮廓的敏感度实验 …… 174
8.5.2　权重函数自动调节的有效性 …… 177
8.5.3　对自然图像的分割 …… 178
8.5.4　视网膜血管图像分割 …… 180
8.5.5　迭代次数和耗时 …… 182
8.6　本章小结 …… 183

第 9 章　总结 …… 185

参考文献 …… 186

第 1 章

绪　论

1.1　研究背景和意义

视觉使人类得以感知和理解周边的世界，而图像则因其直观、表现内容丰富等特点，被视为传递信息最理想的载体之一[1]。据统计，在人类接受的信息中，图像等视觉信息所占的比例达到 75%。随着现代物理学、成像技术、计算机技术、通信技术的发展，模拟图像逐渐被分辨率更高的数字图像取代。数字图像是由模拟图像在连续空间进行离散化得到的、以像素为基本元素的、可以用数字计算机或数字电路存储的图像数据。为了改善图像的视觉效果并提高图像的实用性，一般利用计算机技术或其他数字技术对图像信息进行某些数学运算和各种加工处理，这个过程称为数字图像处理[2]。数字图像处理起源于 20 世纪 20 年代，随着计算机在 20 世纪 50 年代的进一步发展，研究人员逐渐认识到数字图像处理的重要性，对此进行系统的分析和研究工作就此展开。20 世纪 60 年代初期，数字图像处理已经作为一门独立的学科开始发展；20 世纪后期，随着数字

技术和微电子技术的迅猛发展，很多先进的图像处理方法和设备陆续出现，数字图像处理因其日益广泛的应用而逐渐从信息处理、自动控制系统论、电视技术、数据通信等学科中分离，形成了以“图像信息的获取、储存、传输、变换、显示、分析、理解与综合应用”为场景的崭新学科[3]。

图像处理主要研究的内容有图像变换、图像压缩编码[4,5]、图像增强[6,7]和复原、图像分割[8]、图像识别[9]、图像分析和理解。图像处理系统的基本构成如图 1 -1 所示，将图像进行适当的加工和处理后，可以进一步优化和提升视觉效果，提高视觉质量。处理后的图像变得更加规范、有序，更容易被计算机提取某些特征来进行分析、处理和识别。

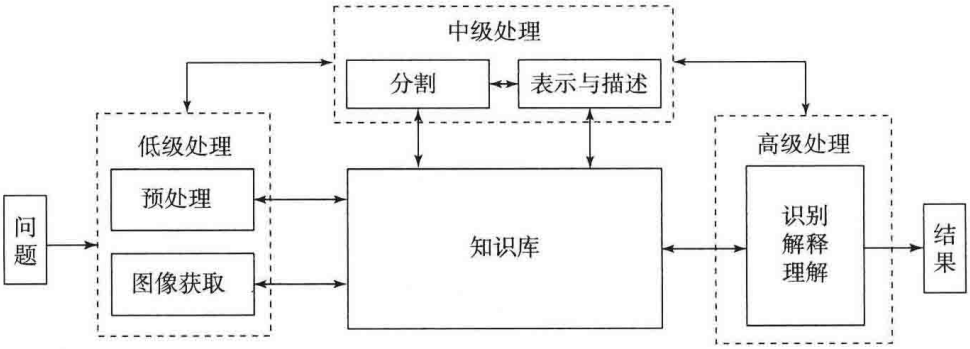


图 1 -1　图像处理系统的基本构成

从图 1 -1 中可以看出，图像分割是图像处理中最基本、最关键的步骤之一，它为图像的进一步处理（识别、理解等）提供了基础判别数据，它是联系低层次的图像处理和高层次的图像视觉理解的桥梁。图像分割是后续的目标检测、目标识别、对象追踪等图像理解领域的基础课题，分割中产生的误差会向上传递到高层次的图像分析与理解阶段，因此图像分割的准确与否直接影响后续图像处理

应用层的精确性与有效性[10]。

在图像的分析处理中，人们常常将图像分为前景（目标）和背景。前景是指研究人员感兴趣的具有特定特征或性质的连续区域，前景之外的部分称为背景。图像分割所要研究和解决的问题就是如何将图像中感兴趣的前景区域和背景准确分离，进而为后续的图像分析和理解提供基础。从广义上讲，图像分割是指按照某种特殊属性将图像分成不同的区域，这里的特性可以是像素的灰度、颜色、纹理等，每一个区域都满足特定区域的一致性，互不交叉。从形式化的角度讲，借助于集合概念，图像分割的定义如下[11]：

将整个图像区域 I 划分为 N 个满足下列条件的非空子集（子区域）I_1，I_2，…，I_N：

（1）$\cup_{i=1}^{N} I_i = 1$；

（2）对于 i，$j \in [1, N]$，且 $i \neq j$，$I_i \cap I_j = \varnothing$；

（3）对于 $i \in [1, N]$，有 $P(I_i) = \text{TRUE}$；

（4）对于 i，$j \in [1, N]$ 且 $i \neq j$，有 $P(I_i \cup I_j) = \text{FALSE}$；

（5）对于 $i \in [1, N]$，I_i 为连通区域。

即所有子区域的并集为整个图像区域 I，任意两个不同的子区域的交集为空，子区域不重叠。$P(I_i)$ 是对所有在集合 I_i 中元素的逻辑谓词。

图像分割算法在图像处理中占有重要地位，从而吸引了很多研究人员的关注，并在近几十年得到了快速发展，各种优秀的算法被相继提出，每年有大量研究成果和论文涌现。但是，这些算法都是针对某一类具体的研究对象而产生的，至今仍存在分割算法的通用性差、分割精度不高和计算效率低等问题。造成这一现象的原因主要有以下两点：

（1）图像分割问题的解不具有唯一性，一幅图像中包含边缘、形状、色彩和纹理等各种不同的特征，而这些特征难以用统一的方法来表示，因而在实际应用中只能根据不同主体和不同任务的需求来选择合适的分割方法。

（2）由于图像数据的多样性和复杂性（例如，医学图像具有低对比度和高噪声等特征，红外船舶图像的背景比较复杂等），图像的结构性质呈现迥然相异、各不相同的特性，因此图像分割的难点之一就是寻找图像、图像前景和背景的深层次的本质特征，建立相关模型。

目前，图像分割在智能交通[12]、生物医学图像处理[13-16]、工业自动化生产[17]、遥感卫星图像处理[18]、视频图像处理[19,20]、安全监控以及军事[21]等领域都得到了广泛应用。例如，在生物医学领域，通过提取图像中器官组织的结构区域，可以为医生分析器官体的数据信息、组织结构细胞的识别等方面提供帮助；在智能交通领域，将视频序列中的目标车辆从背景中提取出来，有助于定位和识别车牌；在遥感图像领域，利用遥感数据进行海洋监测和海洋污染监控时，需要通过图像分割来提取图像中的海岸线；在军事领域，可以通过图像分割为目标的自动识别提供参数，等等。图1-2（书后附彩插）所示为图像分割的应用场景。可以说，在所有图像处理过程中，只要涉及对图像目标的提取、测量和分析，就离不开图像分割。

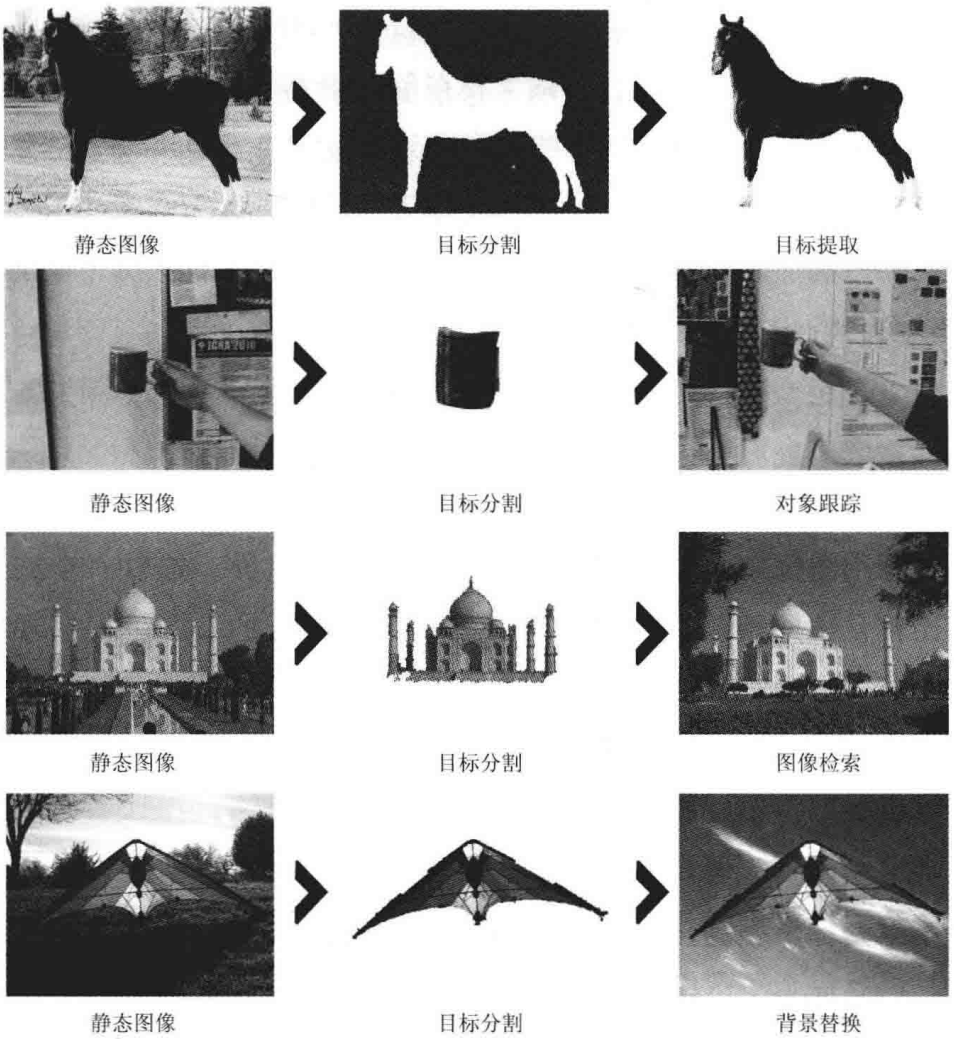


图1-2 图像分割的应用实例

1.2 国内外研究现状

1.2.1 图像分割的传统方法综述

图像分割的广泛应用，促使众多学者不断致力于图像分割理论