

■ 国家科学技术学术著作出版基金资助 ■

多传感器图像融合 技术及应用

Technology and Application of Multisensor Image Fusion

苗启广 叶传奇 汤 磊 李伟生 著

多传感器图像融合技术及应用

Technology and Application of
Multi-Sensor Image Fusion

苗启广 叶传奇 著
汤 磊 李伟生



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以图像融合技术的发展历程为主线,系统介绍了图像融合的基本概念、融合原理、融合方法、最新研究进展及应用实例。

全书共 11 章。第 1~3 章介绍了图像融合的研究现状及存在的问题、图像融合的预处理方法、源图像的成像特性及图像融合的性能评价;第 4~9 章系统介绍了各种图像融合方法,其中包括早期各种简单的图像融合方法、基于金字塔变换的图像融合方法、基于小波变换的图像融合方法、基于多小波变换的图像融合方法、基于无下采样 Contourlet 变换的图像融合方法以及基于 Shearlet 变换的图像融合方法等;第 10 章结合图像融合的具体应用实例介绍了图像融合的应用;第 11 章对图像融合技术研究的最新进展进行了介绍。本书着重介绍图像融合技术中最基本和最成熟的方面,并在一定程度上反映了国内外学者的当前工作。

本书可作为高等院校高年级本科生、研究生学习图像融合技术的教材和教学参考书,也可作为从事图像融合研究和应用的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多传感器图像融合技术及应用/苗启广等著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2014. 4

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3277 - 3

I. ①多… II. ①苗… III. ①传感器—图像处理 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 050652 号

策划编辑 臧延新

责任编辑 阎 彬 臧延新

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 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.5

字 数 362 千字

印 数 1~2000 册

定 价 35.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3277 - 3/TP

XDUP 3569001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

图像融合是信息融合的一个重要分支,也是图像理解和计算机视觉中的一项重要技术。它将多个图像传感器或同一图像传感器以不同工作模式获取的关于同一场景的图像信息加以综合,以获得新的关于此场景更准确的描述,也为进一步的图像处理,如图像分割、目标检测与识别、战损评估与理解等提供更有效的信息。图像融合是一个综合了传感器、信号处理、图像处理、计算机和人工智能等多种学科的新兴研究领域。

20 世纪 90 年代以来,图像融合技术的研究成果呈不断上升的趋势,应用的领域也遍及遥感、军事、机器人视觉、医学成像与诊断、危险物品检测及智能交通等,产生了显著的经济、社会及军事效益,并日益为众多学者所关注。同时,在制造业、医学、交通管理及航空管制等方面,图像融合技术也有着巨大的应用潜力。随着研究的不断深入,图像融合技术必将会得到更为广泛的应用。

近二十年来,国内外学者在图像融合领域取得了丰硕的研究成果,涌现出大量的研究文献。但系统介绍图像融合理论、方法和应用的书籍非常少,使许多初学者感到入门困难,这一现象不利于推动图像融合研究和应用的进一步深入和普及。有鉴于此,我们在多年从事图像融合研究的基础上,集合国内外学者的有关研究成果编著成此书。

本书以图像融合技术的发展历程为主线,系统、精练地介绍了图像融合中成熟的融合理论和经典的融合方法;针对各种融合方法进行了大量的理论分析和融合实验,并对融合效果做了主、客观性能评价分析;最后介绍了图像融合技术的最新研究进展及应用实例。

全书共 11 章。第 1~3 章介绍了图像融合的研究现状及存在问题、图像融合的预处理方法、源图像的成像特性及图像融合的性能评价;第 4~9 章系统介绍了各种图像融合方法,其中包括早期各种简单的图像融合方法、基于金字塔变换的图像融合方法、基于小波变换的图像融合方法、基于多小波变换的图像融合方法、基于无下采样 Contourlet 变换的图像融合方法以及基于 Shearlet 变换的图像融合方法等;第 10 章结合图像融合的具体应用实例介绍了图像融合的应用;第 11 章对图像融合技术研究的最新进展进行了介绍。本书着重介绍了图像融合技术中最基本和最成熟的方面,并在一定程度上反映了国内外学者的当前工作。

借此书出版之际,作者衷心感谢西安电子科技大学计算机学院王宝树教授、中国电子科技集团第 28 研究所赵宗贵研究员,因为本书中所有多传感器图像融合技术研究工作的开展,都是在他们的指导和帮助下完成的。本书作者的有关研究得到了国家自然科学基金项目(60702063、61272280)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0919)和中央高校基本科研业务费专项资金重点项目(K5051203020)的资助,尤其是在书稿定稿之际获得了 2012 年度国家科学技术学术著作出版基金的立项资助,在此特向科技部、国家自然科学基金委员会等单位表示感谢!

全书由苗启广主编,第 5、6、7、9 章由苗启广编写,第 1、8 章由叶传奇编写,第 3、10 章由汤磊编写,第 2、4 章由李伟生编写,第 11 章由全体作者共同编写。博士生刘如意和硕

士生杨眉、楼晶晶等参与了本书内容的讨论和书稿的整理、撰写和校阅等工作。

书中引用了一些其他学者的论著及其研究成果，特别是西北工业大学自动化学院李晖副教授给予了很大的帮助，这对于本书的编写是非常重要的，我们在此向他们表示衷心的感谢！

本书可作为高等院校高年级本科生、研究生学习图像融合技术的教材和教学参考书，也可作为从事图像融合研究和应用的科技人员的参考书。本书内容对于开展进一步的图像融合研究工作以及图像融合技术工程应用均有重要意义。

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 10 月 28 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 图像融合的基本概念	1
1.2 图像融合技术的发展与研究现状	2
1.3 图像融合的分类	3
1.3.1 按融合层次分类	4
1.3.2 按融合方法分类	5
1.3.3 按图像源分类	9
1.4 图像融合的研究热点及存在的问题	10
参考文献	11
第 2 章 图像融合预处理	16
2.1 引言	16
2.2 图像增强	16
2.2.1 空间域增强	16
2.2.2 频率域增强	21
2.2.3 彩色增强	22
2.2.4 多光谱增强	23
2.3 图像校正	25
2.3.1 多项式几何校正	26
2.3.2 基于薄板样条的表面拟合校正	27
2.3.3 三角网法几何校正	28
2.4 图像去噪	28
2.4.1 邻域平均法	28
2.4.2 中值滤波	29
2.4.3 高斯滤波	29
2.5 图像配准	29
2.5.1 图像配准的数学模型	30
2.5.2 图像变换	31
2.5.3 基于灰度信息的图像配准	32
2.5.4 基于变换域的图像配准	34
2.5.5 基于特征信息的图像配准	35
2.6 图像重采样	38

2.7 本章小结	41
参考文献	42
第3章 图像成像特性和图像融合性能评价	44
3.1 引言	44
3.2 各种图像成像特性分析	44
3.2.1 多聚焦可见光图像成像特性	44
3.2.2 红外图像成像特性	46
3.2.3 SAR 图像成像特性	47
3.2.4 遥感传感器及其成像特性	48
3.2.5 医学图像成像特性	49
3.2.6 毫米波图像成像特性	50
3.3 图像融合性能评价	52
3.3.1 图像质量的主观评价	52
3.3.2 融合图像质量的客观评价	53
3.4 本章小结	58
参考文献	58
第4章 简单的图像融合方法	60
4.1 引言	60
4.2 基于数学/统计学的图像融合	60
4.2.1 加权平均融合	60
4.2.2 基于 PCA 变换的图像融合	61
4.2.3 基于非负矩阵分解的图像融合	63
4.3 基于颜色空间的图像融合	65
4.3.1 颜色空间基本理论	65
4.3.2 基于 RGB 空间的图像融合	65
4.3.3 基于 IHS 空间的图像融合	66
4.3.4 基于 Brovey 变换的图像融合	68
4.4 其他一些简单的图像融合方法	68
4.4.1 常用的基于空间域的图像融合	68
4.4.2 常用的基于变换域的图像融合	69
4.5 本章小结	69
参考文献	69
第5章 基于金字塔变换的图像融合方法	71
5.1 引言	71
5.2 拉普拉斯金字塔变换	71
5.3 比率低通金字塔变换	77
5.4 对比度金字塔变换	78
5.5 梯度金字塔变换	79
5.6 基于金字塔变换的图像融合方法	81

5.6.1 基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合方法	81
5.6.2 基于比率低通金字塔变换的图像融合方法	85
5.6.3 基于对比度金字塔变换的图像融合方法	86
5.6.4 基于梯度金字塔变换的图像融合方法	87
5.7 实验结果与分析	89
5.7.1 多聚焦图像融合实验	89
5.7.2 曝光不同的可见光图像融合实验	91
5.7.3 红外与可见光图像融合实验	92
5.7.4 CT 与 MRI 图像融合实验	94
5.8 本章小结	95
参考文献	96
第 6 章 基于小波变换的图像融合方法	98
6.1 引言	98
6.2 小波变换基本理论	98
6.2.1 小波变换的概念	98
6.2.2 多分辨率分析与 Mallat 算法	99
6.2.3 图像的二维离散小波变换	100
6.3 多小波变换	101
6.3.1 多小波的多分辨率分析	101
6.3.2 正交离散多小波变换	102
6.3.3 二维图像的多小波分解与重构	103
6.4 提升小波变换	106
6.4.1 提升小波分解	106
6.4.2 提升小波重构	107
6.4.3 9/7 滤波器的提升实现	107
6.4.4 图像的提升小波分解算法	108
6.5 冗余小波变换	108
6.5.1 à trous 算法	108
6.5.2 图像在冗余小波变换域的数据特征	108
6.6 基于小波变换的图像融合	109
6.6.1 基于冗余小波变换的灰度多聚焦图像融合	109
6.6.2 实验结果与分析	112
6.7 本章小结	115
参考文献	115
第 7 章 基于多小波变换的图像融合方法	118
7.1 引言	118
7.2 多小波的基本理论	119
7.2.1 多小波的多分辨率分析	119
7.2.2 多小波的分解和重构	119

7.2.3 多小波的性质	121
7.3 多小波的构造方法和滤波器设计	121
7.3.1 多小波构造方法	121
7.3.2 多小波滤波器的设计	124
7.4 基于多小波变换的图像融合算法的一般过程	129
7.4.1 多小波的选择	129
7.4.2 多小波图像融合规则	130
7.4.3 基于多小波变换的图像融合算法的一般过程	132
7.5 实验结果与分析	132
7.5.1 基于多小波变换的融合结果与分析	132
7.5.2 传统融合方法和多小波变换的融合结果与分析	135
7.5.3 基于小波变换和多小波变换的融合结果与分析	137
7.6 本章小结	139
参考文献	139
第8章 基于无下采样 Contourlet 变换的图像融合方法	141
8.1 引言	141
8.2 Contourlet 变换基本理论	142
8.2.1 Laplace 金字塔分解	142
8.2.2 方向滤波器组	143
8.2.3 Contourlet 变换及其性质	145
8.3 基于 Contourlet 变换的图像融合	148
8.3.1 基于 Contourlet 变换的图像融合框架	148
8.3.2 实验结果与分析	149
8.4 Wavelet-based Contourlet 变换基本理论	152
8.4.1 WBCT 结构分析	152
8.4.2 WBCT 系数分析	154
8.5 基于 Wavelet-based Contourlet 变换的图像融合	155
8.5.1 基于 Wavelet-based Contourlet 变换的图像融合框架	155
8.5.2 基于 Wavelet-based Contourlet 变换的图像融合方法	156
8.5.3 实验结果与分析	157
8.6 无下采样 Contourlet 变换基本理论	162
8.6.1 无下采样 Contourlet 变换的结构	162
8.6.2 无下采样 Contourlet 变换中滤波器组的设计	165
8.6.3 无下采样 Contourlet 变换系数分析	167
8.7 基于无下采样 Contourlet 变换的图像融合	168
8.7.1 基于成像特性的 NSCT 域红外与可见光图像融合	169
8.7.2 基于区域分割和 NSCT 域的红外与可见光图像融合	172
8.7.3 基于区域相关度的 NSCT 域多光谱与全色图像融合	180
8.8 本章小结	186

参考文献	187
第 9 章 基于 Shearlet 变换的图像融合方法	190
9.1 引言	190
9.2 Shearlet 变换基本理论	191
9.2.1 离散 Shearlet 变换	193
9.2.2 频域实现	194
9.2.3 时域实现	195
9.3 基于 Shearlet 变换的多聚焦图像融合	197
9.3.1 基于 Shearlet 变换的图像融合框架	197
9.3.2 实验结果与分析	199
9.4 基于 Shearlet 和 PCNN 的遥感图像融合	203
9.4.1 脉冲耦合神经网络(PCNN)工作原理及特性	203
9.4.2 基于 Shearlet 和 PCNN 的图像融合框架	204
9.4.3 实验结果与分析	206
9.5 基于 Shearlet 的多光谱和全色图像融合	210
9.5.1 基于 Shearlet 变换的多光谱和全色图像融合框架	210
9.5.2 实验结果与分析	212
9.6 本章小结	215
参考文献	216
第 10 章 图像融合应用	219
10.1 引言	219
10.2 军事应用概述	219
10.3 军事应用实例	220
10.3.1 弱小目标增强基本理论	221
10.3.2 基于图像融合的红外弱小目标增强算法	222
10.3.3 仿真实验结果与分析	224
10.4 本章小结	227
参考文献	227
第 11 章 图像融合研究新进展	229
11.1 引言	229
11.2 图像融合系统和产品	229
11.3 图像融合技术	231
11.4 本章小结	235
参考文献	236

第1章 绪 论

1.1 图像融合的基本概念

随着传感器技术的飞速发展,越来越多的传感器应用于各领域中。传感器数量的不断增加使得系统获得的信息量急剧增加且呈现多样性和复杂性,传统的信息处理方法已经不能满足新的需求,迫切需要发展新的方法和技术来解决人们所面临的新问题。多传感器信息融合(Multi-Sensor Information Fusion, MSIF)就是为满足这一需求而发展起来的一种新方法。所谓信息融合,是指对来自多个传感器的信息进行多级别、多方面、多层次的处理与综合,从而获得更丰富、更精确、更可靠的有用信息。Llinas 和 Edward^[1]从军事应用的角度对信息融合给出了如下定义:信息融合就是一种多层次、多方面的处理过程,这个过程对多源信息进行检测、结合、相关、估计和组合,以达到精确的状态、身份估计以及完整、及时的态势和威胁估计。国际信息融合协会(International Society of Information Fusion, ISIF)给出了信息融合的一种更为广泛的定义^[2]:信息融合包括用于对获取的多源数据(传感器、数据库、人为搜集等)进行合成处理的理论、技术和工具,信息融合后的决策或行动在某种意义上(质或量上,比如准确性、冗余度等)要好于基于任何单一信息源所得到的结果。一般来讲,来自多个传感器信号所提供的信息具有冗余性和互补性,通过信息融合可以最大限度地获取对目标和场景的完整信息描述。

20 世纪 70 年代后期,随着图像传感器的出现与发展,多传感器信息融合出现了一个重要分支——图像融合(Image Fusion, IF)。图像融合是信息融合范畴内一个以图像为对象的研究领域。它将多个图像传感器或同一图像传感器以不同工作模式获取的关于同一场景的图像信息加以综合,以获得新的关于此场景更准确的描述^[3]。图像融合是一个综合了传感器、信号处理、图像处理、计算机和人工智能等多种学科的新兴研究领域。尽管人们已经研制出了能获取高质量图像的各种传感器,如可见光电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD),前视红外、激光成像雷达,合成孔径雷达等,但它们的性能极大地依赖于使用环境,任何一个独立的图像传感器都有其功能上的局限性,例如在亮度、降雨等条件下,有些传感器的性能可能会下降。不同图像传感器或同种图像传感器以不同工作模式获得的图像信息之间存在着冗余性和互补性,通过对多源图像进行融合,可以获得对某一场景更为全面和准确的图像描述,从而克服单一传感器图像在几何、光谱和空间分辨率等方面存在的局限性和差异性,提高图像的清晰度和可理解性^[4, 5],并为进一步的图像处理,如图像分割、目标检测与识别、战损评估与理解等提供更有用的信息^[4, 6-8]。

总体而言,多源图像融合可以从以下几个方面提高传感器系统的性能^[9]:

(1) 扩展系统覆盖范围,能够更准确地获得被测对象或环境的信息,并且具有比任何

单一传感器更高的精度与可靠性。

(2) 通过各传感器的互补, 获得更为全面、丰富的信息, 更有利于对图像的进一步分析处理。

(3) 提高了系统可靠性与鲁棒性, 因为数据是从多个(种)传感器得到的, 当一个或多个传感器失效或出现错误时, 系统仍能继续工作。

上述诸多方面的优点使得图像融合在医学、遥感、计算机视觉、气象预报、军事目标的检测与识别等方面的应用潜力得到了认可, 在航天、航空多种运载平台上, 各种遥感器所获得的大量不同光谱、不同波段或不同时相、不同角度的遥感图像的融合, 为信息的高效提取提供了良好的处理手段^[7, 8, 10-13], 并取得了明显的效益。

1.2 图像融合技术的发展与研究现状

1979 年, Daily 等人^[14]首先把雷达图像和 Landsat-MSS 图像的复合图像应用于地质解释。1981 年, Laner 和 Todd^[15]进行了 Landsat-RBV 和 MSS 图像数据的融合试验。1985 年, Cliche 和 Bonn^[16]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。上述图像融合所采用的融合算法主要有 IHS 变换、加权平均、差分及比率、PCA 变换、高通滤波等。这些算法都是在空间域对图像进行融合处理的, 对参加融合图像不进行分解变换, 融合处理只在一个层次上进行, 可以认为是早期简单的图像融合尝试。

20 世纪 80 年代中期, 专家和学者开始尝试将源图像进行多尺度分解融合。1984 年, Burt P. J.^[17]首次提出了基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法。其融合的主要思想是: 在不同的尺度上提取图像中的边缘、纹理等显著信息, 然后制定一些规则对这些信息进行融合, 最后经逆变换得到融合图像。基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法能够提取源图像数据的多尺度特征, 取得了较好的融合效果。

1995 年, Li H. 等人^[18]将基于对比度金字塔变换的图像融合算法应用于合成孔径雷达和前视红外图像融合。2000 年 5 月, 美国波音公司航空电子飞行实验室成功地演示并验证了联合攻击机航空电子综合系统的多源信息融合技术和功能。该综合系统中的合成孔径雷达和前视红红外子系统, 就是采用基于对比度金字塔变换的图像融合算法对多源图像进行融合处理的。其融合结果有助于快速确定目标位置并对目标进行识别。

20 世纪 90 年代中期, 小波变换开始应用到图像融合领域。1993 年, Ranchin T. 和 Wald L.^[19]首次提出了基于离散小波变换的图像融合算法, 并将其应用于遥感图像的融合处理。基于小波变换的融合算法基本思想与基于金字塔变换的融合算法一致, 即: 首先对源图像进行小波变换, 然后按照一定规则对变换系数进行合并, 最后对合并后的系数进行小波逆变换得到融合图像。小波变换具有良好的时频分析特性、方向性以及各尺度上的独立性, 可以获得比金字塔方法更好的融合效果。

2005 年, William F.^[20]将基于离散小波变换的图像融合算法应用于夜间驾驶系统。在该系统中, 采用了一种适用于高帧速率、基于离散 Haar 小波变换、计算简单的图像融合方法, 对红外图像和可见光图像进行融合处理, 其融合结果可以有效指导夜间行驶决策。

进入 2000 年以后, 图像融合的理论研究得到了迅速发展。通过对 EI Compendex Web

数据库检索发现,从1984年到1999年,图像融合方面的文章总共有大约2000余篇;而从2000年至今,图像融合文献数目已陡增到1万篇左右,而且呈现出逐年快速增长的趋势。由此可见国内外学术界对于图像融合技术的关注和重视与日俱增。

在图像融合理论研究迅速发展的同时,图像融合技术的应用也取得了长足的进步。在遥感图像分析领域,法国SPOT卫星、美国的IKONOS商用遥感卫星以及加拿大的合成孔径雷达卫星等的发射升空,为我们提供了大量的高分辨率全色图像、多光谱图像以及SAR图像。通过对高分辨率全色图像与多光谱图像的融合、SAR图像与多光谱图像的融合以及SAR图像与高分辨率全色图像的融合,可以对地物目标进行更佳的分析解释,并已产生了巨大的社会与经济效益。在军事领域,图像融合技术的应用受到高度重视并已取得相当的进展,美国国防部在不同时期制定的关键战术计划中,有相当一部分涉及图像融合方面。如在海湾战争中发挥良好作战性能的“LANTIAN”吊舱就是一种可将前视红外、激光测距、可见光摄像机等多种传感器信息叠加显示的图像融合系统。美国TI公司1995年底从美国夜视和电子传感器管理局(NVESD)获得将以DSP为核心的图像融合设计集成到先进直升机驾驶(AHP)传感器系统的合同。20世纪90年代,美国海军在SSN-691(孟菲斯)潜艇上安装了第一套图像融合样机,可使操纵手在最佳位置上直接观察到各传感器的全部图像^[8]。许多军事技术发展计划已经加大对图像融合研究的投入,包括英国的CONDOR2系统^[21](应用于直升机)、FIST系统^[22](应用于步兵)、FRES系统^[23](应用于地面车辆)和美国的MANTIS系统^[24](应用于头盔)等^[25]。美国计划在2010年研制出覆盖射频、可见光、红外波段公用孔径的有源/无源一体化的基于图像与数据融合的探测器系统。在医学发展方面,2001年11月25日至30日在美国芝加哥召开了每年一度的RSNA北美放射学会年会,在会议上GE公司医疗系统部展销了其产品Discovery LS。Discovery LS是GE公司于2001年6月推出的最新PET/CT,是世界上最好的PET(正电子发射断层扫描)与最高档的多排螺旋CT的一个完美结合,具有单体PET不能比拟的优势。

我国对图像融合技术的研究起步较晚,目前,许多高等院校和科研院所正在此领域进行一些相关研究,不少图像融合领域的书籍、论文相继涌现,如2007年10月出版的敬忠良等人的《图像融合——理论与应用》^[3]是国内关于图像融合理论最新、最全面的总结。近年来,国内对图像融合在应用方面也有了一定的发展,如我国研制的资源探测卫星上安装了自行研制的CCD相机和红外多光谱扫描仪,这两种航天遥感器之间可进行图像融合,大大扩展了卫星的遥感应用范围。四川大学研制的多航管雷达数据融合系统,其性能达到了世界领先水平,且已经实际运行在广州白云、深圳宝安、成都双流等多家航空港。中科院遥感应用研究所开发的图像数据融合软件系统,也已成功地应用在卫星地面站的图像分类与识别中。

1.3 图像融合的分类

图像融合的一般目的是提取源图像中的有用信息并注入到融合图像中,同时避免虚假信息引入。但对于不同的应用场合或不同的图像源,融合要求和融合目的并不完全相同,融合算法也不尽相同。下面从不同的角度对图像融合进行分类。

1.3.1 按融合层次分类

根据融合在处理流程中所处的阶段,按照信息抽象的程度,多传感器图像融合一般可以分为三个层次^[3, 26-28],即像素级图像融合、特征级图像融合和决策级图像融合。

1. 像素级图像融合

在像素级图像融合中,多个图像传感器得到的原始图像经过融合处理得到一幅新的图像。这是直接在原始数据层上进行的融合,即在各种传感器的原始数据未经预处理之前就进行数据的融合处理。像素级图像融合的结构如图 1.1 所示。

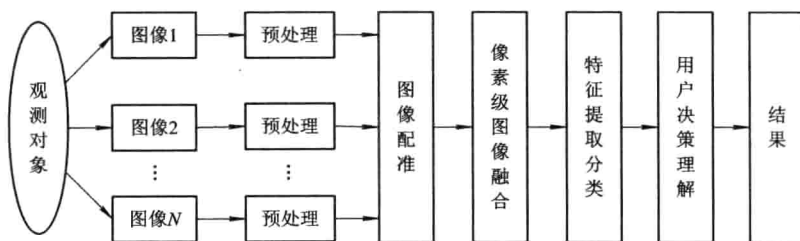


图 1.1 像素级图像融合

这种融合的主要优点是能够保持尽可能多的现场数据,提供其他融合层次所不能提供的更丰富、精确、可靠的信息,有利于对图像的进一步分析、处理与理解(如场景分析/监视、图像分割、特征提取、目标识别、图像恢复等)。像素级图像融合可以使得人们对图像的观察更为容易,更适合于计算机检测处理。

在进行像素级图像融合之前,必须对参与融合的各幅图像进行精确配准(本书所用参与融合的图像如无特别说明,均假设已经全部精确配准好),其配准精度一般应达到像素级,这也是像素级图像融合所存在的局限性。像素级图像融合处理的数据量大,处理速度慢,实时性差。

2. 特征级图像融合

特征级图像融合是指从各个传感器图像中提取特征信息,并进行综合分析和处理的过程。提取的特征信息一般应是像素信息的充分统计量,然后按特征信息对多传感器图像数据进行分类、汇集和综合。典型的特征信息有线型、边缘、纹理、光谱、相似亮度区域等。特征级图像融合的优点在于实现了信息压缩,处理速度快,并且由于所提取的特征直接与决策分析有关,因而融合结果能最大限度地给出决策分析所需要的特征信息。特征级图像融合与像素级图像融合相比信息丢失较多,计算量较小。特征级图像融合处理的结构如图 1.2 所示。

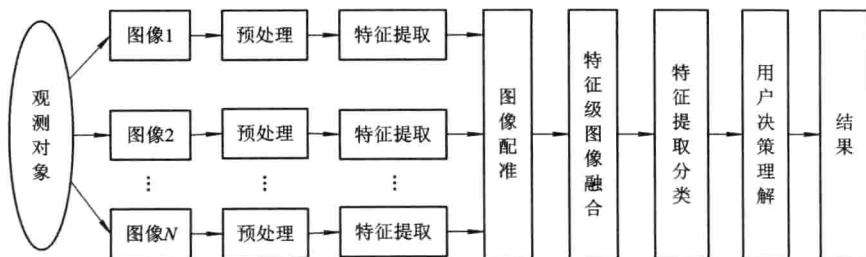


图 1.2 特征级图像融合

3. 决策级图像融合

决策级图像融合是对来自多幅图像的信息进行逻辑推理或统计推理的过程。决策级融合是一种高层次融合，其结果为指挥控制决策提供依据。在这一层次的融合过程中，首先对每幅传感器图像分别建立对同一目标的初步判决和结论，然后对来自各传感器的决策进行相关处理，最后进行决策级的融合处理，从而获得最终的联合判决。多种逻辑推理方法、统计方法、信息论方法等都可用于决策级图像融合，如贝叶斯(Bayesian)推理、D-S(Dempster-Shafer)证据推理、表决法、聚类分析、模糊推理、神经网络等。决策级图像融合的结构如图 1.3 所示。

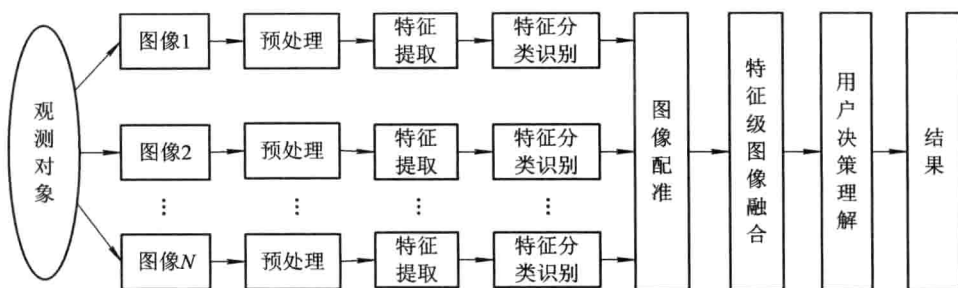


图 1.3 决策级图像融合

决策级图像融合具有良好的实时性和容错性，但其预处理代价高，且信息损失最多。

图像融合策略秉承了信息融合的基本融合策略，即先对同一层次上的信息进行融合，从而获得更高层次上的融合信息，然后再汇入相应的信息融合层次。其本质是一种由低(层)至高(层)对多源信息进行整合、逐层抽象的信息处理过程。各个层次上的融合各有其优缺点，融合策略存在互补性。

1.3.2 按融合方法分类

根据图像融合处理域的不同，图像融合可大致分为两大类^[29, 30]：基于空间域的图像融合和基于变换域的图像融合。基于空间域的图像融合是直接图像的像素灰度空间上进行融合；而基于变换域的图像融合是先对待融合的多源图像进行图像变换(如金字塔变换、小波变换)，然后对变换得到的系数进行组合，得到融合图像的变换系数，最后再进行逆变换，从而得到融合图像。目前基于变换域的图像融合是研究热点。

1. 基于空间域的图像融合

常用的融合算法包括：线性加权图像融合^[31]、假彩色图像融合^[32-34]、基于调制的图像融合^[35]、基于统计的图像融合^[36-39]以及基于神经网络的图像融合^[40-42]等。

1) 线性加权图像融合

线性加权图像融合就是将源图像进行加权平均后作为融合结果。加权平均提高了图像的信噪比，但降低了图像的对比度，使得图像中的边缘、轮廓变得模糊^[43]。线性加权融合的一般形式可以用公式表示为

$$F(i, j) = \omega_A A(i, j) + \omega_B B(i, j) \quad (1-1)$$

式中， $A(i, j)$ 、 $B(i, j)$ 、 $F(i, j)$ 分别表示源图像 A 、 B 及融合图像 F 在点 (i, j) 处的灰度

值; ω_A 、 ω_B 为加权系数, $\omega_A + \omega_B = 1$, 若 $\omega_A = \omega_B = 0.5$, 则为平均融合。权值如何选择是加权平均法中的关键问题。基于局部区域对比度的权值选择法利用人眼对对比度非常敏感这一事实, 从两幅源图像中选择对比度最大的像素点作为融合图像的像素点, 也就是说, 对比度大的像素点权值为 1, 否则为 0。基于对比度的权值选择技术对噪声非常敏感, 这是因为图像中的噪声具有很高的对比度, 这样融合图像中将包含很强的噪声。Burt P. J. 提出了平均和选择相结合的方法, 即用 1 个匹配矩阵来表示两幅图像的相似程度^[44], 当两幅图像很相似时, 融合图像就采用两幅图的平均值, 也就是说, 两幅图像的权值分别为 0.5 和 0.5; 当两幅图像差异很大时, 就选择最显著的那一幅图像, 此时两幅图像的权值分别为 0 和 1, 这样就可以抑制噪声。

线性加权图像融合方法具有算法简单、融合速度快的优点, 但在多数应用场合, 该图像融合方法难以取得满意的融合效果。主成分分析(PCA)的图像融合方法是把多变量信息即多波段的图像信息综合在一幅图像上, 而且对融合图像来说, 各波段的信息所做出的贡献能最大限度地表现出来。为此须对源图像各波段像素值进行加权线性变换, 以产生新的像素值。Shetigara 提出利用 PCA 提高多光谱图像分辨率^[45], 即通过对低分辨率多光谱图像的主分量提取, 将其第一主分量替代为高分辨率全色图像, 然后运用逆变换得到融合图像。

2) 假彩色图像融合

假彩色(False Color)图像融合处理可以说是就目前的硬件技术条件而言较容易实现的图像融合方法, 并且人类视觉系统对其融合结果也较容易分辨。假彩色的图像融合方法是在人眼对颜色的分辨率远超过对灰度等级的分辨率这一视觉特性的基础上提出的融合方法^[4]。假彩色图像融合算法的代表是基于 IHS 彩色空间的融合算法, 该算法主要用于多光谱图像与全色图像的融合。最简单的融合形式是用高空间分辨率的全色图像代替多光谱图像经过 IHS 变换后获得的 I 分量, 并通过 IHS 逆变换获得融合结果。后来学者们针对该方法中所出现的光谱畸变以及空间特征保持等问题又相继提出了许多改进算法。Xiao 等人通过对基于 IHS 变换的多光谱和全色图像融合模型的深入分析指出, 通过这种方式所获得的融合结果中的光谱畸变是不可避免的, 并提出了一种通过对多光谱图像 I 分量进行修正来减少融合图像的光谱畸变的方法^[46]。Li 等人通过给 I 分量的低频分量添加比例因子来有效地降低融合结果的光谱畸变^[47]。Tu 等人分析研究了 IKONOS 卫星多光谱和全色图像的成像光谱范围以及各自的特点, 提出了一种通过光谱调整来减小其融合过程中所产生的光谱畸变的融合方法^[48]。Li 等人对传统的基于 IHS 变换的多光谱和全色图像融合算法进行了改进, 提出了基于分辨率退化模型和 IHS 变换的融合方法^[49]。Alparone 等人为了克服 IHS 变换只能实现具有三个彩色通道的数据变换的缺点, 提出了广义 IHS 变换(Generalized IHS Transform), 并成功应用于 Landsat 卫星 ETM+ 多光谱图像和 SAR 图像的融合^[50]。

3) 基于调制的图像融合

调制是通信术语, 是指一种信号的某项参数(如强度、频率等)随另一种信号的变化而变化。借助通信技术的思想, 调制技术在图像融合领域也有着相当广泛的应用, 并在某些方面具有较好的效果。用于图像融合的调制手段一般适用于两幅图像的融合处理。具体操

作一般是将一幅图像进行归一化处理,然后将归一化的结果与另一图像相乘,最后重新量化后进行显示^[51]。这种处理方式相当于无线电技术中的调幅(Amplitude Modulation, AM),一幅数字图像的灰度大小就相当于无线电波的幅度大小。用于图像融合的调制技术一般可分为对比度调制技术和灰度调制技术。Smith 等人提出利用调制技术实现可见光与红外的融合^[35]。该算法利用单位权值核对可见光图像作平滑处理,并且与源图像相减产生“AC Fluctuation”图像,然后将其与平滑处理后的图像相除产生百分比差异图像,利用百分比差异图像调制红外图像的灰度值,最后做适当的对比度优化。

4) 基于统计的图像融合

采用统计方法进行图像融合,是从信号与噪声的角度考虑图像融合问题的。基于统计的图像融合方法在建立图像或成像传感器统计模型的基础上,确定出融合优化函数进行参数估计。统计学方法分为有监督(Supervised)和无监督(Unsupervised)两类。有监督时,通过训练步骤或预处理步骤估计图像模型的参数;无监督时,这些参数可以通过数据本身来估计。如贝叶斯优化的目的是找到使后验概率最大的融合图像。当采用马尔可夫随机场方法进行图像融合时,图像就被定义为马尔可夫随机场模型,融合就变为一个优化问题。基于马尔可夫随机场的图像融合方法把融合任务表示成适当的代价函数来表征融合结果,输入原图像作为一随机场集,然后在不同图像的对应区域进行全局寻优,用回归分析的方法分别提取一组统计参数(这些参数表征了图像的局部结构特征),计算其相似性测度,最后由输入图像及其相似性矩阵生成融合后的边缘图像。这种融合方法具有较强的适应性和可靠性,即使在图像信噪比较低的情况下也能取得较好的融合效果^[52]。文献[53]提出了一种基于期望值最大的图像融合方法。该方法首先假设图像对场景的成像模型,以期望值作为目标函数,通过使目标函数最大的方法确定该模型的参数,估计出真实场景,进而得到理想的融合图像。Xia 等人在建立系统统计模型的基础上,通过融合处理来降低或消除融合图像中的噪声成分^[38]。基于统计的图像融合方法能够降低噪声对融合结果的影响,增强融合图像的信噪比,非常适用于包含噪声的图像融合。

5) 基于神经网络的图像融合

人工神经网络是一种试图仿效生物神经系统处理信息的新型计算处理模型。一个神经网络由多层处理单元或节点组成,可以采用各种方法进行互联。在生物界多传感器信息融合的启发下,有些学者已应用人工神经网络来模拟多传感器图像融合。神经网络的输入向量经过非线性变换,可得到一个输出向量。这样的变换能够产生从输入数据到输出数据的映射模型,从而使神经网络能够把多个传感器数据变换为一个数据来进行说明表示。由此可见,神经网络以其特有的并行性和学习方式提供了一种完全不同的数据融合方法^[54]。然而,要将神经网络方法应用到实际的融合系统中,无论是网络结构设计,还是算法规则,都有许多基础工作有待解决,如网络模型、网络的层次和每一层的节点数、网络学习策略、神经网络方法与传统的分类方法的关系和综合应用等。目前应用于多传感器图像融合的神经网络有双模态神经网络、多层前向神经网络和脉冲耦合神经网络(PCNN)。Broussard 提出利用脉冲耦合神经网络融合一些视觉处理方法^[41],包括预期驱动推理滤波、状态调制、时相同步等,通过融合处理可以有效地提高识别率。

2. 基于变换域的图像融合

常用的基于变换域的融合算法包括基于 DCT 变换的图像融合算法^[55]、基于 FFT 变换