



“十三五”科学技术专著丛书

跨尺度运动图像的 插值、增强与重建

杜军平 梁美玉 訾玲玲 著

Interpolation, Enhancement and
Reconstruction of Transscale Motion Images



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”科学技术专著丛书

跨尺度运动图像的 插值、增强与重建

杜军平 梁美玉 訾玲玲 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书主要研究了跨尺度运动图像的插值、增强与重建的相关技术,以进一步提升运动图像的细节清晰度和视觉分辨率质量等为目的,并将研究成果应用于运动图像的噪声分类、去噪处理和增强处理等实际问题中。本书提出了基于高斯过程回归与视觉显著性检测的图像插值方法,基于一致性敏感哈希与区域导向的运动图像序列插值方法等,基于时空显著性、基于视觉感知的运动图像跨尺度自适应增强方法,适应于复杂运动模式的基于模糊配准机制和深度卷积神经网络的跨尺度超分辨率重建方法等,并实现了跨尺度运动图像的插值、增强与重建系统。

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

跨尺度运动图像的插值、增强与重建 / 杜军平, 梁美玉, 菅玲玲著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-5635-4924-5

I. ①跨… II. ①杜… ②梁… ③菅… III. ①图像处理—研究 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 210891 号

书 名: 跨尺度运动图像的插值、增强与重建

著 者: 杜军平 梁美玉 菅玲玲

责任编辑: 张珊珊

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: 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 14.75

字 数: 381 千字

版 次: 2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4924-5

定 价: 45.00 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

运动图像的插值、增强与重建是提升运动图像的视觉分辨率质量和运动目标细节清晰度的重要技术,对于精确获取运动目标的位姿信息,并对运动目标进行精确地识别和跟踪起着重要作用。由于复杂环境中存在光照亮度变化、光学或运动模糊、欠采样以及噪声干扰等问题,所拍摄的运动图像视觉质量较差。相比普通图像,运动图像具有时间特性和空间特性,往往存在一些复杂运动场景,因而有必要结合运动图像的特点,综合利用其不同时空尺度的跨尺度相关信息,实现更为有效的跨尺度运动图像插值、增强和重建,从而获取视觉分辨率更高、目标细节更为丰富的运动图像。

依据运动图像的跨尺度相关性,可以实现对噪声和图像细节的更有效区分,使得在滤除噪声的同时提高边缘细节信息的保持能力,并且在增强细节特征的同时降低噪声带来的影响。超分辨率重建是运动图像处理领域中的一项重要技术,结合深度学习、模糊配准机制可以进一步提出高效、健壮且不依赖于精确亚像素运动估计的超分辨率重建算法,从而更好地适用于复杂运动场景中的跨尺度运动图像处理。

本书共分 11 章:第 1 章是绪论;第 2 章是运动图像跨尺度描述方法研究;第 3 章是基于高斯过程回归与视觉显著性检测的图像插值方法研究;第 4 章是基于一致性敏感哈希与区域导向的运动图像序列插值方法研究;第 5 章是基于分区插值的感知驱动运动图像缩放方法研究;第 6 章是跨尺度自适应运动图像去噪研究;第 7 章是跨尺度自适应运动图像增强研究;第 8 章是基于非局部相似性和显著性检测的跨尺度超分辨率重建研究;第 9 章是基于光流估计和模糊配准机制的时空超分辨率重建研究;第 10 章是基于时空特征和神经网络的视频超分辨率算法研究;第 11 章是跨尺度运动图像的插值、增强和重建系统。

本书由杜军平、梁美玉、訾玲玲共同完成。参与写作的还有李玲慧、刘红刚、曹守鑫、汪谦、尹劲草等。本书得到国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“空间合作目标运动再现中跨尺度控制的前沿数学问题(2012CB821200)”中的课题“空间多源数据分析与跨尺度融合(2012CB821206)”的资助。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
1.1.1 运动图像插值研究背景与意义	1
1.1.2 运动图像增强与重建研究背景与意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 运动图像描述研究现状	3
1.2.2 运动图像插值研究现状	4
1.2.3 运动图像增强研究现状	6
1.2.4 运动图像超分辨率重建研究现状	9
参考文献	11
第 2 章 运动图像跨尺度描述方法研究	23
2.1 引言	23
2.2 运动图像序列细微运动放大算法的提出	24
2.2.1 SIMM 算法研究动机	25
2.2.2 欧拉放大原理	25
2.2.3 SIMM 算法描述	26
2.2.4 SIMM 算法实验结果与分析	31
2.3 运动图像序列跨尺度描述算法的提出	40
2.3.1 SITD 算法研究动机	40
2.3.2 SITD 算法描述	40
2.3.3 SITD 算法实验结果与分析	42
2.4 本章小结	46
参考文献	47
第 3 章 基于高斯过程回归与视觉显著性检测的图像插值方法研究	49
3.1 引言	49
3.2 基于高斯过程回归的插值算法的提出	50
3.2.1 EGPR 算法研究动机	50
3.2.2 高斯过程回归模型	51
3.2.3 EGPR 算法描述	52

3.2.4 EGPR 算法实验结果与分析	56
3.3 基于视觉显著性检测的图像插值算法的提出	62
3.3.1 SEGPR 算法研究动机	62
3.3.2 SEGPR 算法描述	62
3.3.3 SEGPR 算法实验结果与分析	64
3.4 本章小结	67
参考文献	67
第 4 章 基于一致性敏感哈希与区域导向的运动图像序列插值方法研究	71
4.1 引言	71
4.2 基于一致性敏感哈希的帧插值算法的提出	72
4.2.1 CSFI 算法研究动机	72
4.2.2 CSFI 算法描述	73
4.2.3 CSFI 算法实验结果与分析	77
4.3 区域导向运动图像序列插值算法的提出	85
4.3.1 RGSi 算法研究动机	85
4.3.2 RGSi 算法描述	86
4.3.3 RGSi 算法实验结果与分析	88
4.4 本章小结	95
参考文献	95
第 5 章 基于分区插值的感知驱动运动图像缩放方法研究	97
5.1 引言	97
5.2 基于分区插值的感知驱动运动图像缩放算法的提出	98
5.2.1 IPDR 算法研究动机	99
5.2.2 IPDR 算法描述	99
5.3 IPDR 算法实验结果与分析	102
5.3.1 运动图像缩放结果对比实验	102
5.3.2 标准运动图像缩放结果对比实验	110
5.4 本章小结	111
参考文献	111
第 6 章 跨尺度自适应运动图像去噪研究	114
6.1 引言	114
6.2 基于尺度相关 SURE-LET 的跨尺度自适应去噪算法的提出	114
6.2.1 NCTSD 算法研究动机	114
6.2.2 含噪图像成像模型	115
6.2.3 无偏风险估计	115
6.2.4 NCTSD 算法描述	116
6.2.5 NCTSD 算法实验结果及分析	122

6.3 本章小结	131
参考文献	132
第 7 章 跨尺度自适应运动图像增强研究	133
7.1 引言	133
7.2 基于时空显著性的跨尺度自适应增强(ST-CAE)算法的提出	134
7.2.1 ST-CAE 算法研究动机	134
7.2.2 ST-CAE 算法描述	134
7.2.3 ST-CAE 算法实验结果及分析	140
7.3 基于多尺度变换的运动图像增强(NCTSD)算法的提出	148
7.3.1 非下采样 Contourlet 变换工具	148
7.3.2 NCTSD 算法描述	149
7.3.3 实验结果及分析	151
7.4 本章小结	155
参考文献	156
第 8 章 基于非局部相似性和显著性检测的跨尺度超分辨率重建研究	157
8.1 引言	157
8.2 基于非局部相似性的超分辨率重建(NL-SR)算法	158
8.3 基于 Zernike 矩和非局部相似性的跨尺度超分辨率 重建(ST-ASR)算法的提出	159
8.3.1 ST-ASR 算法研究动机	159
8.3.2 ST-ASR 算法描述	160
8.3.3 ST-ASR 算法实验结果及分析	167
8.4 基于显著性目标检测的超分辨率重建(STDR)算法的提出	175
8.4.1 STDR 算法描述	175
8.4.2 STDR 算法实验结果及分析	178
8.5 本章小结	180
参考文献	180
第 9 章 基于光流估计和模糊配准机制的时空超分辨率重建研究	183
9.1 引言	183
9.2 基于光流估计和模糊配准机制的时空超分辨率重建(STSR)算法的提出	184
9.2.1 STSR 算法研究动机	184
9.2.2 STSR 算法描述	184
9.3 STSR 算法实验结果及分析	190
9.3.1 实验数据集和客观评价指标	190
9.3.2 STSR 算法实验结果及分析	191
9.4 本章小结	199
参考文献	199

第 10 章 基于时空特征和神经网络的视频超分辨率算法研究	202
10.1 引言	202
10.2 基于时空特征与神经网络的视频超分辨率(STCNN)算法的提出	202
10.2.1 时空特征提取和相似性计算	203
10.2.2 基于深度卷积神经网络的关联映射学习	204
10.2.3 基于时空特征的相似性匹配与融合	205
10.2.4 STCNN 算法实现步骤	205
10.3 STCNN 算法实验结果及分析	205
10.3.1 客观评价指标	206
10.3.2 主观视觉评价	207
10.4 本章小结	209
参考文献	210
第 11 章 跨尺度运动图像的插值、增强和重建系统	211
11.1 运动图像跨尺度插值模型的实现	211
11.1.1 运动图像跨尺度插值模型的实现	211
11.1.2 MTIM 模型实验结果与分析	213
11.2 跨尺度运动图像增强和超分辨率重建系统实现	220
11.2.1 引言	220
11.2.2 DIERS 系统总体架构	221
11.2.3 主要功能模块设计与实现	222
11.3 本章小结	225

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 运动图像插值研究背景与意义

空间对接技术要求在各个子系统之间传输大量的图像信息,需要采用更为有效的方法进行图像处理,为坐标解算、目标定位和目标追踪等提供准确的运动信息,从而更好地测量航天器之间的相对位置、相对速度和相对姿态。运动图像的跨尺度是描述上述运动信息的重要特征,主要表现在时间与空间上的跨尺度、图像多率采样的跨尺度、图像描述的跨尺度等。通过运动图像插值获取高质量、高分辨率的图像序列,减少计算量,加快处理速度,实现高质量的空间运动再现。

将图像描述与插值技术应用于航天器的空间交会对接,能够准确获取空间目标的运动与属性参数,掌握航天器的速度姿态变化。通过对应用需求进行分析,运动图像插值和描述技术在空间导航信息处理系统中的应用主要存在两个问题。

一是如何监测运动目标,从而获得运动目标的细节描述,为目标状态监测、运动跟踪和航天器故障告警等提供技术支持。解决的途径是采用运动图像描述技术对特定运动目标进行持续关注,加强目标的运动细节,获得高质量的观测效果。

二是如何解决现有空间信息处理系统对运动目标监视能力不够、显示质量不高、数据更新较慢等问题。解决的途径是采用运动图像的插值技术实现流畅的空间图像运动再现,从而精确描述运动轨迹,并且有效地显示在不同尺寸与分辨率的显示器上。

为了更好地解决上述问题,跨尺度方法应运而生^[1],为图像处理技术指明了一种新的方向,其面临的挑战主要体现在以下几方面。

改变关注尺度。已有的图像描述方法仅仅使用图像序列的内在特征,缺乏从观察者的角度关注运动图像序列,这需要将原运动序列的描述转换为对运动目标区域的描述,从而实现优先分配图像分析与合成所需的计算资源。

改变帧率尺度。由于图像序列具有不同的帧率,低帧率的运动图像需要转换成高帧率的运动图像,从而增强图像序列的运动平滑性。但已有的帧插值方法存在插值图像细节不清晰的问题,需要提出新的方法用以捕获高质量的插值帧,从而更加准确地再现图像序列的运动画面。

改变分辨率尺度。在航天器导航控制系统中,存在不同尺寸和宽高比的显示屏幕。这就需要改变空间图像的分辨率,使其适应不同类型的显示屏幕。目前已有的方法缺乏对运动目

标的重点关注,因此需要设计新的方法,在确保全局缩放视觉效果的基础上加强运动细节显示,进而高质量地展示不同分辨率的空间运动图像序列。

1.1.2 运动图像增强与重建研究背景与意义

视觉传感器拍摄的运动图像的分辨率质量和运动目标的细节清晰度对于精确获取运动目标的位姿信息,以及实现运动目标的精确跟踪起着重要的作用。然而,由于环境中的光照亮度变化、光学或运动模糊、欠采样以及噪声干扰等因素,往往使得所拍摄的运动图像视觉质量较差,严重影响到了运动目标位姿信息的精确估计以及运动目标的精确识别和跟踪。此外,相比普通图像,运动图像具有自身的特殊性:如严格的时间特性和空间特性,同时存在一些复杂的运动模式,如角度旋转和局部运动等。因此有必要结合运动图像的特点,综合利用运动图像不同时空尺度的跨尺度相关信息,研究更为有效且能够适应于复杂运动模式下的运动图像增强和重建方法,以进一步提升运动图像的细节清晰度和视觉分辨率质量。

虽然现有的增强和重建技术在图像处理和计算机视觉领域取得了一定进展,但在运动图像的跨尺度增强和重建处理方面仍然面临一些挑战:如何结合运动图像的时空特性,实现高效的运动图像跨尺度自适应增强;如何构建高效、健壮且能够适用于复杂运动模式的运动图像序列时空域快速自适应模糊配准机制;如何构建不依赖于精确亚像素运动估计的运动图像跨尺度时空超分辨率重建算法等。

噪声干扰以及运动目标细节信息模糊会对运动目标识别与跟踪的精度造成重要影响。因此,如何充分利用运动图像的跨尺度信息,进行噪声滤除和细节增强是提升运动图像视觉效果的首要问题。充分利用运动图像的跨尺度信息可以更好地突出运动图像的边缘轮廓,使模糊的细节清晰度更高。然而,目前已有的去噪和细节增强方法没能充分利用图像信息的跨尺度相关性对噪声和图像细节进行更有效的区分,因而导致在噪声滤除的同时,对于边缘细节信息的保持能力不够。在细节增强的过程中,也会出现噪声随之放大的问题。已有方法对于运动图像的处理实效性不高。为此,我们结合运动图像的时空特性及人眼的视觉注意机制,同时兼顾算法精度和时间效率两个方面,研究更为高效的基于视觉感知的运动图像跨尺度自适应增强方法。

分辨率是运动图像质量表征的重要指标之一,分辨率越高,从图像中获取到的关于运动目标的信息就越丰富,也就更有利于实现运动目标的精确定位和跟踪。基于多帧融合的超分辨率重建技术可以充分利用运动图像序列在时空域的不同时空尺度的相似而又细节不完全相同的关联信息,实现从多帧低分辨率的运动图像序列中融合重建出细节更加丰富的高分辨率、高质量运动图像序列。近年来,超分辨率重建技术一直是图像处理及计算机视觉领域的研究热点和难点,获得了国内外学者的广泛关注和深入研究,并已取得了一些成效。

传统的基于多帧融合的超分辨率重建方法需要利用光流、块匹配等技术实现精确的亚像素运动估计,然后再进行融合、重建。传统方法对帧间运动估计和配准的精度十分敏感,往往依赖于精确的亚像素运动估计,因而不适应于一些复杂的摄像机/场景运动模式(如角度旋转、局部运动等)。虽然近年来已有学者针对该问题进行了复杂运动模式下的多帧超分辨率重建问题研究,然而在处理运动图像时仍然不能很好地兼顾亮度、噪声及角度旋转健壮性,且算法的时间复杂度较高。因此,研究高效、健壮、不依赖于精确的亚像素运动估计,且能够适应于复杂运动模式的跨尺度超分辨率重建方法是一个研究热点,这对于运动目标的精确位姿估计以及运动目标的精确识别与跟踪具有重要的研究意义和实际应用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 运动图像描述研究现状

图像描述是图像处理的前提条件和关键环节,描述的特征能否有效地刻画运动目标对于图像处理任务是非常重要的。基于跨尺度的运动图像描述涉及多尺度几何空间分析、特征检测和特征描述等技术。

多尺度几何空间分析是当前图像处理领域的研究热点,是从数学分析、计算机视觉、统计学等领域发展出来的新的信号分析方法,能够有效地捕获和描述运动图像的边缘和纹理等几何特征,可应用于运动图像的跨尺度描述,使运动图像满足多尺度、局部性和方向性三个特性。多尺度实现了图像从粗糙到精细的连续逼近;局部性保证了图像在空域和频域上都有良好的局部性质,并且能随尺度变化而变化;方向性是指设计的基函数具有灵活的选择指向特性。

为了实现上述目标,许多学者进行了大量的研究工作并取得了一定的进展。主要包括: Ridgelet 变换使在高维空间中的直线状和超平面状的奇异性得到很好的逼近^[2]; Curvelet 变换能够有效地描述具有曲线或超平面奇异性的高维信号^[3]; Contourlet 变换继承了 Curvelet 变换的优点,能以接近最优的方式描述运动空间图像边缘^[4];小波变换从根本上克服了傅立叶(Fourier)分析只能以单个变量描述信号的缺点,并且通过尺度变化,有效地检测瞬变信号^[5]。然而,多尺度几何空间分析技术仍处于发展初期,尚待开发和完善,需要提出更好的方法进行图像的跨尺度描述。

特征检测技术是在尺度空间内构造特征检测函数,生成对应尺度下的特征空间并检测其中的特征区域作为特征描述的目标区域,从而表征运动对象或者局部区域特征。目标区域一般具有显著性、生存性、不变性、健壮性和代表性的特征。显著性指目标区域具有一定的视觉信息,如边缘、纹理、运动和颜色等;生存性指目标区域具有一定的稳定性;不变性指表征相同结构信息的特征,在不同样本集合中与样本本身的某些参数无关或者只存在线性关系;健壮性指由特征检测算法自身因素形成的误差不会对最终提取出的特征造成很大的影响;代表性指特征检测具有高度的概括性,用局部区域特征就可以表征全局图像内容。这些目标区域及其包含的信息形成了对应图像结构信息的表示。

为了获取这些用于特征描述的目标区域,研究者提出了很多特征检测方法。例如,非负局部坐标因子特征检测方法^[6](Non-Negative Local Coordinate Factorization)、紧密局部区域探测器^[7](Dense Local Region Detector)以及自动边缘尺度检测方法^[8]等。基于视觉感知的显著性检测方法逐渐受到人们的重视,这种方法根据图像的颜色、梯度、边缘、边界等属性,结合视觉的独特性、不可预测性、稀缺性以及奇异性,综合地描述运动图像特征,自动检测人们感兴趣的图像区域^[9]。

特征描述技术将从尺度空间表示的数据形式转化为特征描述向量,通过特征描述符来描述运动图像的特征区域,并用尽可能相互独立和完备的特征描述向量来表征运动物体,从而完整地描述运动图像内容。描述符主要分为三类。第一类是基于微分的描述符,它利用大量的局部微分,创建差分不变量以获得选择不变性。典型的算子包括局部微分算子、微分不变量、

方向可调滤波器。第二类是基于变换的描述符,它是对不变特征点邻域或不变特征区域的图像块进行某种变换后得到的特征矢量。例如,加伯滤波器、小波变换和复数滤波器等变换后的特征。第三类是基于分布的描述符,主要采用直方图来表达图像的特性。

最流行的描述算子是尺度不变特征变换算子(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT),它具有各种优秀性质,在计算机视觉领域得到了广泛应用。然而,它也存在一些缺点。许多算法对其进行了改进,例如,PCA-SIFT算子利用主成分分析法(Principle Component Analysis, PCA)提取出SIFT算子能量较集中的维数,从而降低特征维度^[10]。稳健特征加速算子^[11](Speeded Up Robust Features, SURF)根据海森(Hessian)矩阵计算图像局部极值,使得运算与滤波模板的尺寸无关。梯度定位与方向直方图算子(Gradient Location and Orientation Histogram, GLOH)改变了生成特征描述算子时建立的位置方格的尺寸,将圆形区域划分成放射状的同心圆,使特征具有健壮性和独特性。缺点是生成描述算子的计算量比较大。有更多更快的描述算子被提出,例如,二元健壮独立基本特征算子^[12](Binary Robust Independent Elementary Features, BRIEF)、描述符网络^[13](Descriptor-Nets, D-nets)、小尺度SIFT^[14](Scale-Less SIFT, SLS),以及为了克服动态纹理的旋转不变性,提出的局部二元模式特征描述法^[15](Local Binary Pattern, LBP)等,这些算子具有更强的特征辨别能力和更小的存储空间。

此外,还有许多其他领域的方法被结合到图像描述任务中。本章参考文献[16]使用狄利克雷分布(Dirichlet Allocation)词袋模型的分析框架 Flobjoints 来计算连续视频帧的流向量和具体图像的概率分布,从而输出图像的描述向量;本章参考文献[17]从统计学角度提出视频的不可追踪特性(Intrackability),即后验概率的熵,通过它来刻画视频的统计特征,并探求最优化的视频表示。当视频出现密度变化和尺度变化时该方法尤其有效;本章参考文献[18]综合语义空间和视觉空间上的所有特征,提出了一种新的运动表示方法“行为组”(Action Bank),用于描述视频中的运动语义信息。

针对运动图像描述问题,研究者提出了一些有效的方法。例如,本章参考文献[19]利用多尺度相对显著特征(MsRS)描述图像。MsRS的构建方法如下:首先采用递归高斯滤波卷积获取多尺度观察值,然后将多尺度观察值和初始值进行比较,以计算相对显著特征,最后根据相对显著特征得到 MsRS。这种描述方法可用于多种应用的预处理。本章参考文献[20]设计了视角尺度不变特征转换描述工具(PSIFT),其采用同态转换算法描述空间对象的形变特征。本章参考文献[21]提出多层自上而下方法,对相同内容但不同分辨率的空间图像进行特征提取,这种方法用于对空间图像进行分类,能取得很好的效果。本章参考文献[22]提出基于形状的全局极小主动轮廓模型描述高分辨率图像。本章参考文献[23]提出自适应的模糊遗传算法,通过降低参数的收敛性提高图像目标的探测能力。本章参考文献[24]提出基于配准的局部描述算子来提升图像的描述能力。本章参考文献[25]提出基于小波变换的形状描述算法,对空间图像中的小目标形状进行准确的描述。

但是,如何进行运动图像跨尺度描述,进而刻画尺度转换时的运动图像特征目前正处于研究的起步阶段。亟待设计出新的运动图像描述方法对跨尺度信息进行分析处理,从而有效地描述运动目标区域,捕获运动细节,提高运动目标的检测能力。

1.2.2 运动图像插值研究现状

图像插值是图像处理的核心技术之一,基本思想是用低分辨率图像的已知像素集合来产

生未知像素集合^[26],其本质是对未知像素进行预测。随着计算机的处理能力不断提高,更多复杂的运动图像插值方法被不断提出。

线性插值方法假设每个像素点灰度值是由采样点位置唯一确定的,可采用不同函数进行插值计算。优点是实现简单,计算复杂度较低,缺点是会丢失图像的细节,有时产生块效应^[27]。典型算法包括最近邻插值、双线性插值、三次插值、B样条插值等。例如,Sarrut提出了一种快速和低存储的B样条图像插值算法^[28],采用预定义B样条权重进行近似计算,得到了很好的插值精确性。

基于统计理论的插值方法从图像统计的角度挖掘图像信息,并采用学习的方式进行未知像素预测。本章参考文献[29]基于训练集中的高低分辨率之间的对应关系,提出一种简单而快速的插值方法。本章参考文献[30]提出了一种基于自适应马尔科夫随机场模型的插值算法,算法使用贝叶斯最大后验概率来插值高分辨率图像。本章参考文献[31]提出了一种基于学习的非线性K最近邻算法(K-Nearest Neighbor,KNN),但是K值是个经验值,其大小直接影响插值图像的效果;本章参考文献[32]采用统计内核回归方法,使用Nadaraya-Watson核回归估计器来完成插值计算。

本章参考文献[33]构建功能系数局部多项式回归模型(Functional Coefficient Local Polynomial Regression,FCLPR)来预测插值像素值。本章参考文献[34]使用一阶谐函数来推导马尔科夫随机场(Markov Random Field,MRF)局部特征,该方法在有噪声的情况下也能取得很好的效果。由于图像的先验模型^[35]在图像插值过程中起到了非常重要的作用,所以插值效果对于训练数据具有依赖性,造成算法的复杂度比较高。

基于边缘导向的插值方法通过对图像的边缘进行特殊处理,改善了插值图像质量。本章参考文献[36]提出了一种新边缘导向插值算法(New Edge-Directed Interpolation,NEDI),根据低分辨率图像估计局部方差系数,并使用基于几何双重性的稀疏估计来实现高分辨插值。本章参考文献[37]提出了基于多尺度张量投票框架的插值算法,结合边缘导向技术和重构技术,同时将三个颜色通道数据统一到这个框架下,产生多尺度的边缘表示方法用于指导高分辨率的插值过程。本章参考文献[38]提出了等光强线(Isophotes)自适应的插值方法,有效地减轻了锯齿现象。本章参考文献[39]采用径向基函数(Radical Basis Function,RBF)实现边缘导向插值,减轻了边缘模糊和块效应现象。

本章参考文献[40]改进RBF,提出各向异性径向基函数进行边缘驱动插值,得到更好的边缘插值效果。本章参考文献[41]在基于边缘插值方法的基础上,提出了基于学习的超分辨率算法,在比较大的放大倍数上得到高质量的插值效果。本章参考文献[42]使用临时插值像素集构造定向边缘核。本章参考文献[43]采用定向逆距离加权方法快速进行边缘插值。本章参考文献[44]提出了边缘自适应各向异性高斯核方法对图像进行了有效的插值。本章参考文献[45]提出了使用加权最小二乘技术的软决策插值算法。本章参考文献[46]设计了一个无向的边缘强度滤波器解决马赛克问题,得到高质量的彩色插值效果。总之,这类方法能很好地保持图像的边缘等细节部分,减轻边缘模糊和锯齿现象,保持边缘的光滑性,却未对非边缘处的插值细节做任何的考虑。

基于变换域的插值方法在离散余弦变换域(Discrete Cosine Transform,DCT)和小波域等频域进行插值操作,通过低分辨率图像的高频特征来预测高分辨率图像的高频特征,从而保持图像的边缘、纹理等细节信息,改善图像的视觉效果^[47]。但是这类方法常常会引入噪声,而且计算量非常大。例如,本章参考文献[48]使用DCT系数的空间关系实现图像的任意倍数缩

放;本章参考文献[49]使用小波变换估计高分辨率信号的滤波系数,得到更加清晰的2的整数倍的放大图像;本章参考文献[50]采用新的频域变换,即Contourlet变换来提高插值图像边界的规则性。但是这种方法运算复杂度高,收敛次数多;本章参考文献[51]提出使用离散小波变换(Discrete Wavelet Transform,DWT)将图像分解成不同子带图像,然后结合低分辨率图像和高频子带图像进行插值。

基于光流的插值方法的主要思想是采用像素密度数据时间变化和关联来决定每个像素位置^[52]。它首先分析运动图像序列的灰度变化从而计算出速度场,然后利用约束条件方程从速度场中推测出目标的运动参数,最后进行插值帧的重构^[53]。例如,本章参考文献[54]在粒子轨迹基础上使用两步优化算法用于估计准确的速度信息;本章参考文献[55]提出了基于路径选择的低复杂度插值方法。这种方法使用光流来确定路径方向,并采用像素交叉模型得到更加精确的光流,从而提高路径选择的精度;本章参考文献[56]提出了基于离散优化技术的由粗到细的光流估计方法,得到比较精确的运动估计值。

另外,一些新思想和技术被运用到运动信息的预测中。例如,本章参考文献[57]引入最优化控制技术;本章参考文献[58]将分割技术、最优化技术与光流技术三者相结合;本章参考文献[59]使用能量最小化的方法将视频重构为一系列超分辨率的运动层,从而得到清晰的高分辨率图像。但是这类方法也有两方面缺点:一方面迭代计算求解光流模型造成了巨大的计算量,很难实现实时性;另一方面由于多光源、噪声等因素的存在,亮度一致性和空间平滑性假设不一定总是成立,这影响了光流的计算。

基于块匹配的插值方法将运动图像的每一帧划分成许多大小相同的子图像块,然后在相邻帧中寻找与当前帧各块的最佳匹配块,计算运动矢量,从而重构插值帧。传统的块匹配方法有三步搜索法(Three Step Search,TSS)、四步搜索法(Four Step Search,FSS)、菱形搜索法(Diamond Search,DS)等。研究者又提出了许多运动图像插值算法。本章参考文献[60]使用双向重叠的块匹配方法对低分辨率视频序列进行插值进而得到高分辨率的中间帧。本章参考文献[61]提出非定向运动轨迹帧插值方法,核心是无规则网格扩展块权重的运动补偿和逐块定向孔插值,这种方法降低了块与块之间的瑕疵,并且很好地解决了块重叠的问题。

本章参考文献[62]首先将目标高分辨率图像进行自适应地分块,然后为这些块自动选择最适合的超分辨率重构算法,最后应用去块过程来降低块边缘间的瑕疵。本章参考文献[63]提出将图像/视频重构问题归纳为双向相似度的优化问题,并展示了视觉相似性的量化标准。本章参考文献[64]提出了一种快速的模拟退火自适应搜索(Simulated Annealing Adaptive Search,SAAS)块匹配运动估计算法,从而降低运动冗余和运算复杂度。本章参考文献[65]提出自由传播机制用于快速的块匹配,本章参考文献[66]对本章参考文献[65]进行改进,引入了局部敏感哈希技术,实现任意两张图像中的相似块匹配,在映射一致性和图像的重构方面都取得了很好的效果。综上所述,以上这类算法最大的特点是它具有简单性、易施性和实时性,缺点在于进行块匹配过程中,容易陷入局部最优。

1.2.3 运动图像增强研究现状

1. 运动图像去噪研究现状

去噪技术^[67]是运动图像增强领域的一个经典问题。按照其技术原理的不同,主要分为空间域方法和基于多尺度分析的变换域方法两大类^[68-70]。

(1) 空间域去噪方法

空间域方法主要根据图像像素间的空间相关性进行去噪处理,根据处理性质的不同分为线性滤波和非线性滤波。其中线性滤波方法相对比较成熟,但仍存在一些缺陷——需要噪声的先验知识,并且对图像的边缘和细节信息的保持能力较差。而非线性滤波方法则具有一定的自适应性,由此引发了很多改进算法。这类方法主要包括均值滤波、中值滤波、自适应中值滤波、维纳滤波和基于全变分的滤波等。

针对空间域的图像去噪,近年来兴起了一些新的去噪机制。例如基于非局部均值(NLM)的去噪方法^[71,72],在双边滤波的基础上引入了“非局部”的思想,利用图像内容的自相似特性,并基于图像块之间的欧式距离计算相似度权重,之后通过加权平均实现去噪。许多学者基于NLM滤波提出了一些改进的去噪算法^[73,74]。例如,Dabov等^[75,76]提出了基于三维块匹配的图像去噪方法(BM3D),该方法是一种空域和频域相结合的去噪机制,通过组合相似的图像块形成三维数据,然后进行滤波,再通过逆变换实现去噪。Maggioni M等^[77,78]对BM3D去噪思想扩展得到视频去噪方法,提出了时空域的BM4D去噪算法。然而BM3D对高斯白噪声的处理效果较好,在高斯噪声和脉冲噪声混合噪声类别下往往无法取得理想的效果。

(2) 基于多尺度分析的变换域去噪方法

随着多尺度分析的兴起,变换域去噪方法取得了较好的发展。目前发展起来的变换域方法有很多,如傅立叶变换、离散余弦变换、小波变换以及近些年发展起来的多尺度几何分析方法。将图像由空间域变换到频率域,由于频域内的特征分布更为明显,可以对图像的特征信息和噪声成分有效地区分,因而处理效果相比空域法往往更有效,滤除噪声的同时保持了更多的边缘细节信息。

基于小波分析的图像去噪方法相关研究大体分为以下几类:基于模极大值图像去噪法、小波域图像阈值去噪法、小波相关性去噪法、二代小波去噪法以及上述各种方法的组合^[79-81]。其中阈值去噪法备受很多研究者的青睐^[82-86]。其经典的代表作是Donoho和Johnstone提出的小波阈值收缩方法。包括硬阈值和软阈值函数去噪方法,其代表性的算法有VisuShrink和SureShrink。然而该方法仍存在小波系数的过度扼杀或者图像过平滑问题。很多学者对阈值的选取进行了改进,如Grae等提出了基于贝叶斯模型的小波Bayes收缩阈值的图像降噪方法^[87],本章参考文献[88]提出了自适应小波域阈值去噪方法。Blu等^[89]提出了基于SURE-LET方法来实现小波域图像去噪的思想,该方法将去噪的过程描述为求解基元阈值函数的最佳线性组合。Florian Luisier等^[90,91]又在SURE-LET思想的基础上,针对泊松噪声以及泊松-高斯混合噪声在小波域进行图像去噪处理。

鉴于小波变换存在一些方向选择性、非稀疏性等技术缺陷,基于多尺度几何分析的去噪方法成为目前去噪领域的研究热点。多尺度几何分析方法近几年发展十分迅速,理论方法和应用研究不断深入。目前的方法主要有脊波(Ridgelet)^[92]、曲波(Curvelet)^[93]、Bandelet、轮廓波(Contourlet)^[94,95]、Contourlet变换的改进版、非下采样Contourlet^[96]等,并且这些方法在图像去噪和增强领域均已经崭露头角^[97,98]。朱为等^[99]以第2代Curvelet变换为基础,提出了一种利用尺度相关性进行自适应阈值收缩的去噪方法。王发牛等^[100]提出了新的非下采样Contourlet域图像去噪方法,通过对非下采样Contourlet变换系数进行相应处理,实现图像去噪。Li等^[101]提出了一种基于非下采样Contourlet变换和SURE-LET的图像去噪方法,然而该方法没有考虑到不同尺度间的跨尺度相关性。变换域方法虽然在一定程度上将图像边缘细节和噪声区分开来,然而图像的细节信息和噪声这些高频信息在频带上仍然存在一些混

叠,导致在去噪的同时细节信息的保持不够理想,因而尚需进一步的改进。

针对上述问题,亟待研究出边缘细节保持能力更强的自适应去噪算法,以期在实现有效滤波噪声的同时,保持更多的边缘细节信息。鉴于以上分析中基于多尺度几何分析的描述方法可以很好地刻画运动图像边缘轮廓及细节信息,同时考虑到不同尺度间存在着一定的相关性使得细节信息和噪声可实现更好的区分,因此需要在基于多尺度几何分析的去噪思想基础上,研究结合尺度间的跨尺度相关性的运动图像去噪处理方法,实现在去噪的同时更有效地保持运动细节信息。

2. 运动图像细节增强研究现状

通过细节增强^[102-104]能够进一步提升运动图像的视觉效果,可增强被模糊了的运动细节信息。常用的细节增强技术可以分为空间域和频率域两种^[105-107]。前者直接对像素点进行运算,如基于点运算的灰度直方图调整和空域数字滤波器。后者首先将图像从空域变换到频率域,通过修正频域内的变换系数达到增强的目的。如非线性滤波法、基于多尺度分析的增强方法、形态学滤波法和基于微分方程扩散的增强方法等。

图像的边缘轮廓及细节信息是增强的重点。在增强图像的细节和边缘方面,Xu等^[108]提出了一种基于局部分形分析的图像增强方法。将图像的像素点视为分形集合,并将图像的梯度信息视为分形集合的度量。A. Choudhury等^[109]基于字典学习技术提出了一种细节增强的新方法。在边缘分析的基础上给出了待增强细节块的自适应增强函数,并采用自适应正则化术语实现细节增强的同时抑制了噪声。K. Panetta等^[110]提出了一种非线性反锐化掩膜机制(NLUM)实现图像的细节增强,可在无任何图像内容先验知识的情况下实现细节信息的有效增强。Wang等^[111]提出了一种非均匀亮度图像的增强算法,在增强细节信息的同时有效地保护非均匀亮度图像的自然性。

A. Choudhury和G. Medioni^[112]基于改进后的边缘保护非局部均值滤波,提出了一种感知驱动自动锐化增强方法。然而,目前已有的图像增强方法不具有较好的自适应性。不同的图像需要设置不同的参数才能获得较好的增强效果,且在处理含噪图像时效果不太理想,无法有效地平衡抑制噪声和边缘细节增强这一对矛盾,增强的同时噪声也随之放大。

以上这些增强方法均是对图像全局进行处理,没有充分考虑到人眼的视觉注意机制。近年来,基于显著性的视觉注意模型的研究获得了国内外学者的广泛关注^[113]。这些模型的构建有的基于图像的底层信息^[114],有的则基于图像的高层目标检测或情境知识^[115]。然而,大多数的研究只针对单帧图像的视觉特征进行显著性检测^[116,117],而在运动图像序列或视频方面的显著性检测研究工作还相对较少^[118]。Guo等^[119]提出了一种有效的基于频谱分析的视频显著性检测方法,Kim等^[120]通过引入时间维度将图像的中央-周边显著性检测算子扩展到视频检测。

Mahadevan^[121]提出了一种类似的方法,将视频块建模为动态纹理来处理复杂的背景和运动的摄像机场景。Seo^[122]提出采用自相似性实现静态和时空显著性检测。Cui等^[123]通过进行时域的频谱分析,提出了另一种不同策略,只关注运动显著性信息。Hou^[124]提出度量特征稀疏性的方法,并在此基础上实现图像和视频的显著性检测。

上述研究方法在处理运动图像时,在增强细节信息的同时很容易引入新的噪声干扰。因而这就需要研究高效的增强算子,实现对运动图像的细节特征增强的同时有效地抑制噪声。考虑到基于多尺度几何分析的运动图像描述方法具有高精度的细节刻画能力,以及尺度内和尺度间的跨尺度相关性统计,因此基于这些技术可以构建自适应能力更强的增强算子,实现运

动图像的细节特征增强。另外,考虑到人眼所重点关注的是显著性较强的运动目标区域,因此,结合运动图像的时空特性以及最新发展的显著性检测技术,构建新的时空显著性检测算法,并在此基础上研究基于时空显著性的运动图像跨尺度自适应增强算法,可进一步提升增强效率,同时使得增强后的运动图像具有更好的视觉感知能力。

1.2.4 运动图像超分辨率重建研究现状

超分辨率重建(Super-resolution, SR)是指通过融合多帧相互间存在全局或局部位移、信息互补的低分辨率图像序列,以获取分辨率更高、质量更佳的图像、图像序列或视频的过程。超分辨率重建概念最早在 Tsai 和 Huang 的文章“*Multi-frame image restoration and registration*”中提出,并从此引起了人们的关注和深入研究,近十年一直是热门的研究方向。

目前超分辨率重建研究主要分为频率域方法和空间域方法两大类。频率域方法通过在频域内消除频谱混叠来提升图像分辨率。Tsai 和 Huang^[125]最早提出的基于傅立叶变换的卫星图像超分辨率重建方法是一种频率域方法,采用频率域逼近的策略对全局平移的多幅低分辨率图像进行超分辨率重建。然而,该方法的退化模型没有考虑模糊和噪声等因素,随后 Kim 等^[126]对该方法进行了改进,针对模糊、噪声干扰和全局平移等问题提出了图像序列的频率域递推重构算法。虽然频率域方法机理简单,但由于没有充分利用图像的先验信息,且仅适用于全局平移运动模式,因而具有一定的局限性。相对于频率域方法,空间域方法^[127]具有较强的灵活性。空间域的超分辨率重建主要分为单帧处理和多帧处理两种。

1. 基于单帧的超分辨率重建方法

单帧超分辨率重建方法主要分为基于插值的重建方法和基于学习的重建方法。基于插值的重建方法首先采用插值算法,将低分辨率图像像素点映射入高分辨率图像栅格中,然后进行去模糊和去噪处理,获得最终的重建图像。由于基于插值的方法没有充分利用多帧图像间的互补冗余信息为低分辨率图像提供新的图像信息,丢失的细节信息也不能被恢复,所以插值重建后的图像视觉效果不够理想。

基于稀疏表示和学习机制的超分辨率重建算法是近些年发展起来的。Dong 等^[128,129]通过综合利用局部和非局部稀疏性约束,提出了一种更为精确的集中化稀疏表示模型,并将其应用于图像的重建领域,获取了较好的效果。Yang 等^[130]提出了一种基于学习的超分辨率重建框架,利用图像的稀疏表示和支持向量回归模型进行自学习实现重建。Zhou 等^[131]通过字典学习提出了一种基于稀疏表示的超分辨率重建方法。Gao 等^[132]提出了一种基于稀疏邻域嵌入的超分辨率重建方法。Chang 等^[133]提出了基于流形学习的超分辨率重建算法,分别将高分辨率图像和低分辨率图像视为高维空间流形和低维空间流形,根据流形邻域在低维和高维空间的一致性,由低维空间结构重建高维空间结构。

近年来,随着压缩感知理论^[134]的兴起,在学习类的方法中还衍生出了一种基于压缩感知的超分辨率重建方法^[135,136]。这类方法首先需要学习和训练样本图像集合,然后利用该样本集合重建图像。为了取得较好的重建效果,需要构建一个足够大的样本数据集,因而基于学习的超分辨率重建方法往往因训练时间较长而导致重建实效性不高。基于学习的超分辨率重建方法在训练图像的内容与待重建图像的内容相似时往往能取得较好的重建效果,如文字处理、人脸识别等。