

国家自然科学基金资助项目

图像融合技术

—— 基于多分辨率 非下采样理论与方法

Image Fusion
Multiresolution Non-Subsampled

孔韦韦 王炳和 李斌兵 雷 阳 著
聂廷晋 赵 睿 鲁 珊



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

国家自然科学基金资助项目

图像融合技术

——基于多分辨率非下采样理论与方法

孔韦韦 王炳和 李斌兵 雷 阳 著
聂廷晋 赵 睿 鲁 珊

西安电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

图像融合技术：基于多分辨率非下采样理论与方法 / 孔韦韦等著.

—西安：西安电子科技大学出版社，2015.

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3719 - 2

I. ① 图… II. ① 孔… III. ① 图像处理—教材 IV. ① TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 134688 号

策划编辑 李惠萍

责任编辑 张 玮

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 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18

字 数 421 千字

印 数 1~2000 册

定 价 34.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3719 - 8/TP

XDUP 4011001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

内 容 简 介

本书系统介绍了多分辨率非下采样理论及其方法在模式识别、图像信息融合等领域的应用。全书分为四篇,共15章。**第一篇为基础知识**(第1章),介绍了图像融合的背景、目的、意义、发展现状及融合效果评价指标。**第二篇为基于特征的图像匹配**(第2~6章),其中介绍了图像配准的相关基础理论、图像的成像几何基础以及图像变换模型,基于特征相似性度量的图像配准方法,基于概率抽样一致性的鲁棒性基础矩阵估计算法以及基于核模糊均值聚类的基础矩阵估计算法,基于直线几何约束点特征的图像配准方法,基于尺度特征的动态连续目标识别跟踪算法以及STK软件等相关内容。**第三篇为基于多分辨率非下采样理论 NSCT 的图像融合**(第7~11章),其中介绍了基于直觉模糊熵的图像预处理方法,基于改进型 NSCT 的图像融合方法,基于 NSCT 与 AUFLPCNN 的图像融合方法以及基于 NSCT 与 I^2CM 的图像融合方法,基于 NSCT 域改进型非负矩阵分解的图像融合方法,基于 NSCT 与 IHS 变换域的图像彩色化融合方法。**第四篇为基于多分辨率非下采样理论 NSST 的图像融合**(第12~15章),其中介绍了基于 NSST 域人眼视觉特性的图像融合方法,基于 NSST 域 IPCNN 的图像融合方法以及基于 NSST 域 I^2CM 的图像融合方法,基于 NSST 域改进型非负矩阵分解的图像融合方法,基于 NSST 域改进型感受野模型的图像融合方法等。

本书内容新颖,逻辑严谨,语言通俗,注重基础,面向应用,可作为高等院校计算机、信息等专业的高年级本科生或研究生计算智能课程的教材或教学参考书,也可作为从事图像智能信息处理、智能信息融合等研究的教师、研究生以及相关领域技术人员的参考书。

作者简介



孔韦韦，武警工程大学副教授，博士后，硕士生导师，美国 IEEE 会员，日本 IEICE 学会会员。主持或参加国家自然科学基金、国家级信息保障技术重点实验室开放基金、全国博士后基金、全军学位与研究生教育研讨会专项研究课题及陕西省自然科学基金近 20 项，出版专著 2 部，发表论文近 30 篇，其中 SCI/EI 收录论文 20 篇，国家发明专利 2 项。曾获 2012 年度 IET 学术协会优秀学术论文成果奖。目前主要研究方向为图像信息融合、智能信息处理等。

王炳和，博士，武警工程大学教授，博士生导师，中国青年科技工作者协会科技组成员，武警工程大学信息工程系主任。主持或参加国家自然科学基金、教育部博士点基金、国防重点预研项目、国防科技“十一五”计划重点预研项目、陕西省自然科学基金、武警部队重点课题等 20 余项，出版教材、专著 6 部，多次荣获国防科工委科技进步奖、军队教学成果奖、陕西省科技进步奖，获国家发明专利 1 项，发表论文 70 余篇，其中被 SCI/EI 收录 20 篇。主要研究方向为智能信息处理、模式识别等。

前 言

图像传感器技术的飞速发展为人们提供了日益丰富的多传感器图像数据。然而,大量多角度、多层次的图像数据既存在互补性,又充斥着极大的冗余性和复杂性。因此,如何从这些兼有互补性和冗余性的多源海量数据中高效率地提取更可靠、更精炼、更准确的信息,已经成为图像融合领域迫切需要解决的热点问题。

图像配准是进行图像融合工作的基础和前提,它是指为不同视点、不同时间或不同传感器获得的同一场景的两幅或多幅图像建立对应关系的过程。图像配准最早在 20 世纪 70 年代的美国飞行器辅助导航系统、武器投射系统的末端制导以及寻的等应用研究中被提出,并得到军方的大力支持与赞助。如今,除军事领域外,图像配准技术在诸如遥感领域、模式识别、自动导航、医学诊断和计算机视觉等方面也均获得了广泛的应用。

图像融合作为信息融合领域的一个重要分支,是指对多个不同类型图像传感器或同一传感器以不同工作模式获取的关于同一场景的两幅或多幅源图像加以综合,以获取对该场景更精确、更可靠的描述。

近些年面世的多分辨率非下采样理论是对先前变换域方法的扩充和发展。经典的变换域方法由于下采样机制的存在,通常无法保证平移不变性的成立,导致出现 Gibbs 效应,从而影响图像的最终视觉效果。而新近出现的以非下采样轮廓波变换(Non-Subsampled Contourlet Transform, NSCT)理论和非下采样剪切波变换(Non-Subsampled Shearlet Transform, NSST)理论为代表的多分辨率非下采样理论,不仅继承了轮廓波变换等经典变换域方法的多尺度、多方向等优良特性,还具备了平移不变性,拥有优良的细节“捕捉”能力。然而,眼下针对这两种理论的研究仍局限于纯数学的角度,仅存的少数应用研究也大都停留在理论研究层面。因此,多分辨率非下采样理论无论在理论层面还是应用层面均有许多研究工作。

此外,大量成果表明,在描述和求解图像处理领域问题时,各种数学理论各有特点,可以相互补充。由于图像问题的复杂性,单一的图像信息融合方法对于多传感器信息的综合分析、提取和应用问题已难以奏效,一套优良有效的图像信息融合体系,往往需要综合运用多种不同的信息融合处理技术,取长补短。在此背景下,本书旨在以多分辨率非下采样理论为基础,综合利用直觉模糊集、新型神经网络、非负矩阵分解、感受野等多个信息处理领域内的模型,探索和发展基于多分辨率非下采样理论的图像融合方法,建立相关的计算模型,并将这一新的智能信息处理理论引入信息融合领域,为求解信息化战争环境下的信息融合问题提供新的途径。

本书是系统介绍基于多分辨率非下采样理论的图像融合技术的著作,是作者在“国家自然科学基金项目”(No. 61309008, No. 61309022)、“国家级信息保障技术重点实验室开

放基金课题”(No. KJ-13-108)、“全国博士后基金面上项目特别资助”(No. 2014T71016)、“全国博士后基金面上项目一等资助”(No. 2013M532133)、“全国博士后基金面上项目二等资助”(No. 2014M552718)、“陕西省自然科学基金项目”(No. 2013JQ8031, 2014JQ8049)、“武警工程大学自然研究基础基金”(No. WJY-201214、WJY-201312、WJY-201414)资助下系列研究成果的汇集。此外,本书的出版还得到了“军队 2110 工程”建设项目以及武警工程大学学术著作出版计划(WZZ201407)的资助。书中主要内容取自作者研究团队近年来发表的二十余篇学术论文和数篇博士、硕士学位论文,还参考了大量国内外的文献资料,在此对这些学者一并致以诚挚的感谢。

全书分四篇共 15 章,第一篇为基础知识,包含第 1 章,主要介绍图像融合技术的衍生和发展;第二篇为基于特征的图像配准,包含第 2~6 章,分别介绍了图像配准理论的基础理论、基于特征相似性度量的图像配准方法、鲁棒性基础矩阵估计方法、基于直线几何约束点特征的图像配准方法及基于尺度不变特征的图像目标识别与跟踪方法;第三篇为基于多分辨率非下采样理论 NSCT 的图像融合,包含第 7~11 章,分别介绍了基于直觉模糊熵的图像预处理方法、基于改进型 NSCT 的图像融合方法、基于 NSCT 域新型神经网络模型的图像融合方法、基于 NSCT 域改进型非负矩阵分解的图像融合方法及基于 NSCT 与 IHS 变换域的图像彩色化融合方法;第四篇为基于多分辨率非下采样理论 NSST 的图像融合,包含第 12~15 章,分别介绍了基于 NSST 域人眼视觉特性的图像融合方法、基于 NSST 域改进型神经网络模型的图像融合方法、基于 NSST 域改进型非负矩阵分解的图像融合方法及基于 NSST 域改进型感受野模型的图像融合方法等。

本书由孔韦韦主编,参加编撰工作的有:王炳和教授(第 7~9 章)、李斌兵教授(第 1、5、6 章)、雷阳讲师(第 10、11 章)、聂廷晋讲师(第 12、13 章)、赵睿讲师(第 14、15 章)、鲁珊讲师(第 2~4 章)等课题组成员。

图像融合技术是近年来信息处理领域内的热点研究问题,其理论及应用研究受到了国内外众多学者的关注,成为了当前研究的一个热点领域。本书汇集的研究成果只是冰山一角,只能起抛砖之效,加之作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2015 年 4 月

目 录

第一篇 基础知识

第 1 章 概述	2	1.4 图像融合的层次	10
1.1 图像融合的研究背景、目的及意义	2	1.5 图像融合的性能评价	12
1.1.1 研究背景	2	1.5.1 图像的主观评价	12
1.1.2 研究目的及意义	2	1.5.2 图像的客观评价	13
1.2 信息融合	3	1.5.3 单幅图像的性能评价指标	14
1.3 图像融合	5	1.5.4 融合图像的几个评价指标	14
		本章参考文献	17

第二篇 基于特征的图像匹配

第 2 章 图像配准的基础理论	24	3.2.2 直觉模糊集的基本概念	48
2.1 图像配准技术的产生背景	24	3.2.3 直觉模糊集的基本运算	49
2.2 图像配准技术的发展	25	3.2.4 直觉模糊集的截集	49
2.2.1 特征提取	25	3.2.5 直觉模糊集截集的性质与核	51
2.2.2 特征描述	26	3.2.6 直觉模糊集的特点	52
2.2.3 特征匹配	28	3.3 基于直觉模糊距离的图像匹配方法	53
2.2.4 选取变换模型求取参数	29	3.3.1 直觉模糊特征匹配方法	53
2.2.5 优化策略	29	3.3.2 特征点匹配算法	54
2.2.6 坐标变换与插值	29	3.3.3 实验结果与分析	56
2.2.7 性能评估	30	3.4 基于改进 Hausdorff 距离的图像	
2.2.8 系统实现	31	配准方法	60
2.3 成像几何基础	32	3.4.1 空间点特征提取	60
2.3.1 成像几何坐标系统	32	3.4.2 Hausdorff 距离	61
2.3.2 成像几何模型	32	3.4.3 实验结果与分析	63
2.4 图像变换模型	35	本章小结	66
2.4.1 摄像机运动	35	本章参考文献	66
2.4.2 图像变换	35	第 4 章 鲁棒性基础矩阵估计方法	74
2.4.3 透视变换矩阵的求解	37	4.1 经典基础矩阵估计方法比较	74
本章小结	38	4.2 鲁棒的基本概念	74
本章参考文献	39	4.3 对极几何估计及基础矩阵	76
第 3 章 基于特征相似性度量的		4.3.1 平面诱导的单位	76
图像配准方法	44	4.3.2 对极几何约束	76
3.1 模糊集	44	4.4 基础矩阵估计算法	77
3.2 直觉模糊集	46		
3.2.1 直觉模糊集的形成与发展	46		

4.4.1 线性 8 点算法	77	5.3.1 基于直线约束特征点集定义	110
4.4.2 RANSAC 算法	78	5.3.2 同序性检测	111
4.4.3 MLESAC 算法	78	5.3.3 直线约束特征点子集检测	111
4.4.4 GMSAC 算法	79	5.4 基于直线几何约束的点特征图像配准算法	113
4.5 基于概率抽样一致性的基础矩阵估计算法	79	5.5 实验结果与分析	114
4.5.1 模型评价函数	80	5.5.1 Graffiti 真实图像实验	114
4.5.2 预检验	81	5.5.2 Trees 真实图像实验	118
4.5.3 样本重采样	82	5.5.3 对比实验	121
4.5.4 算法过程	82	本章小结	123
4.5.5 算法计算量分析	82	本章参考文献	123
4.5.6 实验结果与分析	83		
4.6 基于 KFCM 的鲁棒性基础矩阵估计算法	88	第 6 章 基于尺度不变特征的图像目标识别与跟踪方法	124
4.6.1 KFCM 算法	88	6.1 尺度不变特征的匹配	124
4.6.2 内外点可分性判定	91	6.2 基于尺度特征的动态连续目标识别跟踪算法	125
4.6.3 算法步骤总结	91	6.2.1 目标识别算法	125
4.6.4 实验结果与分析	92	6.2.2 目标跟踪算法	125
本章小结	99	6.2.3 基于特征的动态连续目标识别跟踪算法	126
本章参考文献	99	6.3 STK 软件简介	126
第 5 章 基于直线几何约束点特征		6.3.1 STK 的主要功能	127
图像配准方法	101	6.3.2 STK 具体模块介绍	128
5.1 直线特征与点特征	101	6.4 实验结果与分析	138
5.2 特征点检测算法——SIFT	102	6.4.1 卫星目标跟踪实验	138
5.2.1 SIFT 算法原理	102	6.4.2 战机目标跟踪实验	139
5.2.2 SIFT 算法实现概述	103	本章小结	141
5.2.3 SIFT 算法实现过程	103	本章参考文献	142
5.3 基于直线约束特征点集检测	110		

第三篇 基于多分辨率非下采样理论 NSCT 的图像融合

第 7 章 基于直觉模糊熵的图像预处理方法	144	7.3.2 图像内部像素点的脉冲噪声处理	150
7.1 改进型直觉模糊熵模型的构造	144	7.3.3 图像边界像素点的脉冲噪声处理	151
7.1.1 直觉模糊熵的几何解释	145	7.4 实例结果与分析	152
7.1.2 直觉模糊熵的构造	146	7.4.1 实验描述	152
7.2 图像预处理问题的直觉模糊推广	148	7.4.2 灰度可见光图像预处理仿真实验	153
7.3 基于直觉模糊熵的图像预处理算法	149	7.4.3 红外图像预处理仿真实验	154
7.3.1 图像的脉冲噪声检测	149	7.4.4 实验结果讨论	156
		本章小结	157
		本章参考文献	157

第 8 章 基于改进型 NSCT 的图像融合方法	159
8.1 改进型 NSCT 模型的产生背景	159
8.2 经典 NSCT 模型基本理论	160
8.2.1 非下采样金字塔分解	160
8.2.2 非下采样方向滤波器组分解	161
8.3 NSCT 的改进型模型	164
8.3.1 不可分离小波变换	164
8.3.2 冗余提升不可分离小波变换	164
8.4 基于改进型 NSCT 的图像融合方法	166
8.4.1 基于改进型 NSCT 的图像融合框架	167
8.4.2 低通子带信息融合规则	168
8.4.3 带通子带信息融合规则	169
8.5 实验结果与分析	171
8.5.1 实验描述	171
8.5.2 多聚焦灰度图像融合仿真实验	172
8.5.3 多波段遥感图像融合仿真实验	174
本章小结	175
本章参考文献	176
第 9 章 基于 NSCT 域新型神经网络模型的图像融合方法	178
9.1 新型神经网络模型的产生背景	178
9.2 神经元及大脑皮层生物特性	179
9.3 基于 NSCT 与 AUFLPCNN 的图像融合方法	180
9.3.1 脉冲耦合神经网络基本模型	180
9.3.2 AUFLPCNN 模型及其赋时矩阵	182
9.3.3 AUFLPCNN 模型的参数确定	184
9.3.4 基于 NSCT 与 AUFLPCNN 的图像融合方法	185
9.3.5 实验结果与分析	186

9.4 基于 NSCT 与 I^2 CM 的图像融合方法	189
9.4.1 交叉视觉皮层模型的基本结构	189
9.4.2 ICM 与数学形态学在图像处理中的等价性	191
9.4.3 I^2 CM 及其参数的确定	197
9.4.4 基于 NSCT 与 I^2 CM 的图像融合方法	198
9.4.5 实验结果与分析	199
本章小结	201
本章参考文献	202
第 10 章 基于 NSCT 域改进型非负矩阵分解的图像融合方法	204
10.1 改进型 NMF 模型的产生背景	204
10.2 经典 NMF 模型	204
10.3 改进型 NMF 模型	210
10.4 改进型 NMF 模型的参数确定	212
10.5 基于 NSCT 域改进型 NMF 的图像融合方法	213
10.6 实验结果与分析	214
10.6.1 多聚焦图像融合实验	214
10.6.2 医学图像融合实验	216
10.6.3 灰度可见光与红外图像融合实验	217
10.6.4 实验结果讨论	218
本章小结	222
本章参考文献	223
第 11 章 基于 NSCT 与 IHS 变换域的图像彩色化融合方法	225
11.1 经典的伪彩色图像融合方法	225
11.2 RGB 空间与 IHS 空间的互换实现	226
11.3 基于 NSCT 与 IHS 变换的图像融合方法	230
11.3.1 图像融合总体框架	230
11.3.2 灰度可见光的彩色传递	231
11.3.3 低通图像融合方法	231
11.3.4 带通图像融合方法	232
11.4 实验结果与分析	233
本章小结	235
本章参考文献	235

第四篇 基于多分辨率非下采样理论 NSST 的图像融合

第 12 章 基于 NSST 域人眼视觉特性的

图像融合方法	238
12.1 经典 NSST 模型基本理论	238
12.2 视觉敏感度系数	241
12.3 基于 NSST 域人眼视觉特性的 图像融合方法	242
12.4 实验结果与分析	243
12.4.1 融合方法与量化评价指标	243
12.4.2 多聚焦灰度图像融合仿真实验	243
12.4.3 灰度可见光与红外图像 融合实验	245
12.4.4 实验结果讨论	246
本章小结	246
本章参考文献	247

第 13 章 基于 NSST 域改进型神经网络

模型的图像融合方法	248
13.1 IPCNN 模型及其赋时矩阵	248
13.2 基于 NSST 域 IPCNN 的图像融合 方法	249
13.3 实验结果与分析	250
13.3.1 实验描述	250
13.3.2 融合实验结果	250
13.3.3 实验结果讨论	253
13.4 基于 NSST 域 I^2CM 的图像 融合方法	255
13.5 实验结果与分析	256
本章小结	257
本章参考文献	257

第 14 章 基于 NSST 域改进型非负矩阵

分解的图像融合方法	259
14.1 二维改进型 NMF 模型	259
14.1.1 INMF 模型的行方向构建	259
14.1.2 INMF 模型的列方向构建	260
14.2 基于 NSST 域 INMF 的图像 融合方法	260
14.3 实验结果与分析	261
14.3.1 实验方法及参数设定	262
14.3.2 多聚焦图像融合实验	262
14.3.3 医学图像融合实验	263
14.3.4 实验结果讨论	264
本章小结	267
本章参考文献	267

第 15 章 基于 NSST 域改进型感受野模型的

图像融合方法	268
15.1 经典感受野模型的生物视觉机理	268
15.2 改进型感受野模型	269
15.3 基于 NSST 域改进型感受野 模型的图像融合方法	271
15.4 实验结果与分析	272
15.4.1 多聚焦图像融合实验	272
15.4.2 灰度可见光与红外图像融合 实验	274
15.4.3 实验结果讨论	275
本章小结	277
本章参考文献	277

第一篇 基础知识

第 1 章 概 述

多传感器图像融合是信息融合领域研究的热点问题，多分辨率非下采样理论作为一种崭新的图像多尺度分析工具已经引起国内外许多专家学者的密切关注，并产生了大量研究成果。本书尝试以多分辨率非下采样理论为工具，系统研究和构建新的多传感器图像融合框架，发展和提出新的多传感器图像融合方法。

本章的主要内容包括：本书的研究背景、研究目的及意义；国内外信息融合、图像融合等相关领域的发展研究现状；图像融合的层次；常用的图像融合效果的性能评价方法。

1.1 图像融合的研究背景、目的及意义

1.1.1 研究背景

随着图像传感器技术的不断飞速发展，获取多传感器图像融合数据的手段和工具也不断丰富。然而，传感器所提供的数据量日益呈现出多样性和复杂性，如何充分、有效地综合利用多传感器的海量遥感图像数据，成为现今迫切需要解决的一个热点问题。

图像融合是将多源信道采集的同一目标图像经过一定的处理，提取各信道的数据，综合互补信息而形成新图像的过程。近几十年里，图像融合研究取得了长足发展，许多有效的融合策略和融合方法相继出现，而基于多分辨率分析的图像融合方法由于可以在不同尺度、不同分辨率上有针对性地突出图像的重要特征和细节信息，更是被广泛地应用于实际，并取得了巨大成功，尤其是非下采样轮廓波变换(Non-Subsampled Contourlet Transform, NSCT)和非下采样剪切波变换(Non-Subsampled Shearlet Transform, NSST)两种理论，它们不仅继承了 Contourlet 变换的多尺度、多方向等优良特性，而且还具备平移不变性，具有优良的细节“捕捉”能力。因此，基于 NSCT 和基于 NSST 的多传感器图像融合理论越来越受到广大学者的关注，已成为图像融合领域内的研究热点，同时，如何进一步发展和改进 NSCT 及 NSST 融合理论也成为了图像信息融合领域的热点研究方向。

本书所涉及的研究内容正是在此背景下展开的，即结合各类图像信息传感器的优势，对基于 NSCT 和基于 NSST 的多传感器图像融合理论进行深入研究，一方面，需要对 NSCT 理论及 NSST 理论本身加以分析和改进，建立新的 NSCT、NSST 融合理论模型；另一方面，将其他一些优良的信息处理、分析和融合领域的方法与 NSCT、NSST 理论相结合，以期获得更好的多传感器图像融合效果。

1.1.2 研究目的及意义

多种图像传感器的出现为我们提供了大量多角度多层次的图像数据，然而这些信息数据中既存在互补性，又充斥着极大的冗余性。如何从这些兼有互补性和冗余性的多源海量

数据中有效提取更可靠、更精炼、更精确的信息,为人为决策和人工智能决策系统提供决策依据,已经成为一个迫切需要解决的问题,图像融合技术也随之成为现今信息融合领域内的一个热点。

尽管 NSCT、NSST 两种多分辨率非下采样理论同较早提出的多分辨率分析变换理论相比,具有很明显的优势,但由于是近年才面世的新兴理论,眼下仍处于起步发展阶段,因而其理论本身势必存在一定的不足,如何通过研究发现其不足并进行必要、有效的改进,成为图像融合领域赋予我们的一项新任务。

不仅如此,大量成果表明,单一的图像信息融合方法对于多传感器信息的综合分析、提取和应用问题已难以奏效,一套优良有效的图像信息融合体系,应综合运用多种不同的信息处理融合技术,取长补短。因此,如何将 NSCT、NSST 两种多分辨率非下采样理论分别同其他理论进行有效融合,将成为图像融合领域对我们提出的另一项新任务。

本书将对经典 NSCT、NSST 理论加以分析改进,发展改进型 NSCT 及改进型 NSST 融合理论;探索神经网络、线性代数和生物视觉等领域中的其他方法与 NSCT 融合理论加以综合的可能性;建立新的图像融合理论框架和体系结构,从新的视角发展图像融合理论,以期扩展解决本领域问题的方法和途径,为解决医学图像处理、目标检测和我国新一代红外与可见光制导武器的相关研究提供理论支持。本书所融入的新思路、新方法,是求解图像融合问题的一次有益的尝试。

1.2 信息融合

融合的概念出现于 20 世纪 70 年代,当时被称为多源相关、多传感器混合和数据融合。70 年代初,美国研究机构在国防部的资助下,利用计算机技术对声呐信号进行了融合处理,以实现对敌方潜艇位置的自动检测,这一举措被认为是融合技术在实际应用领域里的最早体现^[1]。之后,美国相继开发了几十个军用信息融合系统,其中最典型的是战场管理和目标检测系统(Battlefield Exploitation and Target Acquisition system, BETA),该系统在研发时遇到过巨大困难,一方面表明了数据融合系统开发的复杂性和艰巨性,同时又从反面证实了信息融合的可行性。进入 80 年代,美国三军总部相继开始了采用信息数据融合技术和战略监视系统的开发,美国国防部从海湾战争中体会到该技术的巨大应用潜力,以后逐年加大投资力度。此后,美国国防部开始研究在军事领域的指挥、控制、通信与情报(Command, Control, Communication and Intelligence, C³I)系统中,使用多个传感器收集战场信息,到 80 年代末期,已有一些数据融合系统研制成功,这类系统着重于对现有的军用传感器的数据进行有效的融合处理。1996 年,美国又在原 C³I 系统的基础上加入了计算机,研发了 C⁴I 系统,并于 1997 年提出到 2010 年建成 C⁴ISR 系统,其中 S 和 R 分别代表侦测(Surveillance)和侦察(Reconnaissance)。一体化的 C⁴ISR 系统是一个集战场感知、信息融合、智能识别、信息处理、武器控制等核心技术为一体,旨在实现军事指挥自动化的综合电子信息系统,受到了世界各军事大国的高度重视。

在学术研究上,1984 年美国国防部和美国海军成立了数据融合专家组(Data Fusion Subpanel, DFS),专门负责信息融合领域的研究和开发。1986 年起,机器人领域颇有影响的一些国际学术会议、期刊都推出了传感器数据融合的专辑,譬如《Int. Jour. Of Robotics

Research》在 1988 年率先推出 Sensor Data Fusion 专辑；IEEE 主办的学术会议“Robotics & Automation”从 1986 年起开始研究有关于信息融合的专题。1989 年，SPIE(国际光学工程学会)开始连续主持召开有关数据融合的学术会议，Ren C. Luo 在《IEEE Trans. On SMC》上发表了一篇题为《Multisensor Integration and Fusion in Intelligence System》^[2] 的综述性文章，对此前这方面的工作进行了概括总结，自此，该领域的研究变得十分活跃。荷兰 Elsevier Science 出版集团 2000 年创刊的期刊《Information Fusion》是数据融合方面的专门刊物，刊载多传感器和多信息源领域的新成果与研究报告。许多国际刊物，如《IEEE Trans. AES》、《IEEE Trans. SMC》、《IEEE Trans. AC》等都有信息融合专栏。1994 年在美国内华达州拉斯维加斯召开了“IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System”，这是多传感器信息融合技术学术界的一次盛会，标志着作为一个新兴学科，多传感器信息融合技术已得到国际权威学术界的承认。1997 年，在美国成立了国际信息融合学会(International Society of Information Fusion, ISIF)。如今，美、英、德、法、俄、日等国都有大量专家、学者参与数据融合技术的研究，并产生了大量的研究成果。

不仅如此，自 1985 年至今，国外已先后出版了 10 余部有关信息融合方面的专著，这是对该领域研究成果的总结。White^[3] 给出了研究数据融合的一般功能模型，这一模型成为人们研究信息融合的基本出发点。Hall 和 Llinas 的专著《多传感器数据融合手册》^[4] 详尽论述了数据融合的模式、术语、算法等，是研究数据融合的基础。Blackman 的《多目标跟踪及在雷达中的应用》^[5] 给出了数据融合在目标跟踪领域的应用。国外一些大学也早在 20 世纪 80 年代就成立了数据融合研究机构，华盛顿的 George Mason 大学在 1989 年成立了 C³I 研究中心，现更名为 C⁴I 研究中心^[6]，致力于为美国军方和相关政府部门提供学术支持。美国加州大学伯克利分校和麻省理工学院等一批高校分别开展了传感器网络的基础理论和关键技术的研究。

我国对信息融合理论和技术的研究起步相对较晚，直到 20 世纪 80 年代末期才开始出现相关多源信息融合技术研究的报告，到 90 年代初，这一领域的研究在国内才开始逐渐升温。为跟踪国际前沿，我国政府不失时机地将信息融合技术列为“863”计划和“九五”规划中的国家重点研究项目，并将其确定为发展计算机技术及空间技术等高新产业领域的关键技术之一。自 20 世纪 90 年代初以来，随着各类传感器的研制成功，在政府、军方和各种基金部门的资助下，国内一批高校和研究所开始从事这一技术的研究工作，取得了大批理论研究成果，与此同时，也有数据融合的译著和专著出版，其中有代表性的有：康耀红的《数据融合理论及应用》^[7]，刘同明、夏祖勋和解洪成的《数据融合技术及其应用》^[8]，杨万海的《多传感器数据融合及其应用》^[9]，戴亚平、刘征和郁光辉的译著《多传感器数据融合理论及应用》^[10]，徐科军的《传感器与检测技术》^[11]，杨国胜、窦丽华的《数据融合及其应用》^[12]。2007 年面世的由敬忠良等人编著的《图像融合——理论与应用》^[13] 被认为是国内关于图像融合理论最新最全面的总结。从 20 世纪 90 年代至今，信息融合技术在国内已经发展成为多方关注的共性关键技术，随着该技术研究理论的深入并逐步向实用化方面发展，实际需求与基础理论研究互相促进，必将提高我国的数据融合技术实力。

越来越多的研究结果证明，信息融合技术已经引起全球许多国家的高度重视，各国纷纷投入大量的人力和资金用于该领域的科学研究，并已取得较大的进展，产生了大量的学

术理论成果,有的甚至已经被广泛应用于民用和军事领域。然而,仔细分析我们不难发现,信息融合问题至今仍未形成一套完整的理论体系和算法模型,绝大多数研究成果几乎都仅适用于某一特定场合或某一假设状态下的某种领域,往往是一种模型适用于此,而不适用于彼,暴露出普遍适用性的严重缺乏。另一方面,由于建立一套完整的理论体系和算法模型难度较大,而针对某一特定领域设计信息融合方案的效果往往立竿见影,这一事实也大幅阻碍了研究者们对信息融合的本质的认识,相应地也减缓了该理论的进一步发展。

我国的信息融合研究起步较晚,尽管经过二十余年的发展也取得了一些成绩,但同发达国家相比仍有着不小的差距。总体上来说,有两方面的问题需要解决:一是完整理论体系和算法模型的确立,探索和研究信息融合的理论体系和算法模型有助于我们弄清该理论的本质,从根本上把握信息融合的规律,可以为日后的研究和理论发展提供思路;二是理论应用的实现,即将已成熟的信息融合理论作为一种新的数学方法引入到具体应用中,通过实践指导理论的发展。

1.3 图像融合

信息融合技术在医学、军事等实际应用领域中的优势已为世人所共识,与此同时,它在民用领域中的应用特别是多传感器图像融合方面的巨大优势也引起了人们的广泛关注。多传感器图像融合的主要研究内容是如何加工处理以及协同利用多源图像信息,使得不同形式的信息相互补充,从而最终获得对同一事物或目标的更客观、更本质的认识。作为多传感器信息融合中一个重要分支,图像融合技术是一门综合了传感器图像处理、信号处理、计算机和人工智能等多种学科的现代高新技术^[14-17],在医学图像处理^[18]、目标检测^[19]等领域中得到了广泛应用。它不是源图像数据之间的简单复合,而是一个信息优化的过程。与源图像信息相比,融合结果更为简洁,更少冗余,更有用途。不仅如此,多传感器图像融合还可以富集多种途径的信息,为多源图像数据分析与应用提供全新的思路,可以减少或抑制单一信息在被感知对象或环境解释中可能存在的多义性、不完整性、不确定性和误差,最大限度地利用多种信息源提供的信息,从而大大提高在特征提取、分类、目标识别等方面的有效性。

在各应用领域对图像融合的需求的牵引下,各国对图像融合技术的研究也越来越重视。图像融合技术最早被应用于遥感图像的分析 and 处理中。1979年,Daily等人^[20]首先把雷达图像和 Landsat-MSS 图像的复合图像应用于地质解释,其处理过程可以看做是最简单的图像融合。1981年,Laner 和 Todd^[21]进行了 Landsat-RBV 和 MSS 图像数据的融合试验。80年代以后,图像融合技术开始引起人们的关注,陆续有人将图像融合技术应用于遥感多光谱图像以及一般图像(可见光图像、红外图像、多聚焦图像等)的分析 and 处理中。80年代中期,一些学者专家尝试将源图像进行多尺度分解融合。1983年,Burt 和 Adelson^[22]首先将拉普拉斯金字塔算法应用于图像融合,其思想是在得到一系列 Gauss 滤波图像的基础上,与预测图像之差形成一系列误差图像。1984年,Burt^[23]最先提出了基于拉普拉斯金字塔分解的图像融合方法,他使用了拉普拉斯金字塔和基于像素最大值的融合规则进行人眼立体视觉的双目融合。Adelson^[24]利用拉普拉斯技术将由同一相机获取的不同焦距的图

像合成一幅具有扩展景深的融合图像。1985年, Chiche 和 Bonn^[25] 提出了将 Landsat-TM 的多光谱遥感图像与 SPOT 卫星得到的高分辨率图像进行融合。1988年, Ajjimarangsee 和 Huntsberger^[26] 利用神经网络对红外和可见光图像进行了融合; Nandhakumar 和 Aggarwal 综合分析了红外和可见光图像的场景释义。1989年, Toet^[27-31] 在考虑人类视觉系统对局部对比度敏感的基础上, 提出了比率低通金字塔算法、对比度金字塔算法和形态学金字塔算法, 较好地保留了图像中重要的细节信息。其中, 比率低通金字塔算法与拉普拉斯金字塔算法非常类似, 差异在于前者是求各级高斯金字塔之间的比率, 而不是求各级高斯金字塔之间的差值, 比率低通金字塔算法和基于像素最大值的融合原则被用于可见光和红外图像的融合。同年, Rogers 等人^[32] 通过融合 LADAR 和红外图像实现了目标分割。90年代后, 机器人导航^[33] 对融合可见光图像和距离数据的需要, 遥感对融合各种卫星影像数据的要求, 军事防御中的目标定位和跟踪^[34] 对融合不同位置处、不同类型传感器获得的图像的要求, 以及医疗诊断对融合不同类型医学图像的要求都促进了图像融合技术的研究。1993年, Burt^[35] 提出了梯度金字塔算法, 该算法由于考虑了图像的方向信息, 能较好地提取图像的边缘信息。1994年前后, Matsopoulos 等人^[36, 37] 成功地将形态学金字塔算法应用于医学图像的融合。文献[38]中, Sims 等人对拉普拉斯金字塔算法、比率低通金字塔算法、梯度金字塔算法三种塔式分解在图像融合中的性能分别进行了定性和定量分析。

上述有关塔式分解的文献对不同传感器图像进行了较好的融合运算, 这些方法开创了图像融合领域的新纪元, 具有重要的进步意义。然而, 塔式分解自身也存在着一定的问题, 由于其各层数据之间存在相关性, 因而, 当源图像差别较大时, 容易引起算法的不稳定, 造成融合效果不佳。此时, 一种新的融合理论——小波变换开始进入多源图像融合领域。Li 等人^[39] 和 Chipman 等人^[40] 几乎同时提出了将离散小波应用于图像融合, 并以仿真实验证明了通过小波变换得到的融合图像的视觉效果优于金字塔算法的融合效果。Koren 等人^[41] 将可控二值小波变换用于图像融合, 取得了良好的效果。Zhang 等人^[42] 对基于多分辨率分析的图像融合技术进行了总结, 提出了基于区域的融合规则, 为我们解决图像融合问题提供了一种崭新的融合思路。此外, 还有许多专家学者对小波在融合领域中的应用做出了有益的尝试^[43-48], 其中值得一提的是 Mallat 在 1989 年将计算机视觉中的多分辨率分析引入到小波领域, 建立了多分辨率分析与小波分析之间的联系, 推导出了快速的离散小波变换算法——Mallat 算法^[49, 50]。Nunez^[51]、Chibani 等人^[52] 对冗余小波变换进行了深入研究。Kovacevic 等人^[53] 提出了任意维小波簇, 构造了 Neville 滤波器作为内插滤波器, 形成了任意采样格式的滤波器组和小波。上述几位专家学者为学术界日后研究满足平移不变性性质的融合方法奠定了理论基础。

虽然小波变换作为一种图像多尺度几何分析工具, 对一维分段光滑信号具有良好的时频局部分析特性, 但这种特性并不能推广到二维甚至更高维空间中。理论分析表明, 小波主要适用于表示具有各向同性的对象, 而对各向异性的奇异性对象, 小波无法捕获轮廓上的光滑性, 针对这一严重缺陷, Do 和 Vetterli 提出了一种适合分析一维或更高维奇异性的有限脊波变换(Finite Ridgelet Transform, FRIT)^[54]。脊波本质上是通过对小波基函数添加一个表征方向的参数得到的, 所以它不但和小波一样具有局部时频分析能力, 而且还具有很强的方向选择和辨识能力, 可以非常有效地表示信号中具有方向性的奇异性特征, 如图像的线性轮廓、图像中的直线信息等, 因此该理论的出现有助于处理源图像中边缘多为