



“十三五”科学技术专著丛书

多源运动图像的 跨尺度融合研究

杜军平 徐亮 李清平 著

Cross-scale Fusion of
Multi-source Moving Images



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”科学技术专著丛书

多源运动图像的 跨尺度融合研究

杜军平 徐 亮 李清平 著



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书主要研究了多源运动图像的跨尺度分析、配准、拼接、融合与降噪等相关理论与技术,以提高多源运动图像配准与融合算法的精度、实时性和鲁棒性等为目的,将研究成果应用在多源运动图像的跨尺度分析与处理等实际问题中。本书提出了各类运动图像跨尺度分析、运动图像的跨尺度配准和拼接方法,重点提出了多传感器、多曝光、多尺度、自适应的运动图像融合方法,设计并实现了多传感器运动图像的跨尺度分析与融合系统,并将本书的相关研究成果集成在该系统中。

本书体系结构完整,注重理论联系实际,可作为电子信息工程、计算机科学与技术、软件工程、通信信息处理等相关专业的工程技术人员、科研人员、研究生和高年级本科生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

多源运动图像的跨尺度融合研究 / 杜军平, 徐亮, 李清平著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-5635-4925-2

I. ①多… II. ①杜… ②徐… ③李… III. ①图象处理—研究 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 210882 号

书 名: 多源运动图像的跨尺度融合研究

著作责任者: 杜军平 徐亮 李清平 著

责任编辑: 刘颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号 (邮编: 100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 15.75

字 数: 407 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4925-2

定 价: 48.00 元

• 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

跨尺度运动图像融合是多传感器信息融合的一个重要分支。运动图像融合可以有效合成多源运动图像序列信息,从图像序列中提取并融合有用的信息,生成针对相同监控场景目标的更加精细、完整和稳定的运动图像表示。同时,可以在不同情境、不同模态、不同距离和视角下,使得对监控场景对象的综合特征的融合结果与监控者的视觉特征更为相符,为更深入地研究目标场景的检测、识别、跟踪等提供依据。

在多传感器合作过程中,各传感器获取的运动图像信息具有互补性和冗余性,因此融合图像包含了比任何单一传感器输入通道的图像更丰富、更全面、更细节的信息,可以有效地提高图像中的信息含量,使融合结果有更高的可靠性和可信度,这有利于提高对运动图像信息的分析、识别和理解能力。

在场景监控、视觉导航和目标识别追踪系统中,利用多个角度、多种类型的传感器捕获不同视角、不同拍摄条件的运动图像信息,通过图像融合技术综合各图像的互补信息和冗余信息,可扩展传感器获取信息的有效范围,提升实际应用系统的可靠性和可维护性,降低对单个传感器的依赖程度,获取对目标场景的可靠准确描述,进一步提升目标图像的视觉效果。

本书共分 10 章。第 1 章是绪论;第 2 章是运动图像跨尺度分析方法研究;第 3 章是基于局部三值模式的运动图像配准研究;第 4 章是基于特征相似性的多传感器运动图像序列融合方法研究;第 5 章是基于离散小波框架变换图像融合研究;第 6 章是基于统一离散曲波变换和时空信息的运动图像融合研究;第 7 章是基于多尺度变换的多传感器运动图像序列融合与降噪方法的研究;第 8 章是多曝光运动图像序列融合方法研究;第 9 章是基于分散式卡尔曼滤波的自适应多视频传感器融合研究;第 10 章给出了利用本书提出的相关算法设计和实现的运动图像融合系统。

本书由杜军平、徐亮、李清平共同完成写作。参加写作的还有宋福照、胡前、陆承、张振红、范聃、王连海等。本书得到国家重点基础研究发展计划(973

计划)项目(2012CB821200)“空间合作目标运动再现中跨尺度控制的前沿数学问题”中的课题“空间多源数据分析与跨尺度融合”(2012CB821206)资助。因作者水平有限,书中错误在所难免,请读者多批评指正。

北京邮电大学 杜军平

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究现状	3
1.2.1 运动图像分析	3
1.2.2 图像配准研究	5
1.2.3 图像融合研究	8
1.2.4 运动图像融合	10
本章参考文献	14
第 2 章 运动图像跨尺度分析方法研究	26
2.1 引言	26
2.2 运动图像跨尺度分析算法的提出	27
2.2.1 MCTA 研究动机	27
2.2.2 MCTA 描述	28
2.3 MCTA 算法的实验结果与分析	36
2.3.1 客观评价指标及对比算法	36
2.3.2 MCTA 算法实验结果与分析	37
2.4 本章小结	43
本章参考文献	44
第 3 章 基于局部三值模式的运动图像配准研究	46
3.1 引言	46
3.2 问题的提出	46
3.3 局部二值模式特征描述算子	47
3.4 基于局部三值模式的运动图像配准算法的提出	48
3.4.1 SIFT 特征点检测	48
3.4.2 LTP 描述算子的构建	49
3.4.3 基于 LTP 的特征描述	51

3.4.4 特征点匹配策略	52
3.5 SIFT-LTP 算法的实验结果与分析	55
3.5.1 实验一:SIFT-LTP 算法在测试图像上的配准性能对比	55
3.5.2 实验二:SIFT-LTP 算法在 Robot 和 Boat 图像上的配准性能对比	60
3.6 本章小结	64
本章参考文献	65
第 4 章 基于特征相似性的多传感器运动图像序列融合方法研究	67
4.1 引言	67
4.2 基于特征相似性的多传感器运动图像序列融合算法的提出	68
4.2.1 FSIMF 算法研究动机	68
4.2.2 FSIMF 算法描述	68
4.3 FSIMF 算法的实验结果与分析	74
4.3.1 客观评价指标及对比算法	74
4.3.2 FSIMF 算法实验结果与分析	75
4.4 本章小结	85
本章参考文献	85
第 5 章 基于离散小波框架变换图像融合研究	87
5.1 引言	87
5.2 基于局部分形维数和离散小波框架变换的运动图像融合研究	88
5.2.1 分形维数	88
5.2.2 分形维数特征分析	89
5.2.3 基于局部分形维数和离散小波框架变换的运动图像融合算法的提出	91
5.2.4 LFD-DWFT 算法的实验结果与分析	96
5.3 基于区域特征和离散小波框架变换的多聚焦图像融合算法	104
5.3.1 基于区域特征和离散小波框架变换的多聚焦图像融合框架	104
5.3.2 系数选取规则	104
5.3.3 基于区域特征和离散小波框架变换的多聚焦图像融合算法步骤	105
5.3.4 实验结果及分析	106
5.4 本章小结	107
本章参考文献	108
第 6 章 基于统一离散曲波变换和时空信息的运动图像融合研究	110
6.1 引言	110
6.2 基于统一离散曲波变换和时空信息的运动图像融合算法的提出	111

6.2.1 图像序列的 UDCT 分解	112
6.2.2 基于时空信息的融合规则设计	114
6.3 UDCT-ST 算法的实验结果及分析	117
6.3.1 实验一:UDCT-ST 算法与基于多尺度变换的融合算法的性能对比	117
6.3.2 实验二:UDCT-ST 算法与基于时空信息的融合算法的性能对比	120
6.3.3 实验三:UDCT-ST 算法在带噪声运动图像上的融合性能对比	122
6.4 本章小结	124
本章参考文献	125
第 7 章 基于多尺度变换的多传感器运动图像序列融合与降噪方法研究	126
7.1 引言	126
7.2 基于三维 Shearlet 变换的多传感器运动图像序列融合与降噪算法	127
7.2.1 SIFD 算法研究动机	127
7.2.2 SIFD 算法描述	128
7.2.3 SIFD 算法的实验结果与分析	133
7.3 改进的基于双树复小波变换的运动图像融合算法	142
7.3.1 改进的基于双树复小波的区域相似度图像融合算法	143
7.3.2 改进的基于双树复小波的区域相似度图像融合算法实验结果	145
7.4 本章小结	149
本章参考文献	149
第 8 章 多曝光运动图像序列融合方法研究	152
8.1 引言	152
8.2 基于特征的多曝光运动图像序列融合算法的提出	153
8.2.1 FMIF 算法研究动机	153
8.2.2 FMIF 算法描述	154
8.2.3 FMIF 算法的实验结果与分析	158
8.3 改进的基于移动不变离散小波变换的运动图像融合	166
8.3.1 改进的基于移动不变离散小波变换的运动图像融合算法	166
8.3.2 改进的 SIDWT-flow 运动图像融合实验和评价	168
8.4 基于图像对齐的多曝光运动图像融合算法	172
8.4.1 基于图像对齐的多曝光运动图像融合算法的提出	173
8.4.2 多曝光运动图像融合	174
8.4.3 MDIFA 算法的实验结果与分析	175
8.5 本章小结	178
本章参考文献	178

第 9 章 基于分散式卡尔曼滤波的自适应多视频传感器融合研究	182
9.1 引言	182
9.2 传感器可信度计算	183
9.3 基于分散式卡尔曼滤波的自适应多视频传感器融合算法的提出	185
9.3.1 目标位置映射	185
9.3.2 自适应分散式卡尔曼滤波融合	186
9.4 ADKFF 算法的实验结果与分析	189
9.4.1 实验一:ADKFF 算法与非自适应融合算法的性能对比	189
9.4.2 实验二:ADKFF 算法与自适应融合算法的性能对比	192
9.5 本章小结	194
本章参考文献	195
第 10 章 运动图像融合系统实现	197
10.1 多传感器运动图像的跨尺度分析与融合系统实现	197
10.1.1 MTAFS 系统总体架构	197
10.1.2 主要功能模块设计与实现	198
10.1.3 跨尺度分析模块	198
10.2 多源运动图像的跨尺度配准与融合系统实现	203
10.2.1 系统总体架构	203
10.2.2 主要功能模块设计与实现	204
10.3 运动图像序列融合系统开发	209
10.3.1 系统的总体设计	209
10.3.2 系统详细设计与实现	210
10.3.3 系统测试	215
10.4 多源图像融合工具设计与实现	216
10.4.1 需求分析	217
10.4.2 系统设计	217
10.4.3 基于 SCDPT 变换与结构相似性的多源图像融合模块	219
10.4.4 基于显著性目标区域融合模块	220
10.4.5 基于前背景分离的图像融合模块	221
10.4.6 单源图像融合评价模块	222
10.4.7 多源图像融合评价模块	222
10.4.8 系统测试	222
10.5 空间运动图像的多尺度融合与拼接工具开发	224
10.5.1 系统需求分析	224

10.5.2	空间运动图像的多尺度融合与拼接工具架构设计·····	224
10.5.3	读取图像模块·····	226
10.5.4	图像预处理模块·····	227
10.5.5	图像融合模块·····	227
10.5.6	网络传输模块·····	228
10.5.7	图像评价模块·····	229
10.5.8	运动目标提取模块·····	230
10.5.9	图像拼接模块·····	231
10.5.10	系统测试·····	231
10.6	跨尺度图像和信息融合系统的开发·····	233
10.6.1	跨尺度图像和信息融合系统总体设计·····	233
10.6.2	系统设计过程·····	235
10.6.3	系统测试·····	237
10.7	本章小结·····	238

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

随着现代信息处理技术、通信技术、传感器技术和存储技术的不断发展,图像和视频传感器已经得到了大范围的应用,从而产生了海量的运动图像。例如,在空间交会对接的最后阶段,依靠视觉信息获取各子系统的位置,这就需要传输和处理大量的图像信息,从中获取运动目标之间的相对位置、相对速度和相对姿态,为空间交会对接过程提供准确的运动信息。因此需要提供更加稳定高效的图像处理技术,使得处理后的图像信息易于传输,并且能够清晰准确地表达运动目标的速度、位姿等内在信息以及场景等上下文信息。

随着传感器技术的迅速发展,各类传感器被大量地用于监控、军事、航空航天等领域。由此也让我们面临一个重要的问题,那就是如何将来自不同传感器的信息有效地结合成一个融合的信息表示来解释^[1,2]。多传感器信息融合正是以此为目的而提出的有效策略。多个传感器针对同一目标或场景捕获的多源运动图像具有冗余性和互补性,基于此特性,从不同尺度和层次对多源运动图像进行分析并合成,就可以得到比输入的原图像包含更多重要和感兴趣细节信息的融合结果,该融合结果能在很大程度上描述运动目标或场景的综合信息^[3,4]。

跨尺度运动图像融合是多传感器信息融合的一个重要分支。多源运动图像配准和融合技术也是在此技术的理论基础上发展起来的图像处理技术^[5]。运动图像融合可以有效合成多源运动图像序列信息,从图像序列中提取并融合有用的信息,生成针对相同监控场景目标的更加精细、完整和稳定的运动图像表示^[6,7]。同时,可以获得在不同情境、不同模态、不同距离和视角下对监控场景对象的综合特征表示^[8]。融合结果与监控者的视觉特征更为相符,为更深入地解析目标场景,检测、识别、跟踪目标提供更好的数据基础。运动图像融合在卫星遥感、航空航天、机器人视觉等领域的图像处理及分析,在实际的工程项目中得到了广泛应用^[9,10]。

在多传感器合作过程中由各传感器获取的运动图像信息具有互补性和冗余性,因此融合图像包含了比任何单一传感器输入通道的图像更丰富、更全面、更具细节的信息^[11],可以提高图像中的有效信息含量,使融合结果有更高的可靠性和可信度。这有利于提高对运动图像信息的分析、识别和理解能力,提高空间交汇对接过程中各子系统间合作的稳定性^[12]。因此开展多源运动图像跨尺度融合的理论及实现方法的研究具有重要的意义。

然而,由于系统中不同传感器的光谱波段、模态、位置、分辨率、对比度参数设置不同等多种因素的影响,使得多个传感器获取关于同目标或同场景的运动图像之间存在相对平移、旋转、缩放、亮度变化等差异^[13-15],这导致多源运动图像不能直接进行像素级融合,因而在融合之前需要先对其进行配准^[16]。运动图像配准可以对多源运动图像进行匹配,将这些来自多个

摄像头、不同距离或视角的图像序列在同一个坐标空间内对齐。对运动图像序列中表示同一目标、对象的像素点进行精确的空间坐标对准和定位,而且配准的精度越高,融合结果包含的信息就越准确、越可靠^[17]。图像配准是多源运动图像融合的前提,也是自动目标识别、计算机视觉、3D目标重建、医学和遥感影像处理等领域中关键技术的基础^[18,19]。

目前,研究人员已经提出了很多配准和融合的方法,这些方法在图像配准和融合上已经取得了很好的效果,但是在算法的适用性、运动性和跨尺度等方面仍有待深入研究。鉴于此,本书根据空间合作目标运动再现的特点和需求,围绕上述问题,深入研究多源运动图像的跨尺度配准与融合算法及相关问题,给出有效的运动图像的跨尺度配准与融合的理论和方法。

为了获取完整准确的运动目标场景信息,实现对运动目标的准确分析,需要对不同传感器捕获的图像信息进行融合,获取融合图像,完整表达场景信息,同时降低冗余。要提高图像融合方法的性能和可靠性,就需要进一步研究运动图像跨尺度分析方法,从不同尺度分析运动图像的特征属性,为运动图像融合提供支持。在运动图像分析和融合的过程中,涉及跨尺度问题,主要表现在时间和空间上的跨尺度、图像频率跨尺度以及不同光照尺度等。对于跨尺度相关问题的研究,目前还处于起步阶段,需要不断地提出更好的解决方法,处理在运动图像分析与融合过程中遇到的跨尺度问题,为空间合作目标运动再现研究提供可靠的图像数据。

如何利用运动图像中存在的运动信息,有效地对运动图像进行分析,是图像处理研究领域的关键问题^[20,21]。运动图像提供了比静态图像更丰富的信息,通过对运动序列图像的分析,可以获得从单一图像中观察不到的图像运动目标的位置、速度、姿态等运动状态信息。传统的运动图像分析方法主要是在时间尺度上从二维图像序列中提取运动参数,分析运动规律,获取运动图像的流体结构特征,从而更有效地进行运动图像的识别、稳定化与融合。本书主要从运动图像的时空尺度和频率尺度出发,综合利用运动估计、多尺度变换与视觉关注度等技术,实现对运动图像的综合分析,构建运动图像分析方法,并将其应用于运动图像融合,使其提高融合运动图像的质量。

在场景监控、视觉导航和目标识别追踪系统中,视觉信息是提高系统性能和精度的重要手段。由于现实环境的复杂多变特性,在采集的图像中可能会夹杂着噪声、信息内容不完整、物体遮挡、光照变化等情况,使得图像的视觉效果较差,图像不能表示场景的完整信息,严重影响运动目标的准确识别和提取。因此利用多个角度、多种类型的传感器,捕获不同视角、不同拍摄条件的运动图像信息,通过图像融合技术综合各图像的互补信息和冗余信息,扩展传感器获取信息的有效范围,提升实际应用系统的可靠性和可维护性,降低对单个传感器的依赖程度,可以获取对目标场景的可靠准确描述,进一步提升目标图像的视觉效果^[22]。

运动图像分析与融合在图像场景的表达方面具有重要作用,将其应用于视觉导航过程中对图像的处理方面,可以有效分析目标的运动特性,捕获完整的目标和场景信息,从而为获取目标的相对位姿与速度提供视觉数据保证。通过对视觉导航信息系统的应用进行需求分析,多传感器运动图像分析与融合仍然存在以下问题需要解决:

一是如何更好地分析运动图像的时间特性和空间特性,获取运动图像的时空系数,为运动图像融合提供数据支撑。解决的方法是构建运动图像跨尺度分析方法,同时从时间、空间和频率角度对运动图像进行分析,保证分析结果的时间一致性和稳定性。

二是解决存在环境干扰情况,包括噪声、遮挡和光照变化等,致使单个传感器很难捕获完整清晰的目标场景,导致视觉导航系统无法获取到高质量的图像视觉信息,影响系统的准确性和稳定性。解决的途径是采用运动图像融合技术,融合多个传感器捕获的目标场景信息,在融

合的过程中消除干扰信息,从而显示完整的目标运动轨迹和场景,保证系统获取到完整准确的视觉信息,同时降低冗余,便于各个子系统之间的通信传输。

为了有效解决上述问题,我们重点考虑从运动图像时空尺度、不同频率尺度、不同传感器尺度及光照变化尺度出发探索解决问题的新方法,其中面对的难点体现在时空尺度及频率尺度。已有的图像分析方法,要么单纯从时间尺度出发考虑图像序列的运动特征,要么从空间尺度出发,分析图像的几何特征,以及图像不同频率尺度特征,没有真正将时间尺度、空间尺度和频率尺度融合在一起从整体上考虑,这就需要从分散的单尺度分析转到多尺度综合分析,实现图像分析的一致性和全面性,提升描述图像特征的能力,进而解决运动图像及噪声运动图像的融合问题。

不同传感器尺度。不同模态传感器在捕获场景信息时,由于其成像机理不同,捕获到的场景细节不同,其图像内容之间可能是互补或冗余关系。例如,红外和可见光传感器同时拍摄的相同场景图像,如何判断图像信息之间的互补和冗余关系,是提升融合图像质量的关键。

光照变化尺度。由于现实环境复杂多变,在传感器捕获图像的过程中可能会遇到光照变化情况,致使捕获的图像内容不完整、不清晰,影响视觉导航系统的处理分析。已有的图像融合方法不能适应不同光照变化情况下的运动图像融合,导致融合图像仍然不能满足场景完整捕获的要求,需要设计新的算法克服光照变化造成的影响,保证融合图像的质量。

综上所述,传统的图像分析与融合方法无法完全满足对运动图像处理的要求。本书根据运动图像的特点,结合其中存在的跨尺度特征,对多传感器运动图像跨尺度分析与融合方法展开深入研究,相关研究成果可以提供丰富、完整、清晰的目标场景信息,更好地满足视觉导航系统需求,为空间合作目标运动再现研究提供服务。

1.2 研究现状

1.2.1 运动图像分析

世界是动态变化的,相比于单一的静态图像,运动图像序列可以提供更加丰富的信息,通过分析运动图像序列,不仅可以理解图像的内容,还可以了解复杂的动态变化过程。对运动图像几何特征及运动特征的分析,直接关系到后续图像处理任务的完成质量。运动图像跨尺度分析主要涉及运动估计和多尺度几何分析等技术。

运动估计的任务是从连续的图像序列中检测目标的运动,获取表示目标运动的运动向量。运动向量可能与整个图像相关,表示全局运动估计,也可能与图像局部区域有关。从早期的光流估计方法^[23]开始,研究者已经提出了各种各样的模型和计算工具来分析视频图像序列中的运动信息。运动图像序列的运动信息是非常关键的因素,大量运动估计方法已经被成功应用于视频摘要^[24]、视频稳定化^[25]、视频压缩^[26]、视频降噪^[27]、帧插值^[28]、三维几何重构^[29]、目标跟踪^[30]和分割^[31]等。

另外,与运动估计非常相关的主题有图像对应^[32]、图像配准^[33]、图像匹配^[34]、图像对齐^[35]等。最初在计算机视觉中运动估计被称为图像序列分析。变分方法和基于块的平移配准技术被广泛认为是运动估计方法的基础。运动估计方法主要有块匹配法、光流法、特征法和相位法等。

图像块匹配运动估计方法假设在局部块内像素做相同运动,在相邻图像帧中,根据一定的匹配准则在一定的搜索范围内搜索最相似的块,计算对应块的运动位移作为当前图像块的运动向量。该类方法重点在于改善搜索匹配算法的效率来提高算法性能最广泛应用的一种方法是菱形搜索算法(Diamond Search)^[36],包括大菱形搜索模式(LDST)和小菱形搜索模式(SDSP)两种,是一种快速的块匹配运动估计方法。

为了进一步提高块匹配算法的速度和精度,自适应十字模式搜索(Adaptive Rood Pattern Search)^[37]方法基于如下方法来提高搜索速度,即通常情况下在一帧图像中像素的运动是一致的,如果当前图像块周围的块向某个方向运动,则当前图像块有相似运动的概率是最大的,以此估计当前图像块的初始值,限制搜索范围,加快搜索速度。为了获得更好的运动向量估计,Nisar 等人^[38]组合时空相关信息和预测的运动向量方向来提高块匹配的精度和速度。

光流估计方法^[39,40]能够独立地估计每个像素的运动向量。从 Lucas 和 Kanada 以及 Horn 和 Schunck 的奠基性工作开始,光流技术得到了快速的发展,取得了丰硕的成果,尤其是随着各种数学理论和方法在图像处理领域的广泛应用,促进了各种有效的光流计算模型的提出,极大地提高了光流估计的精度和实时性^[41]。采用近似最近邻场,估计大位移光流,可以有效处理具有大位移运动的估计问题^[42]。结合使用全局和局部运动模型,将场景中刚性运动估计问题转变为全局摄像机运动参数的估计问题^[43]。

通过信道表示分解图像以及描述子恒常假设代替标准亮度恒常假设^[44]、集成高阶全变分正则项^[45]、局部自适应数据项^[46]、各向异性粘贴张量投票^[47]、先验各向异性平滑^[48]等方法可提高光流运动估计的性能。精确的光流估计仍然在快速发展,评估光流算法的基准和不断更新的技术^[49,50]促进了光流算法质量的不断提升。

特征运动估计方法利用角点、边缘、区域等局部和全局特征在相邻帧之间匹配特征结构,以此计算特征向量^[51]。Guerreiro 和 Aguiar^[52]讨论了基于特征的方法和非特征方法的优缺点,提出了一种迭代方案组合基于特征方法的简单性和非特征方法的鲁棒性来估计运动向量。Tok 等人^[53]依据 Helmholtz 原理提出了一种基于特征的两步运动估计算法。

相位相关法^[54,55]通过在傅里叶变换域利用其移位性质计算相邻帧之间的运动向量。相位相关法可检测出图像的尺度变换和旋转变换,在某些情况下性能很好,但其结果容易受到其信号特性和噪声的影响。子图像的应用极大地提高了相位相关运动估计的速度^[56],利用子图像的相位相关运动估计,得到全局运动估计向量,全局运动向量根据子图像相位相关表面的峰值来决定。在混叠和噪声存在的情况下,采用奇异值分解和随机抽样一致性算法,可以准确地进行亚像素相位相关运动估计^[57]。子六边形相位相关运动估计算法^[58]将图像在六边形网格上采样,并在傅里叶变换域进行六边形交叉相关计算,得到浮点精度的运动向量。

多尺度几何分析是从数学分析、计算机视觉、模式识别、统计分析和生理学等学科发展而来的一种信号分析方法,已经广泛地应用于图像处理、计算机视觉等领域,其目的在于建立最优逼近意义下的高维函数,检测、表示、处理高维空间数据。多尺度几何分析方法可以从多尺度、局部性、方向性和各向异性四个角度分析图像的边缘、纹理、结构等几何特征^[59],可以结合分析运动信息的运动估计方法用于运动图像跨尺度分析。多尺度表示对图像信号实现了由粗到精的连续逼近;局部性刻画了图像在空域和频域所具有的局部特征,并根据尺度的不同具有可伸缩性;方向性是指设计的基对信号具有灵活的方向选择特性,能够随尺度变化而变化,以便更好地逼近原始信号;各向异性是指通过考虑图像的几何正则性,构建一种支撑区间表现为长条形的基,该类型的基实现了奇异曲线的最优逼近,并体现了信号的方向性。

从最初的金字塔变换^[60]开始,研究者已经做了大量探索性研究工作,提出了众多具有里程碑意义的多尺度几何分析方法。金字塔变换将图像分解成包含多级不同空间分辨率、不同尺度子图像的塔形结构实现图像分析。小波变换^[61,62]与金字塔变换类似,但是小波变换具有更佳的方向选择性。通常使用最多的是离散小波变换,其具有良好的时频联合分析特性,可以较好地表示图像的特征。但是它不具有平移不变性,二维小波变换仍然由一维信号直接表示,只具有有限的方向,容易引起系数的混叠现象。另外,小波变换没有充分利用数据本身的几何特征,不能最优地表示含线奇异性或者面奇异性的高维函数。

为了更好地分析二维或更高维数据、更好地逼近具有奇异曲线的信号,研究者提出了许多真正的具有高维数据分析能力的多尺度几何分析方法,主要包括:脊波(Ridgelet)变换^[63]使得在高维空间的直线奇异性(纹理丰富的图像)得到良好的逼近,但是对于曲线奇异性的逼近性能较差;条带波(Bandelet)变换^[64]利用图像自身的局部几何正则性,构造以边缘为基础的基函数,Bandelet变换在图像去噪和图像压缩中具有潜在的优势;曲波(Curvelet)变换^[65]能够更好地逼近具有曲线奇异性的高维信号;轮廓波(Contourlet)变换^[66]是一种真正的多分辨率的、局域的、方向的图像二维表示方法,继承了Curvelet变换的优点,具有支撑长条形结构的基,能够最佳地表示运动图像边缘;楔形波(Wedgelet)变换^[67]是一种图像轮廓表示方法,能够自适应地捕获图像中的线和面特征,在含噪声数据的恢复中具有潜在优势;非下采样Contourlet变换(Nonsubsampled Contourlet Transform, NSCT)^[68]采用非下采样滤波器组进行图像的尺度分解和方向分解,具有平移不变性,非常适合于图像去噪、图像增强和图像融合等应用。多尺度几何分析方法在图像处理领域已经取得了很大成果,其理论和算法还在不断发展,还需要探索和开发更加适合于运动图像跨尺度分析的多尺度几何分析方法。

针对运动图像的分析问题,大量的研究都是从分析图像序列的运动信息出发,获取运动目标的运动向量,或者单纯从单个图像分析入手,采用多尺度几何分析方法在空域和频域对图像特征进行分析,还有一些方法在运动估计中利用多尺度分析方法,但这也仅仅是为了更好地估计运动向量。在众多的运动分析方法中,真正同时考虑从时域、空域和频域对运动图像序列进行建模,进而刻画运动图像尺度特征的方法很少,能够应用于运动图像融合的运动图像分析方法更少,因此需要设计新的运动图像分析方法对跨尺度信息进行分析处理,从而有效地捕获运动目标和场景的细节,提高运动图像的融合能力。

1.2.2 图像配准研究

图像配准技术一经提出就得到大力支持和赞助^[69]。随后研究人员对该技术进行了更为深入和广泛的研究,并被逐步推广应用到医学图像处理、机器视觉等相关领域中。对图像配准方法的综述性文献也相继出现^[70-72]。按照图像配准的研究历程,研究人员将图像配准划分为三类:基于图像灰度统计的配准、基于图像变换域的配准和基于图像特征的配准。

1. 基于图像灰度统计的配准方法

基于图像灰度统计的配准方法直接使用图像的像素计算匹配的变换关系,该类配准直接在图像的空间灰度采用原始像素灰度信息进行匹配^[73]。基于图像灰度统计的配准方法通常会选取一个输入图像间的相似度,该测度一般是由图像灰度信息中统计出来的特征生成的函数;计算该函数的极值,并对其进行优化,计算出精确的变换系数^[74]。基于图像灰度统计的配准方法思想简洁,易于实现。然而该类方法在搜索空间较大时非常消耗计算时间,而且在图像

有明显几何或亮度变化时配准效果不稳定。该类方法中应用较为广泛的有互相关方法、投影匹配方法和互信息方法^[71]。

互相关匹配方法只能配准尺度和灰度信息相近的输入图像。在其中一幅图像上进行搜索,逐像素遍历计算输入图像间对应部分的互相关。以互相关作为目标函数,在该目标函数取最大时,得到该图像中与另一图像中匹配的点^[73]。Pratt 对基于互相关技术的图像配准进行了全面研究,分析了其中关键技术特性以及相关的不同算法性能^[75]。投影匹配方法把二维的图像灰度值投影变换成为一维的数据,利用互相关匹配方法对图像窗口的一维投影数据进行相似度度量,也可以用一维数据的差分字符串匹配技术来提高运算速度^[76]。

另外一种经典的配准算法为基于互信息的配准方法,通过计算两个变量 A 和 B 的熵以及它们的联合熵,得到它们之间的互信息^[77]。若 A 和 B 代表两幅图像,互信息达到最大时得到配准参数。从而可以将互信息配准方法等价为一个优化问题,计算配准后的输入图像之间互信息最大时的变换参数。Viola、Rivaz、Sakai 等人应用互信息到医学图像配准,实现了不同模态的医学影像的精确配准^[78-80];Chen、Legg 等人也将基于互信息的配准应用于遥感图像配准和眼底成像技术中的配准,均取得了精确的配准结果^[81,82]。

此外,研究人员也将图像变换技术应用到配准中,提出了图像变换域的配准方法,其中傅里叶变换方法是最为广泛使用的方法。该方法可以在变换域中检测出图像的平移、旋转等变化,此外变换域的方法还有一定程度的噪声抑制能力。采用 FFT 对图像进行配准的方法最早由 Anuta 提出,使得配准技术在匹配速度方面有了明显的改善^[83]。Hoge 等人在配准时采用了相位相关匹配技术,得到了良好的配准结果^[84]。

对于两幅平移失配的图像,可以采用依据傅里叶变换的平移性质的相位相关技术进行配准。两幅图像的相位差类似于其交叉功率谱的相位,使用 FT 对其变换生成相应的脉冲函数,该函数不为零的地方为匹配的地方。Wang 等人采用局部上采样傅里叶变换完成了 2D 和 3D 图像的精确配准^[85];Zhang 等人在分数傅里叶变换域也完成了图像配准,得到了精确的配准结果^[86]。

2. 基于图像特征的配准方法

基于图像特征的配准方法是在图像灰度信息的基础上,计算提取一些不变量特征,这些特征对亮度、旋转、尺度等变化不敏感,从而有效地解决了基于灰度统计配准方法中存在的一些问题。例如,亮度、尺度、旋转变化等因素导致的误匹配^[87]。图像特征是图像空间中的不平滑点,也就是在较小的局部区域中发生的灰度剧烈改变。特征位置在局部区域中包含更大的信息量,用来配准的特征通常在图像发生各种变换时具有一定的鲁棒性。在各种基于特征的图像配准中,常用的图像特征有点特征、边缘特征、区域特征及结构特征等。

通常将图像二维空间一个局部区域不同方向上发生急剧变化的点作为特征点,在配准领域应用最广泛的是角点。研究人员提出了各种不同的特征点检测方法,其中最常用的几种是 Harris、SIFT 和 SURF 等。Kang Juan 等人提出了 Harris 特征点和互信息的配准方法,解决了因相机运动造成的特征点不一致问题^[88]。K. Sharma 等人采用 Harris-Laplace 提取特征点,结合 SIFT 描述算子描述特征点,解决了超高分辨率的图像配准问题^[89]。基于 SIFT 特征的匹配方法由于其健壮的匹配能力,在各个配准相关的领域得到了广泛的应用。此外,它对平移、旋转、亮度、仿射等变化都有很好的鲁棒性。

El Rube 等人提出了一种多尺度 SIFT 配准方法,提高了传统 SIFT 配准的速度^[90]。M. Hasan 等人采用改进的 SIFT 方法完成了多模态遥感图像融合^[91]。Mahesh 采用传统的

SIFT方法在有旋转、尺度和噪声变化的图像上完成了配准^[92],均取得了精确的配准结果。SURF是以SIFT为基础提出的一种更加高效的方法,其特征提取速度比SIFT有很大的提升。M. Teke等人将尺度约束方法引入基于SURF配准方法,在多光谱图像上取得了良好的配准效果^[93]。Kai Wang等人采用归一化SURF方法配准遥感图像,减少了待配准图像之间色差对配准的影响^[94]。Lin Zhu等人采用改进的SURF配准方法,进一步改善了配准速度^[95]。

基于边缘特征的图像配准以图像中的边缘结构为对象进行匹配。在图像中人类视觉首先能识别出的就是边缘结构,在图像中对象结构特征稳定的情况下,可以很好地去除其中不稳定因素的影响。

此外,有众多的边缘提取算子可以高效且准确的计算出边缘特征,使得基于边缘特征的配准也得到了广泛和深入的研究。苏娟等人提出了一种基于结构特征边缘的多传感器图像配准方法,提取了待配准图像中的结构特征边缘,基于边缘匹配构造虚拟角点,实现了图像的自动配准,取得了较高的配准精度^[96]。陈天泽等人提出了一种在特征匹配过程中,直接计算几何变换模型的边缘点特征配准方法^[97],利用图像边缘点的梯度和方向特征,基于像素迁移思想建立了图像边缘点集合的相似性匹配准则,实现了输入图像的自动配准,具有较好的鲁棒性。倪希亮等人提出了一种基于轮廓和尺度不变特征的全自动配准方法^[98],利用轮廓特征配准算法实现粗配准,利用局部自适应的尺度不变特征配准算法实现精配准,提高了配准精度。J. F. Ning等人提出了一种基于轮廓配准方法的目标跟踪框架,可以鲁棒地处理非刚体运动目标形状变化情况下的配准,提高了目标跟踪精度^[99]。基于轮廓配准方法的共同特点是待配准的图像要具有比较稳定且易匹配的封闭轮廓,但在实际应用环境中采集到的图像中,由于目标的运动等因素影响,通常难以检测出稳定的封闭轮廓。

矩不变量是一种高效的统计特征,主要用于区域特征的检测,被研究人员广泛使用在图像配准领域的研究中。它对旋转、平移、缩放等变化的影响具有很好的鲁棒性,最常用的有Hu矩、Zernike矩等^[100-103]。除此之外,研究人员还提出了众多诸如Harris-affine^[104]、Hessian-affine^[105]、最稳极值区域^[106]、高斯差分^[107]等各类提取符。Mikolajczyk等人在深入对比了以上各类提取符的性能后发现,最稳极值区域提取符在整体上具有更好的表现^[108]。Cheng等人采用基于最稳极值区域方法检测区域特征,采用SIFT描述提取的特征,提出了在不同的层级采用匹配优化的方法进行配准^[109]。Van等人也设计了一种区域检测方法,该方法检测的区域也具有仿射不变特性,在此基础上实现了基于区域的配准^[110]。然而若输入图像中重叠的区域较小,这些检测方法难以得到有效的封闭区域,如何使得检测到的特征具有不变性也是其中的关键问题。

特征点之间的结构信息是一种较为稳定的特性,对仿射变换不敏感。其中基于三角结构的配准方法由于特征点间三角剖分结构的稳定性而得到了广泛研究。Cohen等人以凸多边形结构为模型,在特征点集上建立用来匹配的结构进行匹配,所建立的凸多边形结构也具有仿射不变性^[111]。随后定义了Cross-weight矩,并在此基础上设计了仿射不变量,实现了配准任务^[112]。此外,Gope、Zhang和Myronenko等人也各自提出了基于特征点邻接结构的配准算法,实现了亮度、仿射变化等情况下的配准,均得到了精确的配准结果^[113-115]。Chui等人针对非刚体变换问题,设计了新的算法完成了非刚体变换情况下的配准任务^[116]。然而,这些方法大部分难以完成干扰点较多情况下的配准。为此,Aguilar等人为了有效去除格点,基于待匹配特征点集中的K近邻结构,提出了图变换匹配算法,得到了良好的配准结果^[117]。由于算