

——继小波之后又一次信息处理领域的革命——

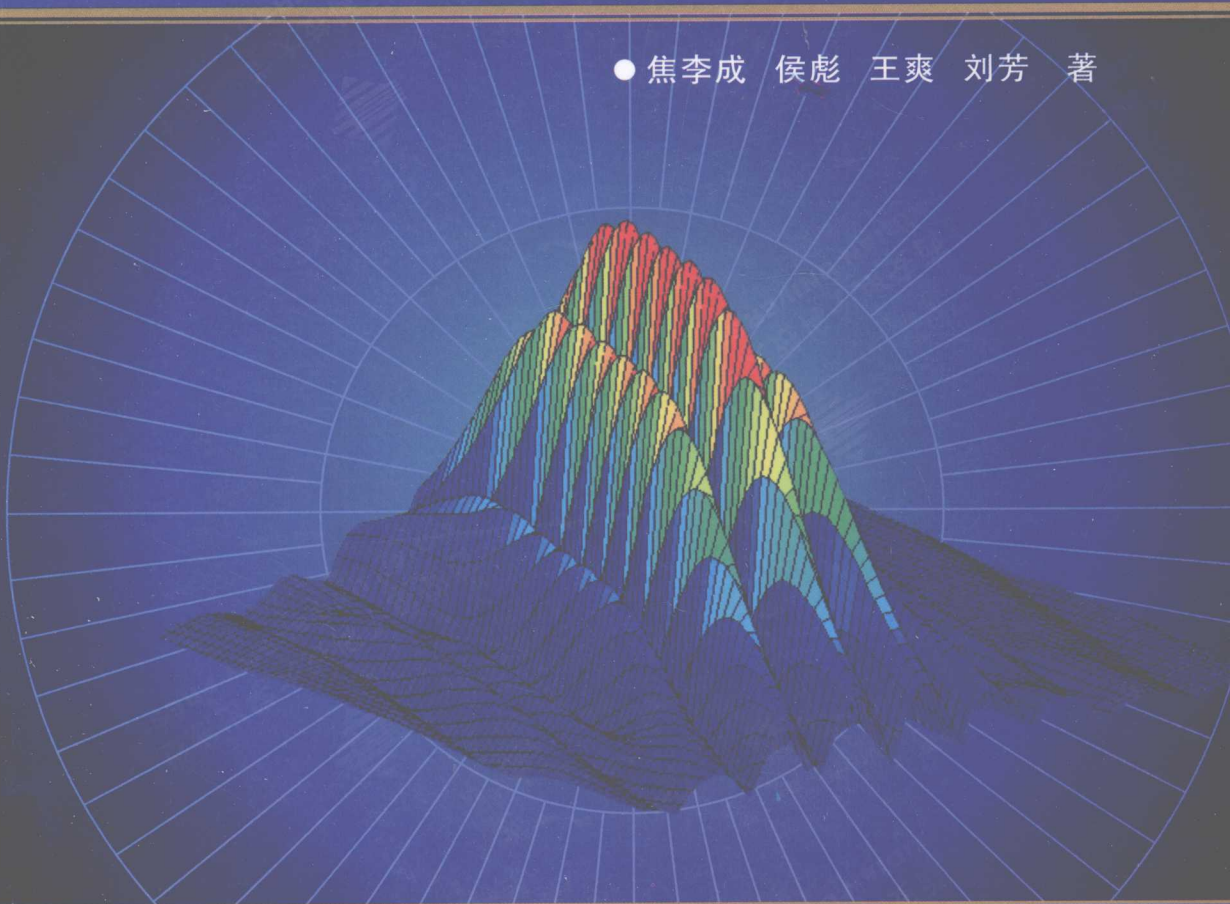
图像多尺度几何分析 理论与应用

Image Multiscale Geometric Analysis: Theory and Applications

——后小波分析理论与应用

Beyond Wavelets

● 焦李成 侯彪 王爽 刘芳 著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

图像多尺度几何分析理论与应用

——后小波分析理论与应用

焦李成 侯彪 王爽 刘芳 著

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书从函数的非线性逼近出发,介绍了多尺度几何分析方法和理论,以及在图像处理领域中的应用。全书共13章,第1章系统地介绍了推动多尺度几何分析发展的数学和生理学背景,综述了图像的多尺度几何分析方法的历史沿革、最新成果及存在的问题;第2章从神经网络、统计估计、逼近论、调和分析等角度研究了多变量目标函数的逼近问题,并指出了这一领域研究的有关问题以及在信号和图像处理中的应用;第3章论述了基于脊波变换的直线特征检测方法;第4章介绍了脊波双框架系统;第5章介绍了自适应连续脊波网络;第6~13章分别介绍了曲线波、梳状波、子束波、楔形波、轮廓波、条带波、方向波和剪切波的基本理论及其应用,应用范围涉及图像压缩、去噪、融合、分割和分类等不同方面。本书从第3章起每一章都给出了相应的实验方法和实验结果。

本书可作为高校电子工程、信号与信息处理、应用数学等专业的高年级本科生或研究生的教材,也可作为从事多尺度几何分析和数字图像处理方面研究工作的科技工作者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

图像多尺度几何分析理论与应用——后小波分析理论与应用/焦李成等著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2008.7

ISBN 978-7-5606-2027-5

I. 图… II. 焦… III. 几何—尺度分析—应用—图像处理 IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 052617 号

策 划 高维岳

责任编辑 张 玮 高维岳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710011

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2008年7月第1版 2008年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 32.875

字 数 592千字

印 数 1~2500册

定 价 50.00元(精装版:60.00元)

ISBN 978-7-5606-2027-5/TP·1049

XDUP 2319001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前

言

十多年前,当数学家们正担心风起云涌的小波浪潮只是昙花一现时,小波分析却以惊人的速度完成了理论构建过程,其应用领域也迅速从数学、信号处理拓展到物理、天文、地理、生物、化学等其他各个学科。小波分析,宛若一场革命,因其超越于 Fourier 分析的众多优点,多年来依然并且无疑将继续在各科学领域中发挥非常重要的作用。现在小波已成为继 Fourier 分析之后的又一有力分析工具。

今天,当喧嚣的小波尘埃落定,又一次新的浪潮正在悄然酝酿中。如果小波的兴起能用“革命”二字来比拟,那么这次新的浪潮无疑又将掀起另一场革命,而引导这场新革命的正是那一批推动小波分析发展的先驱者们,他们的名字是: Ingrid Daubechies, Stéphane Mallat, Albert Cohen, David L. Donoho, Martin Vetterli, Jean-Luc Starck, Emmanuel J. Candès, Minh N. Do 等。与小波分析相比,这场新的革命同样也将深刻地影响各科学领域,其深度、广度甚至将超过小波分析,而这场革命的名字,就是多尺度几何分析(Multiscale Geometric Analysis)。

多尺度几何分析也称后小波分析,它包含了目前最新的计算调和分析 and 稀疏逼近的发展趋势。在数学分析、计算机视觉、模式识别、统计分析等领域,数据的稀疏表示一直是一个非常核心的问题。数据的稀疏表示,一方面可彰显数据的本质特征,另一方面也能减少存贮、处理数据所需的硬件开销。随着社会的发展,海量数据的出现使后一优势显得尤为重要。

数据的稀疏表示,对于人类视觉系统而言就是指,当看到某个典型的画面时,只有很少量的视觉神经元被激活;在图像压缩中则是指压缩文件的致密性;在基于内容的图像检索系统中,是指对数据库中的一幅典型图像所生成的索引记录。实验表明,对于分段光滑信号,小波提供了一种非常简单而有效的表示方法,这就是小波能够成功应用于许多信号处理领域的主要原因。

既然小波能够成功应用于一维分段光滑信号,有人可能会问:“是否这就是最终结论?”遗憾的是,小波分析在一维时所具有的优异特性并不能简单地推广到二维或更高维。由一维小波张成的可分离小波(Separable Wavelet)只具有有限的方向性,不能“最优”表示具有线或者面奇异的高维函数。而事实上具有线或面奇异的函数在高维空间中非常普遍,例如,自然物体光滑边界使得自然图像的不连续性往往体现为光滑曲线上的奇异性,而并不仅仅是点奇异。因此为了实现高效的非线性逼近,迫切需要一种“真正”的二维图像表示方法,以推动下一代图像处理领域应用的发展。

寻求客观事物的“稀疏”表示方法,一直是计算机视觉、数学、数据压缩等领域的专

家学者致力于研究的目标。为了实现对信号更加灵活、简洁和自适应的表示,在小波分析的基础上,人们相继提出了信号在过完备库(Over-Complete Dictionary)上分解的方法。这些方法可以得到一个非常简洁的信号的稀疏表示(Sparse Representation),而得到信号稀疏表示的过程称为信号的稀疏分解。由于信号稀疏表示的优良特性,其研究很快被从一维信号推广到作为二维信号的图像表示研究上。目前针对图像的稀疏分解已经发展了多种算法。图像稀疏分解也已经成功应用于图像处理的多个方面,如图像压缩、去噪和识别等。由于图像的稀疏分解在图像处理中的成功应用,已经引起了越来越多的研究人员的重视,形成对图像稀疏分解研究的热潮。

多尺度几何分析可以看做图像稀疏分解发展的一个分支,发展多尺度几何分析的目的是为了检测、表示、处理某些高维空间数据,这些空间的主要特点是:其中数据的某些重要特征集中体现于其低维子集中(如曲线、面等)。比如,对于二维图像而言,其主要特征可以由边缘所刻画,而在三维图像中,其重要特征又体现为丝状物(Filaments)和管状物(Tubes)。

目前,人们提出的多尺度几何分析方法主要有:脊波(Ridgelet)、曲线波(Curvelet)、梳状波(Brushlet)、楔形波(Wedgelet)、子束波(Beamlet)、轮廓波(Contourlet)、条带波(Bandelet)、方向波(Directionlet)、剪切波(Shearlet)等等。这些新的变换方法的提出,无不基于这样一个事实:在高维情况下,小波分析并不能充分利用数据本身所特有的几何特征,也就是说,小波变换在高维情况下并不是最优的或者说是“最稀疏”的函数表示方法。多尺度几何发展的目的和动力正是要致力于发展一种新的函数表示方法,在高维情况下,这种方法能充分利用函数本身的信息,对特定的函数类达到最优逼近。典型地,每一种方法擅长处理某一种特殊类型的特征,但对其他类型的处理效果并不理想。例如,对二维图像而言,二维小波适合表示点奇异性 and 斑点,脊波适合表示直线奇异性等等。不同的变换各自适合表示不同的图像特征,这给图像稀疏表示提供了更有力的理论和方法。

多尺度几何分析所涉及的范围极广: k 维平面对二进超立方体上的数据逼近,如旅行商问题(Jones' Traveling Salesman Theorem);多尺度的 Radon 变换,如 Beamlet 分析;特殊的空间-频率域剖分分析方法,如 Curvelet 分析等等。本书仅将讨论范围限于二维函数(图像),事实上,更高维的多尺度几何分析方法是二维多尺度几何分析方法的直接推广,而且各种多尺度几何分析方法都是以二维函数作为其讨论的重点或者以分析二维函数为其主要目的。

多尺度几何分析是一个非常前沿的领域,理论和算法都还处于发展初期,我们从该理论提出初期就开始关注和跟踪最新的研究进展。在国家“九五”、“十五”、“十一五”国防预研项目、国家“863”计划(863-306-ZT06-1, 863-317-03-99, 2002AA135080, 2006AA01Z107, 2007AA12Z136, 2007AA12Z223)、国家“973”子项(2001CB309403, 2006CB705707)、国家自然科学基金重点项目(60133010)、国家自然科学基金面上项目(60472084, 60073053, 60372045, 60672126, 60673097, 60575037, 60505010,

60502043, 60603019, 60201029, 60602064, 60607010, 60702062, 60703109)、博士点基金(2000070108, 20060701001, 20050701013, 20070701022, 20070701016)、高等学校科技创新工程重大项目培育资金(706053)、教育部“长江学者”计划创新团队、国家“111”创新引智基地及国家“211”工程等项目的资助下,我们从1997年开始展开了相关课题的研究,在图像去噪、图像融合、图像分割、特征提取、目标识别等问题中取得了一定的研究成果,并且将这些成果应用在合成孔径雷达(SAR)图像的理解与解译上取得了成功。本书无意过多纠缠于繁琐的数学推导过程,也不是仅对各种多尺度几何分析方法做简单的罗列,而是希望通过我们的工作,引起更多研究者对这一新兴领域的关注。由于多尺度几何分析本身尚处于起步阶段,许多问题未及深究,书中许多看法是我们在进行多尺度几何研究中的一己之见,难免有失偏颇,欢迎广大读者批评指正。

可以说,本书是我们在该领域工作的小结,也是智能信息处理研究所和智能感知与图像理解教育部重点实验室近10年来集体工作的结晶。特别感谢保铮院士多年来的悉心培养和教导,感谢国家自然科学基金委信息科学部的大力支持,感谢田捷教授、高新波教授、石光明教授、梁继明教授的帮助,感谢杨淑媛、钟桦、张向荣、刘若辰、公茂果、马文萍、谭山、孙强、贾建、杨晓惠、刘帆、常霞、白静、辛芳、刘汉强、曹芳菊、卜晓明、凤宏晓、刘凤、梁建华、夏玉、刘佩、李博、王凌霞、翟艳霞、吴振等人所付出的辛勤劳动。本书的部分内容借鉴了国内外其他专家和作者的最新研究成果,同时也得到了西安电子科技大学出版社的关心和支持,在此深表谢意!

非常感谢在本书的完成过程中给予帮助的人们,我们也感谢为修正和充实本书提供了宝贵意见的各位同仁。

感谢著者家人的大力支持和理解。

由于著者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

著者

2008年1月

作者简介

- **焦李成**: 1959年10月出生于陕西省白水县。1982年于上海交通大学获学士学位; 1984和1990年于西安交通大学分别获硕士与博士学位; 1990年5月至1992年5月, 在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室从事博士后研究, 任讲师、副教授; 1992年6月至2003年3月, 任西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室教授、博士生导师。现任西安电子科技大学电子工程学院院长、西安电子科技大学智能信息处理研究所所长、智能感知与图像理解教育部重点实验室主任、国家“111”计划创新引智基地主任。焦李成教授曾获中国青年科技奖和霍英东青年教师一等奖(研究类), 同时还获国家教委“跨世纪人才基金”和“霍英东青年教师基金”资助, 入选首批国家“百千万人才工程”第一、二层次和陕西省“三·五”人才第一层次, 被评为陕西省有突出贡献的中青年专家, 曾任第八届全国“人大”代表。焦李成教授主要研究领域为信号与图像处理、自然计算和智能信息处理。
- **侯彪**: 1974年11月出生于陕西省。1993年9月考入西北大学本硕连读数学专业; 1999年6月获学士、硕士学位; 2003年7月在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室获博士学位。现为西安电子科技大学电子工程学院副教授、硕士生导师、“教育部创新团队”骨干成员、国家“111”计划创新引智基地骨干成员、IEEE会员。主要研究方向为多尺度几何分析、小波分析、数字图像处理、SAR图像理解与解译、图像和视频压缩、基于内容的图像和视频检索等。主持完成多项科研项目: 国家自然科学基金、863计划、国家重点实验室基金、国防预研基金等。
- **王爽**: 1978年6月生于陕西省礼泉县。2000年7月毕业于西安电子科技大学电子工程专业, 获学士学位; 2003年4月毕业于西安电子科技大学计算机应用技术专业, 获硕士学位; 2007年3月毕业于西安电子科技大学电路与系统专业, 获博士学位。现为西安电子科技大学电子工程学院副教授、“教育部创新团队”骨干成员、国家“111”计划创新引智基地骨干成员、IEEE会员。主要研究方向为多尺度几何分析、数字图像处理、SAR图像处理。
- **刘芳**: 1963年2月出生于北京市。1984年7月毕业于西安交通大学计算机系。现为西安电子科技大学教授、博士生导师、西安电子科技大学学科带头人、IEEE高级会员、中国电子学会高级会员、陕西省计算机学会人工智能与模式识别专业委员会常委委员。承担和完成了二十余项国家科研任务, 获多项省部级以上科技奖励, 被评为2004年陕西省创新能手。

中英文对照表

Adaptive Continuous Ridgelet Neural Network	自适应连续脊波网络
Average-interpolating Functions	平均插值函数
Anisotropy	各向异性
Anisotropy Scaling Relation	各向异性尺度关系
Bandelet	条带波
Bandelet Network	条带波网络
Bandeletization	条带波化
Basis Function	基函数
Basis Pursuit	基追踪方法
Beamlet	子束波
Beamlet Algorithms	子束波算法
Beamlet Dictionary	子束波字典
Beamlet Graph	子束波图
Beamlet Pyramid	子束波金字塔
Beamlet Network	子束波网络
Bicubic Interpolation	双三次插值
Bi-frame	双框架
Bi-linear Interpolation	双线性插值
Bresenham Algorithm	Bresenham 算法
Brushlet	梳状波
Bump Function	冲击函数
Coarse-scale Beamlet	粗尺度子束波
Complex Wavelet	复小波
Computational Harmonic Analysis	计算调和分析
Contour Segment	轮廓段
Contourlet	轮廓波
Contourlet Network	轮廓波网络
Contourlet Packet	轮廓波包
Contourlet Packet Decomposition Tree	轮廓波包分解树
Contourlet Packet Network	轮廓波包网络

Critically Sampled Contourlet Transform
 Curvelet
 Curvelet Bi-frame
 Curvelet Network
 Directional Filter Bank
 Directionality
 Directionlet
 Dual Ridgelet Frame
 Dual-Tree Complex Wavelet Transform
 Dyadic Wavelet Transform
 Finer Scale Beamlet
 First Generation Bandelet
 Frame Theory
 Generalized Cross Validation
 Generalized Likelihood Ratio Test
 Geometric Flow
 Geometry Regularity
 Gibbs Phenomenon
 Greedy Algorithm
 Homogeneous
 Hough Transform
 Ill-posed
 Immune Radial Basis Function
 Immune Neural Network
 Independent Component Analysis
 Inhomogeneous
 Isotropy
 Kernel Fisher Discriminant Analysis
 Laplacian Pyramid
 Linear Feature
 Linear Singularity
 Optimal Atomic Decomposition
 Orthogonal Base
 Orthogonal Projection
 Orthogonal Ridgelet
 Orthonormal Ridgelet

临界采样的轮廓波变换
 曲线波
 曲线波双框架
 曲线波网络
 方向滤波器组
 方向性
 方向波
 对偶脊波框架
 对偶树复小波变换
 二进小波变换
 细尺度子束波
 第一代条带波
 框架理论
 广义交叉验证
 广义似然比检验
 几何流
 几何正则性
 吉布斯现象
 贪婪算法
 均匀的
 Hough 变换
 不适定
 免疫径向基函数
 免疫神经网络
 独立分量分析
 非均匀的
 各向同性
 核 Fisher 判别分析
 拉普拉斯金字塔
 直线特征
 线状奇异性
 最优原子分解
 正交基
 正交投影
 正交脊波
 标准正交脊波

Overcompleteness	过完备性
Overcomplete Dictionary	过完备字典
Oversampling	过采样
Point-like Singularity	点状奇异性
Project Pursuit Regression	投影跟踪回归
Projection Slice Theorem	投影切片定理
Pyramidal Directional Filter Bank	塔形方向滤波器组
Quadtree Decomposition	四叉树分解
Quadtree Segmentation	四叉树剖分
Quantum Genetic Algorithm	量子遗传算法
Radial Array	径向阵列
Radial Basis Function	径向基函数
Radical Basis Function Neural Network	径向基神经网络
Radon Transform	Radon 变换
Ramp Function	斜坡函数
Rate Distortion Criterion	率-失真准则
Regularization Theory	正规化理论
Regularization Network	正规化网络
Resampling	重采样
Ridge Function	脊函数
Ridgelet	脊波
Ridgelet Frame	脊波框架
Ridgelet Network	脊波网络
Second Generation Bandelet	第二代条带波
Shearlet	剪切波
Singularity Analysis	奇异性分析
Sparse Approximation	稀疏逼近
Sparse Component Analysis	稀疏分量分析
Sparsity	稀疏性
Spatial Inhomogeneity	空间不均匀性
Spline Interpolation	样条插值
Stationary Bandelet Transform	平稳条带波变换
Stationary Wavelet-Based Contourlet Transform	基于平稳小波的轮廓波变换
Stationary Wavelet Transform	平稳小波变换
Statistical Estimation	统计估计
Match Pursuit	匹配追踪

Matrix Array
Monoscale Ridgelet
Multi-Layer Perceptron
Multi-directionality
Multiscale Geometric Analysis
Multiscale Thickness of Sets
Nearest-neighbor Interpolation
Nearest-neighbor Graph
Needle-like
Neural Parameter Space
Non-Orthogonal Base
Non-Overcomplete
Nonsubsampled Contourlet Transform
Nonsubsampled Directional Filter Banks
Nonsubsampled Pyramid
Vanishing Moments
Warped Wavelet Transform
Wavelet
Wavelet-Based Contourlet Transform
Wavelet Neural Network
Wedgelet
Wedgelet Approximation
Wedgelet Decomposition

矩形阵列
单尺度脊波
多层感知器
多方向性
多尺度几何分析
集合的多尺度厚度
最近邻域插值
最近邻图
针状
神经元参数空间
非正交基
非过完备
非下采样的轮廓波变换
非下采样方向滤波器组
非下采样金字塔
消失矩
弯曲小波变换
小波
基于小波分解的轮廓波变换
小波神经网络
楔形波
楔形波逼近
楔形波分解

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 稀疏逼近	3
1.3 从 Fourier 分析到小波分析	7
1.4 多尺度几何分析	9
1.5 多尺度几何变换	12
1.5.1 脊波及单尺度脊波变换	12
1.5.2 曲线波(Curvelet)	13
1.5.3 梳状波(Brushlet)	13
1.5.4 子束波(Beamlet)	14
1.5.5 楔形波(Wedgelet)	15
1.5.6 轮廓波(Contourlet)	15
1.5.7 条带波(Bandelet)	16
1.5.8 方向波(Directionlet)	16
1.5.9 剪切波(Shearlet)	17
1.6 多尺度几何变换的逼近性质	17
1.7 存在的问题和进一步研究的方向	22
1.8 本章小结	24
本章参考文献	24
第 2 章 基函数网络逼近	28
2.1 引言	28
2.2 多变量目标函数的逼近	31
2.2.1 神经网络的逼近和学习	31
2.2.2 统计估计	33
2.2.3 逼近论	35
2.2.4 调和分析	36
2.2.5 小波神经网络	37
2.3 脊波的发展现状及应用前景	39
2.3.1 脊波现有的成果	39
2.3.2 连续和离散脊波变换	42
2.4 存在的问题和进一步研究的方向	47
2.5 本章小结	48
本章参考文献	49

第3章 基于脊波变换的直线特征检测	52
3.1 引言	52
3.2 图像的离散脊波变换	52
3.2.1 基于投影切片定理的 Radon 变换	52
3.2.2 二进小波变换	56
3.2.3 二维离散脊波变换	56
3.2.4 脊波子带的产生	58
3.3 基于脊波变换的直线特征检测	61
3.4 实验结果	63
3.5 本章小结	65
本章参考文献	65
第4章 脊波双框架系统	67
4.1 引言	67
4.2 脊波、正交脊波和脊波框架	68
4.3 Radon 域中对偶框架的构造	70
4.4 从 $\mathcal{R}$ 到 $L^2(\mathbf{R}^2)$ 的等距映射	74
4.5 $L^2(\mathbf{R}^2)$ 中的对偶框架	76
4.6 对偶框架的性质	77
4.7 去噪实验	80
4.8 本章小结	82
本章参考文献	82
第5章 自适应连续脊波网络	85
5.1 引言	85
5.2 多尺度几何网络	87
5.3 自适应连续脊波网络	87
5.4 收敛性能分析	91
5.5 实验结果	94
5.6 本章小结	98
本章参考文献	99
第6章 曲线波	101
6.1 引言	101
6.2 曲线波变换	102
6.3 曲线波框架的性质	107
6.4 第二代曲线波变换	108
6.5 曲线波双框架系统	111
6.5.1 曲线波双框架系统的构造	111
6.5.2 实验结果与分析	113
6.6 曲线波网络	118
6.6.1 曲线波网络模型	118

6.6.2	实验结果与分析	120
6.7	基于方向及尺度乘积的曲线波去噪方法	122
6.7.1	曲线波变换系数的特点	122
6.7.2	基于方向及尺度乘积的曲线波去噪算法	123
6.7.3	实验结果与分析	127
6.8	基于曲线波隐马尔可夫树模型的 SAR 图像去噪	133
6.8.1	曲线波隐马尔可夫树(HMT)模型	133
6.8.2	基于曲线波 HMT 模型的图像去噪算法	134
6.8.3	实验结果与分析	135
6.9	基于曲线波的图像融合	139
6.9.1	基于曲线波的图像融合方法	140
6.9.2	评价标准	141
6.9.3	实验结果与分析	142
6.10	基于曲线波的纹理分类	145
6.10.1	结合共生矩阵的曲线波特征提取及纹理分类算法	146
6.10.2	Curvelet 纹理分类实验	148
6.10.3	实验结果与分析	151
6.11	本章小结	151
	本章参考文献	152
第 7 章	梳状波	157
7.1	引言	157
7.2	梳状波变换理论	158
7.2.1	一维梳状波基构造	158
7.2.2	二维梳状波基构造	160
7.2.3	图像的梳状波变换	160
7.2.4	非下采样梳状波变换	162
7.3	基于梳状波的纹理分类	164
7.3.1	基于梳状波复特征的纹理分类	164
7.3.2	基于非下采样梳状波纹理分类	167
7.4	基于梳状波的图像分割	168
7.4.1	融合梳状波方向特性的无监督图像分割	168
7.4.2	基于非下采样梳状波变换的纹理图像分割	173
7.4.3	基于梳状波共生矩阵的图像分割	176
7.4.4	基于梳状波统计特征的纹理分割	180
7.4.5	基于小波和梳状波变换域特征融合的无监督图像分割	189
7.5	基于梳状波变换和径向基函数神经网络的指纹方向场提取	191
7.6	梳状波变换分层编码压缩	194
7.6.1	基于梳状波压缩算法	194
7.6.2	对比实验及结果分析	195

7.7 基于梳状波和 Wedgelet 的图像融合	198
7.7.1 融合规则	199
7.7.2 融合结果的评价指标	199
7.7.3 基于梳状波和 Wedgelet 的图像融合算法	200
7.7.4 对比实验及结果分析	201
7.7.5 小结	206
7.8 本章小结	206
本章参考文献	206
第 8 章 子束波	210
8.1 引言	210
8.2 Beamlet 框架的构造	211
8.3 Beamlet 分析	211
8.3.1 Beamlet 字典	213
8.3.2 Beamlet 变换	214
8.3.3 Beamlet 金字塔	214
8.3.4 Beamlet 图	215
8.4 Beamlet 算法设计	216
8.4.1 无结构算法	223
8.4.2 树状结构算法	228
8.4.3 线段的局部链接	232
8.4.4 线段的全部链接	237
8.5 本章小结	237
本章参考文献	239
第 9 章 楔形波	239
9.1 引言	239
9.2 楔形波概述	239
9.2.1 楔形波基本理论	240
9.2.2 楔形波分解	241
9.2.3 楔形波构造	243
9.3 楔形波逼近理论及其改进算法	243
9.3.1 楔形波逼近理论	244
9.3.2 楔形波逼近理论改进算法	249
9.3.3 时间效率对比与改进算法的逼近效果	251
9.4 基于楔形波的 SAR 图像边缘检测	251
9.4.1 楔形波基函数	252
9.4.2 基于楔形波逼近理论改进算法的图像边缘检测	258
9.4.3 结合 MSP-RoA 算法的楔形波的 SAR 图像边缘检测	262
9.5 基于楔形波和对偶树复小波的 SAR 图像斑点噪声抑制	263
9.5.1 算法构造	

9.5.2	试验结果与分析	264
9.6	基于 Cartoon 与纹理模型的楔形波图像压缩	268
9.6.1	算法构造	268
9.6.2	实验结果与分析	269
9.7	基于楔形波的图像融合	271
9.7.1	融合规则	271
9.7.2	融合结果的评价指标	272
9.7.3	基于楔形波的图像融合	272
9.7.4	实验结果与分析	273
9.8	本章小结	277
	本章参考文献	278
第 10 章	轮廓波	280
10.1	引言	280
10.2	轮廓波变换	281
10.3	非下采样轮廓波变换	285
10.4	基于轮廓波的 SAR 图像相干斑抑制	288
10.4.1	基于轮廓波 HMM 的 SAR 图像相干斑抑制	288
10.4.2	统计先验指导的 NSCT 域 SAR 图像降斑	299
10.5	基于非下采样轮廓波变换的图像融合	319
10.5.1	基于活性测度和闭环反馈的 NSCT 域遥感图像融合	320
10.5.2	基于克隆选择和 NSCT 的红外与可见光图像融合	330
10.5.3	基于 NSCT 和 LHS 变换的多光谱和高分辨图像融合	335
10.6	基于轮廓波的纹理分割与分类	344
10.6.1	结合多层小波和轮廓波分解的纹理图像分割	344
10.6.2	基于 SVM 和多层小波轮廓波分解的纹理图像分割	348
10.6.3	基于 WBCT 和克隆选择算法的纹理图像分类	350
10.6.4	基于 SWBCT 的纹理图像分类	358
10.7	基于轮廓波的目标识别	364
10.7.1	基于轮廓波和核 Fisher 判别分析的特征提取	364
10.7.2	基于小波和轮廓波的目标识别	371
10.7.3	基于 SWBCT 和投影方法的目标识别	374
10.7.4	基于最优轮廓波包网络的目标识别	378
10.8	本章小结	389
	本章参考文献	389
第 11 章	条带波	397
11.1	引言	397
11.2	小波逼近和几何图像表示	398
11.2.1	基于视觉特性的图像处理现状	398
11.2.2	小波的非线性图像逼近	400

11.2.3	几何图像表示	402
11.3	第一代条带波变换	403
11.3.1	条带波基	403
11.3.2	弯曲小波变换	407
11.3.3	快速离散条带波变换	409
11.4	第二代条带波变换	410
11.4.1	第二代条带波的构造思想	410
11.4.2	第二代条带波的主要实现步骤	410
11.4.3	最优几何方向的选择	411
11.5	基于第二代条带波变换的图像压缩	413
11.5.1	基于第二代条带波变换的图像压缩编码	413
11.5.2	基于第二代条带波和 SPIHT 的图像压缩	417
11.5.3	基于图像分层表示的第二代条带波域图像压缩	421
11.6	基于第二代条带波变换的图像去噪	436
11.6.1	基于第二代条带波的多层自适应阈值的图像去噪	436
11.6.2	基于平稳第二代条带波的图像去噪	440
11.6.3	基于广义交叉验证和第二代平移不变条带波的 SAR 图像相干斑抑制	444
11.6.4	结论	446
11.7	基于第二代条带波变换的多聚焦图像融合	446
11.8	基于第二代条带波变换的图像分割	450
11.9	本章小结	454
	本章参考文献	454
第 12 章	方向波	459
12.1	引言	459
12.2	各向异性二维小波分解	460
12.2.1	完全可分离小波变换	460
12.2.2	各向异性小波变换	462
12.3	基于格的斜小波变换	463
12.3.1	整数格理论	463
12.3.2	斜小波变换	464
12.3.3	多相表示	465
12.4	基于整数格边缘检测的图像融合	466
12.4.1	基于整数格的边缘提取	466
12.4.2	图像融合准则	468
12.4.3	算法实现策略	469
12.4.4	融合结果评估	470
12.4.5	对比实验及结果分析	470
12.4.6	结论	475
12.5	融合纹理奇异性的图像分割	475