

详细介绍了数字图像融合领域的一些基本概念和常见算法，涵盖多聚焦图像融合、红外与可见光图像融合、医学图像融合和遥感图像融合四大领域的前沿技术

Analysis and Application of Algorithm for
Digital Image Fusion

数字图像融合 算法分析与应用

刘帅奇 郑伟 赵杰 胡绍海◎著

- 着重介绍了像素级图像融合算法，对常见的图像融合种类都有所涉及
- 对不同传感器获得的数字图像进行了分类，并给出了不同的融合算法
- 书中介绍的每个算法都有很强的前瞻性、针对性和实用性
- 书中介绍的每个算法都具有较高的学术水平和广泛的应用前景

书中介绍了20余个数字图像融合实验，并对实验结果进行了详细分析



机械工业出版社
China Machine Press

Analysis and Application of Algorithm for
Digital Image Fusion

数字图像融合 算法分析与应用

刘帅奇 郑伟 赵杰 胡绍海◎著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

数字图像融合算法分析与应用/刘帅奇等著. —北京: 机械工业出版社, 2018.4

ISBN 978-7-111-59302-7

I. 数… II. 刘… III. 数字图像处理 IV.TN911.73

中国版本图书馆CIP数据核字 (2018) 第041656号

数字图像融合算法分析与应用

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 欧振旭 李华君

责任校对: 姚志娟

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

版 次: 2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 186mm×240mm 1/16

印 张: 17

书 号: ISBN 978-7-111-59302-7

定 价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

前言

图像融合是将源自不同传感器的多幅图像中的重要信息融合到一幅图像中的过程。图像融合可以克服单一传感器图像的局限性和差异性，获取更为全面和准确的场景描述，提高图像的清晰度和可理解性，以便进一步进行图像的分析 and 处理。图像融合技术初期主要集中应用于军事安全领域。例如，通过可见光图像和红外图像的融合，可增强对目标的识别度，方便对目标的检测和跟踪，用以提高战场的决策和指挥能力。由于其具有诸多优势，所以近年来随着信息技术的发展，图像融合应用已经不限于战场监控，而是广泛应用于医学成像、卫星遥感、气象预报等诸多关系到国计民生的重要领域中。

不同种类的图像融合算法由低到高分三个层次：数据级融合、特征级融合和决策级融合。数据级融合也称为像素级融合，是指直接对传感器采集的数据进行处理而获得融合图像的过程，是目前图像融合研究的重点之一。其优点是能尽量地保持源图像信息，提供其他融合层次所没有的详细场景。本书着重介绍的就是像素级的图像融合算法，并且对常见的图像融合种类都有所涉及，如多聚焦图像融合、医学图像融合、红外与可见光图像融合和遥感图像融合。本书内容新颖，算法丰富，讲解翔实，可以给相关领域的研究人员、高校学生和教师及算法爱好者提供有效的帮助和指导。

本书要求读者具备信号与系统、数字信号处理、高等数学、线性代数和数字图像处理等课程的基本知识。

本书特色

1. 内容丰富，结构合理

本书首先详细介绍了数字图像融合的基本概念，然后全面介绍了常见的数字图像融合算法的相关知识。在内容的编排上，本书根据读者的学习过程对全书内容做了合理的梯度安排，更加适合读者阅读。

2. 算法丰富，讲解翔实

本书详细介绍了多个常见数字图像融合算法的理论与应用。每个算法都经过作者的精挑细选，具有很强的针对性。所有算法都是已经发表或者将要发表的论文成果，有较高的

学术水平和较强的实用性。

3. 技术新颖，应用广泛

本书涉及多聚焦图像融合、红外与可见光图像融合、医学图像融合及遥感图像融合等前沿技术，这些技术都具有广泛的应用前景，有很强的前瞻性。

4. 语言通俗，图文并茂

本书在讲解知识点时给出了大量的图示和图表，以图文并茂的方式帮助读者更加直观和深入地理解书中的内容，从而提高学习效率。

本书内容

本书分为 8 章，按照不同的图像源对图像融合算法进行了详细介绍。相应的融合算法主要包括多聚焦图像的融合算法、可见光与红外图像的融合算法、医学图像的融合算法和遥感图像的融合算法 4 大类。具体内容简要介绍如下。

第 1 章为图像融合简介，简要介绍了图像融合的研究背景和意义，以及图像融合技术的研究现状。对于图像融合技术，介绍了图像融合的层次和传统的图像融合方法，并指出了图像融合研究中存在的问题；针对图像融合效果的评价，介绍了主观评价和客观评价两种标准。

第 2 章介绍了基于小波的多聚焦图像融合算法、基于轮廓波的多聚焦图像融合算法和结合轮廓波变换与核范数最小化理论的多聚焦图像融合算法。

第 3 章介绍了基于剪切波域的各种多聚焦图像融合算法、基于 NSST-FRFT 的多聚焦图像融合算法、基于 NSST 域的自适应区域与脉冲发放皮层模型的多聚焦图像融合算法、基于 Smoothlet 的多聚焦图像融合算法和基于灰度共生矩阵的多聚焦图像融合算法。

第 4 章介绍了基于 NSST 域自适应 PCNN 的红外与可见光图像融合算法，以及基于 NSST 域模糊逻辑的红外与可见光图像融合算法等内容。

第 5 章介绍了基于 NSST 和高斯混合模型的医学彩色图像融合算法、基于非下采样复小波变换的医学图像融合算法、基于 NSST 变换和 Smoothlet 的医学图像融合算法，以及基于加权核范数最小化的医学图像融合算法等内容。

第 6 章介绍了基于人工鱼群算法优化的小波域医学图像融合算法，以及结合 Shearlet 变换和果蝇优化算法的甲状腺图像融合算法。

第 7 章介绍了几种传统的遥感图像融合算法，并介绍了基于复剪切波域的遥感图像融合算法。

第 8 章对全书内容进行了总结和展望。总结了数字图像融合的发展及应用，并对数字图像融合研究的前景进行了展望。

本书读者对象

- 从事算法研究的技术人员；
- 从事数字图像研究的人员；
- 计算机视觉研究人员；
- 卫星遥感研究人员；
- 医学图像研究人员；
- 数学建模爱好者；
- 高等院校理工科相关专业的学生和老师。

本书作者

本书主要以编写人员的课题研究内容为主，参考了参加本项目的博士生和硕士生发表的论文和实验结果，同时部分内容参考和引用了国内外相关领域的论文和研究成果。

本书主要由刘帅奇、郑伟、赵杰和胡绍海编写。其中，刘帅奇和胡绍海编写了第1章；刘帅奇、胡绍海和赵杰编写了第2章和第3章；刘帅奇、孙伟和胡绍海编写了第4章；刘帅奇、赵杰和郑伟编写了第5章；郑伟和赵杰编写了第6章；扈琪和孙伟编写了第7章；赵杰编写了第8章。另外，石家庄铁道大学的耿鹏，以及河北大学的李鹏飞等人也为本书的编写做出了很多贡献，在此表示感谢。

本书在编写过程中参考和引用了一些国内外专家的相关著作、论文和研究成果，具体参见本书的参考文献。因篇幅所限，本书未能将所有引用的参考文献全部收录，需要的读者可以发邮件索要。在此感谢这些文献的著作者为本书的撰写提供了十分珍贵的第一手资料！我们认为，本书是国内外数字图像融合研究领域集体智慧的结晶，是研究工作者共同劳动的成果。

由于作者水平和编写时间所限，加之选材内容尚需充实和完善，书中可能还存在疏忽和错漏之处，恳请广大读者批评指正。联系我们请发电子邮件到 hzbook2017@163.com。

编著者

目 录

前言

第 1 章 图像融合简介	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 图像融合基础知识	3
1.3.1 图像融合层次	3
1.3.2 传统图像融合算法	4
1.3.3 图像融合存在的问题	6
1.4 图像融合评价标准	7
1.4.1 主观评价标准	7
1.4.2 客观评价标准	8
第 2 章 基于小波和轮廓波的多聚焦图像融合	12
2.1 多聚焦图像特点	12
2.2 基于小波的多聚焦图像融合算法	14
2.2.1 小波变换	14
2.2.2 小波域多聚焦图像融合算法	23
2.2.3 基于小波的多聚焦图像融合实验结果分析	26
2.3 基于轮廓波的多聚焦图像融合算法	26
2.3.1 轮廓波变换	27
2.3.2 复轮廓波变换	28
2.3.3 向导滤波	31
2.3.4 基于轮廓波变换图像融合算法	33
2.3.5 实验结果分析	35
2.4 结合轮廓波变换与核范数最小化理论的多聚焦图像融合算法	44
2.4.1 核范数最小化理论	45
2.4.2 图像融合算法	46
2.4.3 实验结果与分析	48
2.5 本章小结	54
第 3 章 基于剪切波和 Smoothlet 的多聚焦图像融合	55
3.1 剪切波变换基础知识	55

3.1.1	剪切波变换	55
3.1.2	离散剪切波变换	57
3.1.3	非下采样剪切波变换	61
3.2	基于剪切波的多聚焦图像融合算法	61
3.2.1	基于剪切波变换的图像融合框架	61
3.2.2	基于剪切波变换的图像融合规则	62
3.2.3	实验结果对比与分析	65
3.3	基于 NSST-FRFT 的多聚焦图像融合算法	72
3.3.1	NSST-FRFT 原理	72
3.3.2	NSST-FRFT 图像融合框架	73
3.3.3	图像融合规则	73
3.3.4	实验结果对比与分析	75
3.4	基于 NSST 域的自适应区域与脉冲发放皮层模型的多聚焦图像融合算法	83
3.4.1	共享相似性和自适应区域	83
3.4.2	脉冲发放皮层模型	84
3.4.3	基于自适应区域、EOE 和 SCM 的图像融合	85
3.4.4	实验结果分析	87
3.5	基于 Smoothlet 的图像融合算法	91
3.5.1	Smoothlet 变换及依赖变换理论介绍	92
3.5.2	基于 NSCT 和 Smoothlet 的图像融合	97
3.5.3	仿真实验和结果分析	99
3.6	基于灰度共生矩阵的多聚焦图像融合算法	101
3.6.1	图像的灰度共生矩阵	101
3.6.2	融合框架	102
3.6.3	实验结果	104
3.7	本章小结	110
第 4 章	红外与可见光图像融合	111
4.1	红外与可见光图像特点	111
4.2	基于 NSST 域自适应 PCNN 的红外与可见光图像融合算法	112
4.2.1	区域提取	112
4.2.2	脉冲耦合神经网络 (PCNN)	113
4.2.3	图像融合框架	114
4.2.4	图像融合规则	115
4.2.5	实验结果对比与分析	116
4.3	基于 NSST 域模糊逻辑的红外与可见光图像融合算法	119
4.3.1	图像融合框架	120
4.3.2	图像融合规则	121
4.3.3	实验结果对比与分析	122
4.4	基于 SCM 和 CST 的红外与可见光图像融合算法	126
4.4.1	图像融合框架	127

4.4.2	图像融合规则	128
4.4.3	仿真验证	130
4.5	基于复剪切波域结合向导滤波与模糊逻辑的红外与可见光图像融合算法	133
4.5.1	融合规则	133
4.5.2	仿真验证	134
4.6	本章小结	137
第 5 章	医学图像融合	138
5.1	医学图像特点	138
5.2	基于 NSST 和高斯混合模型的医学彩色图像融合算法	140
5.2.1	HIS 模型	140
5.2.2	高斯混合模型	142
5.2.3	图像融合框架	143
5.2.4	图像融合规则	144
5.2.5	实验结果对比与分析	146
5.3	基于非下采样复小波变换的医学图像融合算法	149
5.3.1	非下采样复小波变换的基本理论	150
5.3.2	图像融合步骤	152
5.3.3	实验结果与分析	153
5.4	基于 NSST 变换和 Smoothlet 的医学图像融合算法	157
5.4.1	图像融合框架	157
5.4.2	融合规则	159
5.4.3	仿真实验和结果分析	160
5.5	Shearlet 变换和稀疏表示相结合的甲状腺图像融合算法	161
5.5.1	图像的稀疏表示	162
5.5.2	图像融合算法	164
5.5.3	实验结果与分析	166
5.6	基于加权核范数最小化的医学图像融合算法	170
5.6.1	加权核范数最小化理论	171
5.6.2	图像自相似性	172
5.6.3	融合框架	173
5.6.4	实验结果分析	175
5.7	基于改进拉普拉斯能量的医学图像融合算法	179
5.7.1	改进的拉普拉斯能量和	180
5.7.2	融合算法	182
5.7.3	实验结果与分析	182
5.8	基于改进 PCNN 的非下采样剪切波域医学图像融合算法	188
5.8.1	稀疏编码与字典设计方法	188
5.8.2	基于稀疏表示的低频图像融合	192
5.8.3	滑动窗口尺寸对融合结果的影响	195
5.8.4	滑动步长对融合结果的影响	196

5.8.5	基于改进 PCNN 的高频医学图像融合	197
5.8.6	不同的 PCNN 输入项对融合结果的影响	199
5.8.7	不同的 PCNN 链接强度对融合结果的影响	200
5.8.8	整体融合算法	202
5.8.9	实验结果与分析	203
5.9	本章小结	212
第 6 章	基于仿生算法的医学图像融合	213
6.1	仿生优化算法概述	214
6.1.1	粒子群算法	214
6.1.2	蚁群算法	215
6.1.3	人工鱼群算法	216
6.2	基于人工鱼群算法优化的多尺度域图像融合算法	218
6.2.1	融合规则与具体算法步骤	218
6.2.2	实验结果分析	221
6.3	结合 Shearlet 变换和果蝇优化算法的甲状腺图像融合算法	226
6.3.1	融合规则	227
6.3.2	实验结果分析	229
6.4	本章小结	233
第 7 章	遥感图像融合	234
7.1	传统的高分辨率遥感图像融合算法及比较	234
7.1.1	4 种传统融合算法的原理和分析	234
7.1.2	算法应用和比较	236
7.2	基于复剪切波域的遥感图像融合算法	238
7.2.1	复剪切波	239
7.2.2	融合规则	241
7.2.3	实验结果与分析	243
7.3	本章小结	252
第 8 章	数字图像融合发展趋势	253
8.1	数字图像融合发展及应用	253
8.2	数字图像融合研究的展望	255
	参考文献	256

第1章 图像融合简介

图像融合作为信息融合的一个分支,是当前信息融合研究中的一个热点。图像融合的数据形式包含明暗、色彩、温度、距离及其他景物特征的图像。这些图像可以以矩阵形式给出。而图像融合是将两张或两张以上的图像信息融合到一张图像上,使融合的图像含有更多的信息,能够更方便人们观察或者进行计算机处理。图像融合技术已经被广泛地应用到民用和军事方面。

1.1 研究背景及意义

随着信息技术的高速发展,人们对图像数据的采集提出的要求与日俱增。目前已经研制出了用于获取高质量图像的各种先进的传感器设备,但每一种传感器设备都针对一定的目标,有其功能上的局限性。即单一传感器设备只能获取部分场景信息,实用性低、可靠性差。为了获取更为全面和准确的场景图像描述,克服单一传感器图像的局限性和差异性,图像融合技术应运而生,并迅速成为国内外学者研究的热点。

图像融合是多源信息融合的一个重要分支。从信息论的角度来说,对信源的处理体现在对图像的处理上,那么图像融合就是把两幅或者多幅不同的图像信息融合成一个有利于后续处理的信息源的过程,后续的编码处理和传输均取决于其应用背景。图像融合实际是同一目标场景下,不同传感器所获得的带有一定互补性信息的综合处理过程。文献中给出的图像融合的定义是:图像融合是将源自同一场景的两幅或者多幅图像合并成一幅图像的过程。融合后的图像含有更加丰富的信息,更适合人类的视觉感官或计算机后期处理。从信息论的角度来说,图像融合的目的其实就是减少信息的不确定性,剔除冗余的信息,综合利用互补信息,最终形成一幅图像信息完善且有效的融合图像。

图像融合技术作为一个涵盖了传感器技术、信号处理技术、计算机技术和人工智能等多种学科的综合技术,近年来在医学、军事、遥感及气象预报等多个领域都得到了广泛的应用。因此,本书将针对图像融合的方法,进行详细讲解。

1.2 国内外研究现状

图像融合最早出现于人们的视线是在1985年LANDSAT-TM图像和SPOT雷达图像

的融合。20世纪80年代初,图像融合技术的研究呈现升温趋势,逐渐广泛地应用到多源图像融合领域,其中包括医学图像融合、红外与可见光图像融合和多聚焦图像融合等领域。

20世纪80年代以后,图像融合技术的研究进入高潮阶段,各国学者纷纷提出了各式各样的融合方法。图像融合由低到高可分为三个层次:像素级融合、特征级融合和决策级融合。我们通常将像素级融合方法分为空间域算法和变换域算法。传统的空间域融合算法主要有灰度加权平均法和主成份分析法(Principal Component Analysis, PCA)等。1983年, P. J. Burt 提出了基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法,这是最早的基于变换域的图像融合算法。随后, A. Toet 又分别提出了基于比率低通金字塔变换、对比度金字塔变换和形态学金字塔变换的图像融合算法。

20世纪90年代初,小波变换技术被广泛地应用于图像融合处理,克服了基于金字塔变换的图像融合方法产生大量冗余数据等缺点。20世纪90年代中期, Sweldens 等学者提出了提升小波变换。对比传统的小波变换,提升小波变换的运算全部在空间域上进行,而且速度快,因此也被引入到图像融合领域。与基于金字塔变换的图像融合算法相比,基于小波变换的图像融合算法的融合效果得到了提升。

虽然小波变换兼具多分辨与时频局域化的优良特性,但是传统小波变换只具有点奇异性,而且只能捕获有限的方向信息,不能有效反映丰富的方向纹理和高维奇异性信息。为了克服传统小波变换的弊端,多尺度几何变换应运而生。它可以最优地表示一些高维函数的奇异性,因此被广泛地应用到信号处理与图像处理领域。迄今为止,多尺度几何变换包括:1997年 Meyer 和 Coifman 提出的 Brushlet(梳状波变换)和 Dohono 提出的 Wedgelet(楔形波变换)、1998年 Candes 提出的 Ridgelet(脊波变换)、1999年 Candes 和 Dohono 提出的 Curvelet(曲波变换)、2000年 Pennec 和 Mallat 提出的 Bandlet(条带波变换)、2001年 Huo 提出的 Beamlet(子束波变换)、2002年 Do 和 Vetterli 提出的 Contourlet(轮廓波变换)、2004年 Velisavljevic 提出的 Directionlet(方向波变换)、2005年 Guo 和 Labate 提出的 Shearlet(剪切波变换)、2006年 Lu 和 Do 提出的 SFLCT(Sharp Frequency Localization Contourlet Transform, 尖锐频率局部化轮廓波变换)和 Cunha 提出的 NSCT(Non-Subsampled Contourlet Transform, 非下采样轮廓波变换)、2010年 Lim 提出的 NSST(Non-Subsampled Shearlet Transform, 非下采样剪切波变换)等。

近年来,国内外相关领域的学者们将多尺度几何变换应用到了图像融合领域中。2007年, Nencini F. 等人将 Curvelet 变换应用到遥感图像融合中,融合效果优于基于小波变换的图像融合算法。刘盛鹏等人提出了一种基于 Contourlet 变换和改进的脉冲耦合神经网络(Improved Pulse Coupled Neural Network, IPCNN)的红外与可见光图像融合算法,该算法获得了很好的视觉效果。屈小波等人提出了一种基于 SFLCT 变换和改进拉普拉斯能量和的多聚焦图像融合算法,融合效果优于基于 Contourlet 变换的图像融合算法,但融合图像引入了“伪影”。也有学者提出了一种基于 NSCT 的多聚焦图像融合算法,以及一种基于 NSCT 和空间频率激励脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)的图像融合算法,融合效果优于基于 Contourlet 变换和 SFLCT 变换的图像融合算法,但算法运

行时间长。王朝辉等人提出了一种基于 Shearlet 变换和 PCNN 的图像融合算法,融合效果优于基于 NSCT 变换的图像融合算法,但融合图像同样引入了“伪影”。高国荣等人提出了一种基于 NSST 变换的红外与可见光图像融合算法,融合效果优于基于 Shearlet 变换的图像融合算法。上述图像融合算法的提出,部分地验证了多尺度几何变换不仅能够继承小波分析的优良特性,还能克服小波变换的缺点,从而对图像进行更优的描述。然而总体来说,多尺度几何变换理论还处于初步阶段,其在图像融合领域的应用仍需进一步研究与扩展。

最近一段时间,随着低秩矩阵理论和机器学习算法的持续发展,基于该理论的图像融合算法也开始崭露头角,并且取得了很好的效果,本书中将对这些算法进行逐一介绍,希望能够给读者带来新的启发,以帮助读者掌握相关的技术前沿知识。

1.3 图像融合基础知识

随着信息与智能技术的发展,数字图像处理技术越来越重要。而随着我国互联网+策略和智能制造的持续推进,数字图像融合技术将会被广泛地应用到各个领域。下面对数字图像融合的基础知识进行简单介绍。

1.3.1 图像融合层次

一般来说,图像融合由低到高分为3个层次:像素级、特征级和决策级。本书的研究主要集中体现在像素级数字图像融合上。

1. 像素级图像融合

像素级图像融合的基本过程是:首先对图像进行预处理,然后将预处理后的图像像素信息直接进行综合分析从而融合。该融合方法对多源图像中目标和背景等信息直接进行融合处理,能够保持尽可能多的现场数据,提供尽可能多的细节信息。但是像素级图像融合对设备的要求较高,并且需处理大量的数据。如图 1-1 所示为像素级图像融合的基本结构。

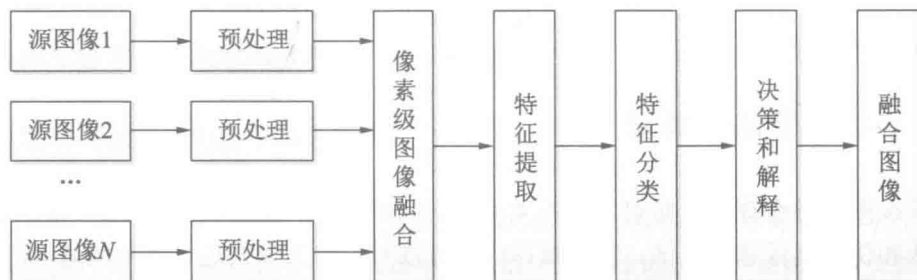


图 1-1 像素级图像融合基本结构

2. 特征级图像融合

特征级图像融合的基本过程是：首先对图像进行预处理，然后将预处理后的图像信息进行特征提取，最后对图像特征信息进行综合分析从而进行融合。特征级图像融合方法可以压缩信息从而使其具有良好的实时性，同时能够保留适量的重要信息，但是该方法损失的信息较多。如图 1-2 所示为特征级图像融合的基本结构。

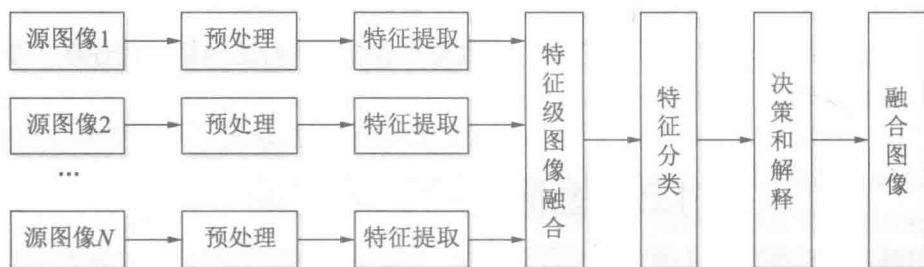


图 1-2 特征级图像融合基本结构

3. 决策级图像融合

决策级图像融合的基本过程是：首先对图像进行预处理，然后对预处理后的图像信息进行特征提取和特征分类，最后根据一定的准则对分类后的图像特征信息进行融合。该方法实时性良好，而且容错能力较高，但由于需要大量的决策系统，代价最大、损失的信息最多。如图 1-3 所示为决策级图像融合的基本结构。

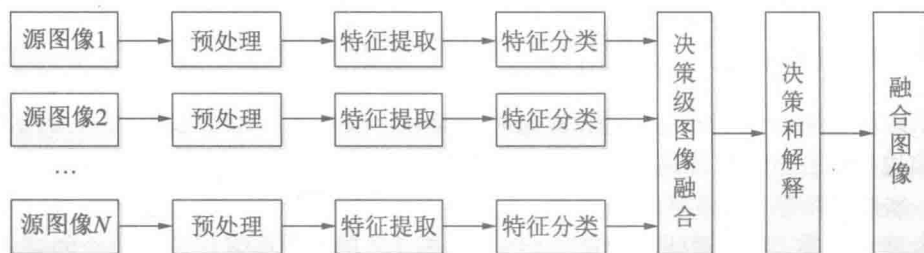


图 1-3 决策级图像融合基本结构

1.3.2 传统图像融合算法

像素级图像融合算法通常可以分为 4 类：空间域算法、变换域算法、基于低秩矩阵的融合算法和仿生图像融合算法。空间域算法是直接对图像的像素进行简单的处理，而变换域算法则是针对于多尺度变换的变换系数进行处理的方式，基于低秩矩阵的图像融合算法主要通过对图像的低秩矩阵特征进行融合，再利用低秩恢复算法得到最终的融合图像，而

基于仿生算法的图像融合算法则利用仿生算法进行图像融合，如蚁群算法和神经网络等。

1. 空间域算法

常用的空间域算法包括加权平均法和 PCA 方法等。

(1) 加权平均法

加权平均法是对多幅图像的对应像素点进行加权处理，在计算中可表示为：

$$F(i, j) = \sum_{k=1}^n \alpha_k f_k(i, j) \quad (1-1)$$

其中， α_k 为第 k 幅图像对应的权值，且 $\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$ ， F 为融合后的图像， $f_k (k=1, 2, \dots, n)$ 为待融合的源图像。

(2) PCA 方法

PCA 是一种图像变换方法。它将图像用 3 个主成分分量来表示，各个主成分之间的分量是互不相关、独立的。在图像融合处理过程中主要对第一主成分分量进行融合，因为第一主成分分量包含了图像的主要信息，即

$$F(i, j) = \sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} f_k(i, j) \quad (1-2)$$

其中， λ_k 为第 k 幅图像对应的第一主成分分量， F 为融合后的图像， $f_k (k=1, 2, \dots, n)$ 为待融合的源图像。

2. 变换域算法

变换域算法是先对源图像进行图像变换，然后再对变换域系数进行融合，得到融合图像的变换系数，最后再进行逆变换重构融合图像。目前基于变换域的图像融合算法是各国学者的研究热点。本书介绍的图像融合算法也是基于变换域的图像融合算法。常用的基于变换域的图像融合算法有基于金字塔变换、基于小波变换及基于多尺度几何变换的图像融合算法。

(1) 基于金字塔变换的图像融合算法

基于金字塔变换的图像融合算法即将每幅待融合的源图像进行金字塔变换，并在所有图像的金字塔的对应层上，采用一定的融合规则对金字塔系数进行融合得到融合后的金字塔系数，然后将融合后的金字塔系数进行金字塔生成的逆过程重构得到融合图像。

(2) 基于小波变换的图像融合算法

在金字塔变换中，除了梯度金字塔变换具有方向性外，其余的金字塔变换均无方向性。随着小波变换理论的兴起和完善，尤其是小波离散快速算法的出现，使得小波变换在图像处理领域得到了广泛的应用，也因此出现了大量的基于小波变换的图像融合算法。与传统的基于金字塔变换的图像融合算法相比，基于小波变换的图像融合算法融合效果有所提升。

(3) 基于多尺度几何变换的图像融合算法

尽管小波变换能够对图像进行多尺度多方向分解,但是只能得到水平、垂直和对角线三个方向的分解系数,这非常不利于图像的细节描述。为了克服小波变换的缺陷,一种新的高维函数的最优表示方法——多尺度几何变换应运而生。常用的多尺度几何变换包括 Curvelet、Contourlet、NSCT、Shearlet 和 NSST 等。多尺度几何变换既具有优于小波变换的特性,又能够更好地检测图像的奇异性。因此,基于多尺度几何变换的图像融合算法得到了更广泛的应用。

3. 基于低秩矩阵的融合算法

图像融合通过合并多个传感数据中聚焦良好的清晰部分来提供更可靠、更精确的信息,主要应用于机器视觉、数码相机、目标识别等领域。虽然各国学者已经提出了大量的图像融合算法,但是大部分的融合算法都没有涉及图像的低秩性,并且这些算法常常导致融合图像出现失真或信息丢失。为了克服这一缺点,有学者采用加权核范数最小化方法结合图像自相似性来实现多聚焦图像融合。该方法首先对源图像分块,并通过块匹配搜索源图像的非局部相似块。其次将这些相似块堆叠成一组,对每个参考块都进行上述操作,从而形成一个块组矩阵。然后由图像自相似性获得源图像的共享相似块,并对共享相似块中的块组进行奇异值分解,通过奇异值取大进行图像融合。最后进行低秩矩阵的恢复算法得到最优解,将矩阵按照堆叠顺序进行复位,从而得到最终的融合图像。实验结果表明,此算法在主观视觉效果和客观评价指标上优于其他算法。

4. 仿生融合算法

自然界的群体为了生存,通常具有难以想象的智慧,如蚂蚁的觅食、鱼群的迁移、蜂群的采花酿蜜、人类学习的能力等。这些机制带动了新的信息处理手段的突破,从而创造了更多的信息处理方法,包括蚁群算法、鱼群算法、蜂群算法和深度学习等理论。这些理论以前因受到计算时间的限制,而不能得到很好的推广。随着分布式计算和大数据计算时代的到来,算法运行的时间被大大降低,从而给这些算法的广泛应用带来了希望。本书主要介绍了几种基于上述算法的图像融合算法,以拓展读者的知识面。

1.3.3 图像融合存在的问题

图像融合技术作为一个涵盖了多种学科的综合技术,近年来在多个领域都得到了广泛的应用。图像融合的研究受到了国内外学者的广泛关注,但是仍有许多问题亟待更深入地研究。

1. 图像配准方法的研究

图像配准是图像融合的前提,配准的精度直接影响了融合图像的质量,但目前不存在

一种配准方法能适用于各种图像，因此图像配准问题还需要进一步的研究。

2. 普适性融合算法的研究

现有的图像融合算法都只是针对某一特定图像，缺乏普适性。如何提出一种普适性的融合算法是研究的关键点之一。

3. 融合图像评价方法的研究

人们通常根据视觉感受来评价融合图像的质量，评价结论受主观因素影响较大，因此提出一种有效的量化评价方法是进一步的研究内容之一。

4. 彩色图像融合算法的研究

现有的融合算法绝大多数是针对灰度图像的融合算法，但是现实生活中得到的图像多数是彩色的。灰度图像的融合算法不能照搬到彩色图像融合中，因此彩色图像融合算法有待进一步的研究。

1.4 图像融合评价标准

图像融合处理的目的是改善图像质量和增加融合图像的信息量，为人类的决策提供更有效的信息。但是由于人类视觉的主观性和系统的复杂性，迄今为止，还没有一种评价方法能适用于所有的融合算法。目前图像融合的评价标准主要分为两种：主观评价标准和客观评价标准。下面将分别介绍这两种评价标准。

1.4.1 主观评价标准

图像融合的主观评价标准可以分为相对评价和绝对评价两种。相对评价即为观察者参照参考图像对融合图像进行评价；绝对评价为观察者根据一些给定的评价标准或自己的经验对融合图像进行评价。国际上通用的是5分制的主观评价方法，如表1-1所示。

表 1-1 图像融合效果主观评价尺度评分表

分 值	质 量 尺 度	妨 碍 尺 度
5分	非常好	丝毫看不出图像质量变化
4分	好	能看出图像质量变化但不妨碍观看
3分	一般	能清楚地看出图像质量变化，对观看稍有妨碍
2分	差	对观看有妨碍
1分	非常差	非常严重的妨碍观看

从表1-1来看，主观评价具有简单直观的特点，然而融合图像的主观评价容易受到人的