

# 红外成像制导 图像处理技术

刘刚 张丹 著



科学出版社

# 红外成像制导图像处理技术

刘 刚 张 丹 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了红外成像制导武器系统攻击目标过程中所要求的红外图像降噪与分割、红外空中弱小运动目标检测、红外运动目标跟踪和红外运动目标关键攻击部位识别等红外成像制导图像处理理论、方法和应用技术,涵盖了红外图像应用中涉及的核心内容。全书共8章,包括红外成像制导的概念、多分辨率分析理论、红外成像制导图像降噪和增强、基于模糊理论的红外图像分割、红外弱小运动目标检测、红外运动目标跟踪、红外目标关键攻击部位识别、红外成像制导图像处理的加速技术等内容。

本书内容是作者多年的研究成果,书中所有模型和算法都经过实验验证,可以直接应用于红外成像制导图像处理领域。本书可供计算机科学与技术、控制科学与工程、信息与通信工程等学科中从事红外图像处理与分析技术的研究人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的研究生教材。

### 图书在版编目 CIP 数据

红外成像制导图像处理技术 / 刘刚,张丹著. —北京:科学出版社,2016  
ISBN 978-7-03-048687-5

I. ①红… II. ①刘…②张… III. ①红外制导-图像处理 IV. ①V249.32  
②TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 129589 号

责任编辑:张海娜 高慧元 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年7月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年7月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:315 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

红外成像制导技术是当今世界各国竞相发展的精确制导技术之一,更是一种使武器系统威力倍增的高精尖技术。红外成像制导能够识别目标类型及其要害部位,具有较强的抗干扰能力和全天候作战能力,是现代各种武器系统制导技术发展的趋势。从 20 世纪 90 年代以来爆发的几场局部战争看,利用红外成像制导技术的精确打击武器呈不断发展之势,更新加速,使用量急增。伊拉克战争中美军使用了 800 余枚“战斧”式巡航导弹和 2 万余枚精确制导炸弹,占总弹药量的 80% 以上,为历次战争之最。在分析红外成像制导技术体制、工作原理及其特点的基础上,积极寻求提高红外成像制导的精确打击武器的技战性能,对制定未来作战攻守策略具有十分重要的意义。

红外成像制导的特点为:①灵敏度高,制导精度高,穿透能力强,作用距离远,探测器的瞬时视场和跟踪视场大;②被动接收目标及背景的热辐射,不易被探测,抗干扰能力强;③与微处理器相结合,发射后可以自动搜索目标,并且可以实现一定程度的“智能化”,如通过图像识别选择目标要害部位进行攻击,可全天候工作;④技术成熟,体积小,结构相对简单。

智能化图像信息处理技术,特别是红外目标自动检测、识别和跟踪算法,是红外成像制导的关键技术之一,是红外成像制导武器系统技术含量最高的部分,同时也是红外成像制导技术研究的热点和难点。

本书对红外成像制导武器系统攻击目标过程中所要求的红外图像降噪与分割、红外弱小运动目标检测、红外运动目标跟踪、红外运动目标识别、红外与可见光图像匹配等关键图像处理技术进行较为深入的阐述。

本书共 8 章。第 1 章概述了红外成像制导中图像处理的关键技术及研究现状、本书的主要理论依据和内容安排。第 2 章给出了红外导引系统的发展概况、功能、基本构成和常用的红外成像制导图像处理技术。第 3 章阐述了贯穿本书各章节处理所用到的小波变换、Contourlet 变换和非下采样 Contourlet 变换理论,从分析红外成像系统噪声特性着手,分别在小波域、Contourlet 域和非下采样 Contourlet 域提出了红外图像的降噪和增强算法。第 4 章在分析红外图像特性的基础上,将模糊理论引入到分割问题中,重点介绍了基于模糊 C 均值聚类的红外图像分割算法并分析了其存在的问题,提出了有针对性的改进方法。本章最后通过扩展单阈值分割算法,给出了红外图像的双阈值分割算法。第 5 章重点阐述了红外弱小运动目标的检测方法。首先给出了红外小目标序列图像模型,然后分别在小波域、

Contourlet 域、非下采样 Contourlet 域和空间域提出了六种检测算法,并利用改进的管道滤波方法进行序列跟踪。最后对红外弱小目标检测过程进行了理论分析。第 6 章首先阐述了运动目标跟踪的基础理论、图像跟踪所用到的视觉特征;然后重点讨论了粒子滤波的基本理论,并在此基础上分析了经典粒子滤波所存在的问题,从改进粒子重采样策略出发,提出了基于遗传重采样的粒子滤波算法;最后,针对红外飞机目标溢出视场后关键攻击部位的跟踪方法进行了讨论。第 7 章讨论了红外飞机目标关键攻击部位的识别技术。首先介绍有形状目标的特征描述方法;然后以红外成像制导空空导弹攻击战斗机为例,重点阐述了关键攻击部位的识别方法,在该问题中,还讨论了利用序列图像给出稳定关键攻击部位的方法;最后,给出了基于亚像素技术的红外目标定位方法。第 8 章在对单指令流多数据流技术、基于 OpenMP 的并行化技术、基于 CUDA 模型的 GPU 技术进行分析的基础上,讨论常用红外图像处理算法,如 LoG 算子、模板匹配、小波变换、模糊 C 均值聚类、粒子滤波等的加速技术。

本书内容是作者承担的有关航空科学基金(20070112001、20130142004)、河南省人力资源和社会保障厅博士后科研基金、洛阳市科技发展计划(1402004A)、河南科技大学博士科研启动基金等项目研究成果的总结。除作者外,参与本书内容构建工作的还有刘新向、王光宇、于宁宁等。

在本书的撰写过程中,参考和引用了一些文献的观点和素材,在此向这些文献的作者表示衷心的感谢。

需要指出的是,本书针对实际领域的特殊性问题,提出了一系列解决的思想和方法。通过大量实拍红外图像进行实验,证明了所提方法的有效性和科学性,但是这些方法和思想仍需要在今后的工作中进一步检验和完善。本书所体现的基本思想对于具有红外成像制导方式的空空、舰空、地空、空地、巡航等导弹的目标探测、识别和跟踪以及反导系统的检测、预警和拦截武器的制导,均具有一定的参考价值。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者和专家批评指正。

作 者

2016 年 5 月于洛阳

电子邮箱:lg19741011@163.com

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 红外成像制导图像处理的关键技术及研究现状	2
1.3 本书的主要理论依据	8
1.4 本书的结构和内容安排	10
参考文献	11
第 2 章 红外导引系统概述	15
2.1 引言	15
2.2 红外导引系统发展概况	15
2.2.1 红外导引系统发展简史	15
2.2.2 主要发展阶段	16
2.2.3 国外红外导引系统发展	17
2.2.4 我国红外导引系统发展	19
2.3 红外导引系统功能	19
2.4 红外导引系统的基本构成	21
2.4.1 红外探测系统	21
2.4.2 跟踪稳定系统	22
2.4.3 目标信号处理系统	22
2.4.4 导引信号形成系统	23
2.5 常用红外成像制导图像处理技术	23
2.5.1 图像预处理	24
2.5.2 图像分割	26
2.5.3 特征提取	28
2.5.4 目标识别	29
2.5.5 目标跟踪	32
2.5.6 误差信号提取	36
2.6 图像处理计算机	36

2.6.1	关键器件选择	36
2.6.2	系统结构设计	37
2.7	小结	38
	参考文献	38
<b>第3章</b>	<b>红外成像制导中的图像降噪和增强</b>	<b>39</b>
3.1	引言	39
3.2	小波变换理论	39
3.2.1	小波变换概念	39
3.2.2	多分辨率分析	41
3.2.3	Mallat 算法和图像的离散小波变换	43
3.3	基于最大后验概率准则的小波域降噪和增强算法	46
3.3.1	常用的小波域降噪算法	46
3.3.2	MAP 准则下小波系数萎缩因子的确定	48
3.3.3	小波系数萎缩因子的修正	49
3.3.4	最大后验概率准则降噪过程描述	50
3.3.5	仿真与分析	50
3.4	Contourlet 变换理论	54
3.4.1	拉普拉斯金字塔	55
3.4.2	方向滤波器组	56
3.4.3	Contourlet 变换过程	58
3.5	Contourlet 域图像降噪和增强算法	59
3.5.1	最大后验概率准则的 Contourlet 域推广	59
3.5.2	Contourlet 域降噪过程	60
3.5.3	仿真与分析	61
3.6	非下采样 Contourlet 变换理论	66
3.7	非下采样 Contourlet 域混合统计模型红外图像降噪	66
3.7.1	非下采样 Contourlet 域混合统计图像降噪模型	66
3.7.2	算法流程	67
3.7.3	实验与分析	68
3.8	小结	71
	参考文献	72
<b>第4章</b>	<b>红外成像制导中的图像分割</b>	<b>74</b>
4.1	引言	74

4.2	基于模糊理论的图像处理	74
4.3	模糊 C 均值聚类图像分割	77
4.4	基于邻域加权的模糊 C 均值聚类分割	79
4.4.1	初始聚类中心的确定	79
4.4.2	图像邻域空间信息的利用	79
4.4.3	基于样本加权的模糊 C 均值聚类算法	80
4.4.4	算法过程	81
4.4.5	仿真与分析	82
4.5	基于核距离邻域加权的模糊 C 均值聚类分割	86
4.5.1	算法原理	86
4.5.2	仿真与分析	88
4.6	红外图像双阈值分割算法	88
4.6.1	利用最大类间方差法的双阈值分割	89
4.6.2	基于峰值合并的多阈值提取及其改进	91
4.6.3	阈值范围的选取	92
4.7	加力红外目标图像的分割算法	93
4.7.1	边缘提取算法及选择	93
4.7.2	基于边缘和子区域分割算法	95
4.8	区域选择与填充	96
4.9	红外图像序列的分割	98
4.10	小结	99
	参考文献	99
<b>第 5 章</b>	<b>红外成像制导中的弱小运动目标检测</b>	<b>101</b>
5.1	引言	101
5.2	红外弱小目标图像序列模型	102
5.3	基于尺度间系数相关性的小波域小目标检测	104
5.3.1	噪声、背景和目标的波系数特性分析	104
5.3.2	尺度间归一化相关系数的计算及阈值设定	105
5.3.3	考虑小目标面积的单帧图像分割	106
5.3.4	管道滤波序列图像检测	106
5.3.5	算法过程	107
5.3.6	仿真与分析	107
5.4	基于小波高频系数直接映射的小目标检测	110



5.4.1	基于系数能量的背景抑制 .....	111
5.4.2	小波高频系数线性映射及关联 .....	111
5.4.3	算法过程 .....	112
5.4.4	仿真与分析 .....	113
5.5	基于尺度间相关性的非下采样 Contourlet 变换小目标检测 .....	117
5.5.1	红外小目标图像的非下采样 Contourlet 变换 .....	117
5.5.2	小波域尺度间系数相关性到非下采样 Contourlet 域的推广 .....	118
5.5.3	算法过程 .....	118
5.5.4	仿真与分析 .....	119
5.6	基于高频能量像的非下采样 Contourlet 变换小目标检测 .....	121
5.6.1	红外复杂背景抑制 .....	122
5.6.2	BP 神经网络小目标检测 .....	124
5.6.3	实验与分析 .....	124
5.7	一种基于非下采样 Contourlet 变换和二维属性直方图最大熵分割的 红外空中小目标检测 .....	129
5.7.1	非下采样 Contourlet 域红外复杂背景抑制 .....	130
5.7.2	基于二维属性直方图最大熵的红外小目标图像分割 .....	130
5.7.3	算法步骤 .....	133
5.7.4	实验与分析 .....	133
5.8	基于帧间累加与 SUSAN 算子的小目标检测 .....	141
5.8.1	基于巴特沃思高通滤波的背景抑制 .....	141
5.8.2	相邻帧间的灰度膨胀累加 .....	142
5.8.3	基于 SUSAN 算子的小目标检测 .....	143
5.9	红外弱小目标检测过程的理论分析 .....	145
5.9.1	理论推导所用到的假设检验理论 .....	145
5.9.2	检测概率与虚警概率指标分析 .....	146
5.10	小结 .....	152
	参考文献 .....	152
<b>第 6 章</b>	<b>红外成像制导中的运动目标跟踪 .....</b>	<b>155</b>
6.1	引言 .....	155
6.2	运动目标跟踪基础理论 .....	156
6.2.1	贝叶斯滤波理论 .....	156
6.2.2	卡尔曼滤波器 .....	157

6.2.3 粒子滤波理论 .....	158
6.3 图像跟踪所用到的视觉特征 .....	162
6.4 基于遗传重采样的粒子滤波目标跟踪方法 .....	163
6.4.1 粒子滤波算法存在问题 .....	163
6.4.2 利用遗传算法进行粒子重采样 .....	163
6.4.3 遗传重采样粒子滤波算法过程 .....	164
6.4.4 仿真与分析 .....	165
6.5 红外飞机目标溢出视场后关键攻击部位跟踪 .....	170
6.5.1 目标溢出视场的判断准则 .....	171
6.5.2 局部跟踪点的选择和关键攻击部位的确定 .....	172
6.6 小结 .....	173
参考文献 .....	174
<b>第7章 红外成像制导中的目标识别</b> .....	<b>176</b>
7.1 引言 .....	176
7.2 目标分类与识别的特征概述 .....	177
7.2.1 目标识别的常用图像特征 .....	178
7.2.2 不变性特征的基本概念 .....	180
7.2.3 目标不变性特征选择 .....	180
7.3 飞机目标及其背景的红外特性 .....	181
7.3.1 飞机的红外特性 .....	181
7.3.2 背景辐射 .....	183
7.4 红外飞机目标飞行姿态的判别 .....	183
7.4.1 目标几何不变矩特征提取 .....	184
7.4.2 目标归一化转动惯量及组合矩特征提取 .....	185
7.4.3 飞行姿态的判别 .....	186
7.5 基于飞行姿态的飞机关键攻击部位选择 .....	188
7.5.1 机轴与机翼的判定 .....	188
7.5.2 利用几何关系计算驾驶舱关键攻击部位 .....	189
7.5.3 发动机关键攻击部位标定 .....	190
7.5.4 序列图像的关键部位识别 .....	191
7.6 基于亚像素技术的红外目标定位 .....	191
7.6.1 亚像素定位技术 .....	192
7.6.2 远距离红外目标的亚像素定位 .....	193

---

7.6.3 有形状红外目标的亚像素定位 .....	195
7.7 成像段制导信息的获取 .....	200
7.8 小结 .....	201
参考文献 .....	202
<b>第8章 红外成像制导图像处理的加速技术</b> .....	<b>204</b>
8.1 引言 .....	204
8.2 利用单指令流多数据流指令集加速红外图像处理算法 .....	205
8.2.1 SIMD 指令集概述 .....	206
8.2.2 利用 SIMD 指令加速红外图像处理算法 .....	208
8.2.3 基于 SIMD 硬件指令加速的并行光线跟踪算法 .....	211
8.3 利用多核技术加速红外图像处理算法 .....	217
8.3.1 多核多线程技术 .....	217
8.3.2 OpenMP 多线程编程 .....	219
8.4 基于图形处理器的红外图像处理算法加速 .....	221
8.4.1 GPU 通用计算模型 .....	223
8.4.2 利用 GPU 加速的小波变换 .....	225
8.4.3 利用 GPU 加速的 FCM 聚类算法 .....	231
8.4.4 利用 GPU 加速的粒子滤波算法 .....	235
8.5 小结 .....	239
参考文献 .....	239

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

精确制导技术是利用自身传感器获取或外部输入的信息,探测、识别和跟踪目标,导引和控制武器准确命中目标乃至目标要害部位的制导技术,广泛应用于导弹、航空炸弹、炮弹、鱼雷等武器系统中。它是精确制导武器的核心技术,支持着精确制导武器的远距离高精度作战、夜间作战、全天候作战、复杂战场环境下作战,能够确保精确制导武器在复杂战场环境中既准确命中选定的目标及其要害部位,又尽可能减少附带的破坏。

目前,可供精确制导系统利用的探测技术主要有红外成像、毫米波雷达和激光雷达等<sup>[1]</sup>。相比于其他探测装置构成的制导系统,红外成像制导武器系统具有明显的优势<sup>[2]</sup>:

- (1)环境适应性优于可见光,尤其是在夜间和恶劣气候下的工作能力;
- (2)隐蔽性好,一般都是被动探测,比雷达和激光探测安全,不易被干扰;
- (3)与可见光相比,红外辐射更容易穿透云、雾、烟、尘埃,探测距离更远;
- (4)红外探测系统是根据目标和背景之间的温差进行探测的,因此识别伪装目标的能力优于可见光。

红外成像制导制导精度高,抗干扰能力强,具备全天时工作能力,已经广泛应用于各种精确制导武器系统。红外成像制导由红外点源制导技术发展而来<sup>[3-5]</sup>。由于红外点源制导技术采用以调制盘调制为基础的信息处理,造成无法排除张角较小的点源红外干扰或复杂的背景干扰,也没有区分多目标的能力,而红外成像制导能够克服这些缺点。光电对抗和红外技术的进步,推动了红外成像制导技术的发展<sup>[6]</sup>。红外成像制导技术是利用目标与周围环境的红外辐射图像来实现自动导引的一种制导方法。它探测的是目标和背景间微小的温差或自辐射温差所引起的热辐射分布图像,目标形状的大小、灰度分布和运动状况等物理特征是它识别的理论基础。此外,由于红外成像器与图像信息处理专用微处理机相结合,利用数字图像处理方法分析图像,由高速图像信号处理机对所摄的图像进行实时处理,借以识别跟踪目标,所以具有一定的智能化。目前,在这方面研究较为领先的是以美国为首的发达国家,在科索沃战争、阿富汗战争和伊拉克战争中,美军的重大攻势都是在夜间实施的,得益于红外成像武器的大量运用,其攻击准确性令世界为之瞠目。

我国在这方面的研究起步较晚,但近年来,随着经济和相应领域技术的发展,以及大量人力与财力的投入,取得了很多新进展。

红外成像制导从大的方面来说存在三个关键技术:

- (1)实时红外成像技术,关键是多元探测器和扫描技术;
- (2)稳定伺服技术,关键是稳定技术;

(3)智能化图像信息处理技术,关键是红外目标自动检测和识别算法,它是红外成像制导武器技术含量最高的部分,同时也是红外图像处理领域中历史悠久且又充满活力的研究课题<sup>[7]</sup>。

针对红外目标自动检测、识别和跟踪的红外成像制导信息处理系统的组成原理框图如图 1.1 所示,主要由成像系统和图像目标自动识别系统两部分组成。

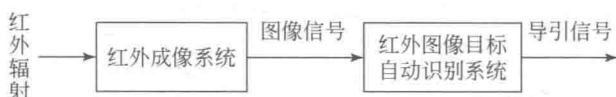


图 1.1 红外成像制导信息处理系统原理框图

目前,红外成像目标自动检测和识别技术已经成为国防科技研究的热门领域,并被广泛应用于各种红外成像制导武器系统,针对该问题展开深入研究对加强我国国防现代化建设具有积极的意义。

## 1.2 红外成像制导图像处理的关键技术及研究现状

本节以红外成像制导空空导弹攻击目标的过程为背景,阐述红外成像制导图像处理的关键技术,其结论大部分适用各类红外成像制导武器系统。针对红外成像空空导弹,其红外成像制导信息处理系统主要由光学系统、红外探测器、读出电路、放大电路、A/D转换、图像处理机等组成,其结构如图 1.2 所示。

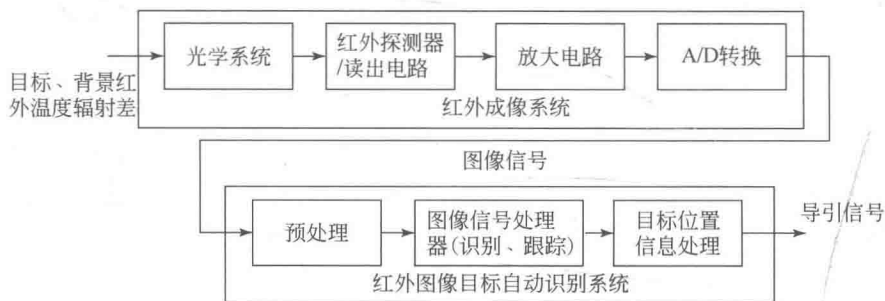


图 1.2 红外成像制导信息处理系统的主要结构框图

红外成像制导空空导弹发射前由载机搜索、确定被攻击目标的位置后,立即用

导弹上的导引头跟踪并锁定目标。导弹发射后,光学系统接收场景中目标与背景的红外辐射,并将它们成像到红外探测器上,红外探测器进行光电转换,形成红外图像。图像处理机对该红外图像进行处理,区分目标信息、背景信息,识别出被攻击目标并抑制假目标的干扰,给出目标相对导引头光轴的方位与俯仰夹角,弹上制导控制系统据此信息控制导弹飞向目标。该过程也被称为“发射后不管”的制导方式。

当目标与红外成像系统相距很远,其几何成像小于传感器的一个分辨单元时,此时目标称为点目标。理论和实践表明,点目标经光学系统后成的像是一个亮的弥散圆斑而非一个几何点,对目前常用的小于  $30\mu\text{m}$  像素间距的红外焦平面器件,点目标像的弥散圆斑通常超过  $2\times 2$  像素。目标成像尺寸计算应考虑理论成像尺寸和弥散两个因素。对理论成像尺寸较大的面目标,忽略弥散的影响,根据物像映射关系直接求出成像尺寸;对点目标,忽略理论成像尺寸,由弥散圆斑确定成像尺寸<sup>[8]</sup>。在导弹接近目标过程中,存在一个临界距离。当弹目距离大于临界值时,目标成像是一大小不变的近似圆斑;而距离小于临界值时,目标的成像尺寸、面积将随距离减小而增大。

在远距离跟踪阶段,导弹与目标的相对距离很大,目标在成像系统中所成的像只是孤点或几个像素组成的斑点,在视场中存在的时间很长,信号强度弱且易被杂波湮没,此时若能稳定检测出目标,对于增大作战距离和增加反应时间,提高己方的生存概率具有重要的意义。随着导弹与目标之间的相对距离的减小,目标在红外成像系统中所成的像逐渐由斑点目标变为多个像素所组成的图像。当导弹与目标的相对距离缩小到一定值时,红外成像系统的焦平面上的目标像素数急剧增加,目标图像的细节更加丰富。此时,要求导引头根据目标形状识别目标类型并确定目标的关键部位进行攻击。在近距离目标充满视场阶段,导弹与目标距离非常接近,目标图像完全充满整个视场,导引头进入盲区工作距离。由于受导弹机动能力的限制,该过程要求以先前获得的攻击部位为指导,在导引头失去对导弹的控制能力之前,确定目标的最终攻击方位。

红外波段的辐射波长比无线电波短、比可见光长,因而红外图像的空间分辨力比雷达高、比可见光低。由于成像器件本身存在的缺陷和环境因素的影响,红外图像本身具有细节模糊不清、对比度弱等特点,所以在对目标进行检测与识别前,需要对红外图像进行降噪和增强等预处理。由于在成像机理上存在本质的差异,红外图像相对于可见光图像有着如下不同的特点:

(1) 红外图像不受能见度的影响,红外成像系统具有在恶劣阴暗环境条件下工作的能力,可全天时昼夜工作,而可见光成像则不行。红外辐射穿透烟雾和大气的的能力比可见光强,能克服部分视觉上的障碍而探测到目标,因此红外成像系统具有较大的作用范围和很强的抗伪装干扰能力。另外,当太阳光照射时,目标的可见光

图像可能会受到阴影的影响,而红外图像则无此缺点。

(2)在好的光线和可视条件下,可见光图像相对红外图像有较好的颜色对比度和细节分辨率,这主要表现为边缘的差异和纹理特征的不同。可见光图像反映场景的空间分辨率,灰度信息较为丰富,物体棱角分明,立体感较强,其边缘较陡且结构复杂。红外图像反映场景的温度分辨率,它实质上是辐射强度分布图,灰度层次较少,边缘相对平滑,无立体感。可见光图像能够较好地反映物体表面的纹理细节并利用其判别目标,而红外图像则很难直接利用纹理信息。

(3)外界环境的随机干扰和热成像系统的不完善,给红外图像带来多种多样的噪声,这些分布复杂的噪声使得红外图像的信噪比相对于可见光图像要低。此外,由于红外探测器各探测单元的响应特性不一致等原因,造成红外图像的非均匀性,这主要体现为图像的固定图案噪声、串扰、畸变等。

(4)由于大气对不同的红外波段辐射的吸收与随机散射程度不同,不同波段的红外图像反映同一场景的灰度信息是不同的。利用多波段红外图像进行融合处理,可得到更多的有效信息。

(5)实际景物红外图像的像素之间存在较大的相关性,目标的红外图像含有较多的同质区,像素的灰度具有良好的空间相关性。红外图像像素灰度值的动态变化范围不大,很少充满整个灰度级空间,绝大部分像素集中于某些相邻的灰度级范围,这些范围以外的灰度级上则没有或只有很少的像素,而可见光图像像素的灰度值则分布于几乎整个灰度级空间。

综合以上分析,红外成像制导中图像处理关键技术的研究热点和难点主要可以归纳为以下几个方面:

#### 1) 红外图像降噪问题<sup>[9-14]</sup>

红外图像噪声丰富,而噪声造成图像退化、图像特征被掩盖,直接影响图像分割、特征提取等后续工作的准确性,因此,抑制红外图像噪声、提升图像质量是图像处理和分析的前提。许多算法被用于图像降噪,如模糊域滤波、加权中值滤波和混合中值滤波、小波域滤波等。

#### 2) 红外图像目标分割问题<sup>[15-19]</sup>

传统的红外目标分割的方法有很多,但这些方法一般都局限于一定的应用环境。目标分割的有效性依赖于对目标特性、背景特性以及应用环境的先验知识,取决于目标及背景特性的鉴别能力。总的来说,单帧图像中目标分割的方法主要有基于全局灰度门限的目标分割方法和基于局部门限的目标分割方法。

基于全局灰度门限分割方法假定图像中仅包含目标和背景两类,将图像中的像素按照灰度值属性的相似性或相近性划分成两类,使得具有相似或相近灰度值的像素归属为一类,不同灰度值属性的像素归属为不同类。全局灰度门限分割方法在全灰度范围内搜索一个最佳门限值,根据获取全局门限的不同准则,该方法又

可分为直方图分析方法、类别方差自动门限方法、模糊熵分割方法等。利用全局灰度门限进行目标分割是一种基本的分割方法,但由于实际图像的多样性,全局门限目标分割方法往往不能都获得理想的分割效果,因为该方法基本上都是针对二类问题的。基于局部门限的目标分割方法则将图像划分为若干子图像,然后再利用上述方法对子图像进行分割。

上述目标分割方法都是利用图像像素的灰度信息,但是图像具有多种属性,像素的灰度仅仅是图像的一种最基本的属性,只利用像素的灰度信息进行分割具有一定的局限性。利用图像的其他特征如边缘、二阶统计特性、纹理特征、分形特征等,也可以进行目标分割。

### 3) 远距离红外弱小运动目标的检测<sup>[20-22]</sup>

在连续图像序列中,运动小目标的成像位置具有一定连续性,不会出现跳跃性变化,这是运动目标成像的时间特征。当图像背景复杂、目标湮没其中以及图像中存在大量噪声的情况下,小目标的检测与跟踪必须依赖目标的时间特性在图像序列中进行。

小目标检测算法按照进行检测和跟踪的顺序可划分为跟踪前检测(detection before track, DBT)方法和检测前跟踪(track before detect, TBD)方法。DBT方法是传统的目标识别算法。首先,在单帧图像中根据目标灰度信息检测目标,提供若干包含噪声在内的候选目标,再利用目标的时间特性在图像序列中识别、跟踪目标。TBD方法同时利用目标的灰度信息和时间信息,直接对原始序列图像中大量的候选目标轨迹同时进行评估,从中排除噪声,选择目标。TBD方法主要包括假设检验方法、三维匹配滤波器、动态规划方法、基于投影变换的弱小目标检测等。TBD方法主要应用于目标信噪比较低,单帧图像检测产生大量虚警的情况。该类算法往往较为复杂,运算量巨大,难于实现实时目标检测。

### 4) 红外图像运动目标的跟踪

当目标被检测或识别出来后,需要对目标进行实时图像跟踪。图像跟踪是一个不断发展的研究方向,新的方法不断产生。在基于图像的目标跟踪中,一般根据表达目标的信息,通过推理确定其在图像中的位置和形状参数。下面根据跟踪算法所采用的定位目标的方法对其进行分类:

(1) 概率跟踪方法: 概率跟踪方法在贝叶斯滤波框架下将目标跟踪问题转换为推理目标状态(如位置、速度)后验概率密度的过程。该方法首先选择状态变量,通过状态转移方程进行预测,然后利用最新观测值对预测作出修正。当状态转移方程和观测方程为线性且过程噪声和观测噪声均为高斯分布时,常规的卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)能给出最优解;当状态方程和观测方程为非线性时,扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)或者无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)<sup>[23-25]</sup>能求解后验概率。但是,在实际场景中,状态方程和观测方程往



往都是非线性的,同时噪声也是非高斯的,而且状态分布是多模态的,在这种情况下,常常利用近似方法求解后验概率密度,一个很好的方法就是粒子滤波(particle filter, PF)。

(2)确定性跟踪方法:该方法首先通过手动或目标检测得到目标模板,然后建立代价函数来表达目标候选位置和目标模板的相似程度,接下来利用最优化方法找到代价函数的最大值,认为该值对应的位置就是目标在图像序列中的位置。确定性跟踪方法本质上是一个优化问题。最典型的确定性跟踪方法是模板匹配算法。在模板匹配算法中,运动目标的检测是在相关运算中完成的。该算法将所要匹配的模板与图像中所有未知的物体进行比较,求其相关量,从而确定目标的位移量。相关算法不要求图像有很高的对比度,对目标部分遮掩、复杂背景下的跟踪具有其他算法不可比拟的优势。近几年来,图像相关跟踪在红外成像跟踪系统以及巡航导弹中获得了成功应用<sup>[26-32]</sup>。美国的 SLAM-ER、AGM-158,英国的“风暴前兆”等空地导弹,美国正在研制中的“战斧”Block IV 改进型等导弹上使用的就是基于模板匹配的自动目标跟踪方法。这些武器所使用的算法由制导计算机提供成像传感器的方位,并根据此估计此刻目标的位置,然后使用这些数据修正预先制定的内部基准图像,使之对应探测器的瞄准线,再将实时获取的图像和预先制定要打击目标的经过修正的基准图像进行匹配,最终将匹配的结果传送到制导系统单元,自主地将导弹导引到目标。从目前成功应用来看,基于模板匹配的自动目标识别算法在未来很长一段时间内仍会受到重视。

基于均值移位(mean shift, MS)的跟踪方法<sup>[33-35]</sup>是确定性跟踪方法的另一典型代表。在这类跟踪算法中,代价函数选择为目标模板与候选位置颜色直方图之间的距离,MS 跟踪方法用来搜索代价函数的最大值。MS 跟踪方法简单有效,在一些场景应用中取得了较满意的跟踪效果。但是,通常的 MS 跟踪方法假定目标模板在跟踪过程中不变,当目标颜色发生变化时,该跟踪算法往往会产生偏差甚至丢失目标。Tu 等利用期望最大化算法在线更新颜色直方图,提高了 MS 跟踪方法的精度和可靠性<sup>[36]</sup>。

概率跟踪方法和确定性跟踪方法各有优缺点。确定性跟踪方法计算简单,但是容易陷入到局部最优。此外,确定性方法容易受到干扰的影响,不能从失败跟踪中恢复,不适合复杂场景的跟踪。目前,确定性跟踪算法不是研究跟踪问题的主流方法。概率跟踪方法,特别是 PF 方法,由于能够处理应用场景的非线性和非高斯性,特别适合图像跟踪领域。

##### 5) 红外运动目标的特征提取和识别

在红外图像的自动目标识别系统中,目标的特征提取与识别存在着特殊的技术难点。首先是信号比较单一,只能通过图像中目标的红外热辐射特性表现出来的信息进行鉴别;其次,在实际情况中,当方位、尺度、灰度和对比度发生变化时,提