

红外偏振图像融合方法研究进展

郑进江^{1,2}, 李晓霞^{1,3,4*}, 赵大鹏¹, 陈熠¹, 吴梦醒¹

(1. 国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037;

2. 陆军兵种大学, 安徽 合肥 230037;

3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

4. 安徽省先进光电探测与末端防御技术重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 红外偏振图像融合能够充分利用场景的偏振信息, 弥补红外强度图像在描述场景轮廓边缘、纹理细节等高频信息上的劣势, 在目标探测识别、抑制背景噪声和反伪装方面具有独特优势。文章分别从单一算法图像融合和多算法组合图像融合两方面综述了红外偏振图像融合技术的研究进展, 分析了典型算法的设计思路, 归纳了各算法的优缺点。针对当前红外偏振图像融合以单一算法为主流, 多算法组合为发展趋势的特点, 展望了其未来可能的发展方向。

关键词: 图像融合; 红外偏振; 单一算法; 多算法组合

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

Review on infrared polarization image fusion methods

ZHENG Jin-jiang^{1,2}, LI Xiao-Xia^{1,3,4*}, ZHAO Da-Peng¹, CHEN Yi¹, WU Meng-Xing¹

(1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037 China;

2. Army Military University, Hefei 230037, China;

3. Advanced Laser Technology of Anhui Province Laboratory, Hefei 230037, China;

4. Anhui Province Key Laboratory of Advanced Optoelectronic Detection and Terminal Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Infrared polarization image fusion can fully utilize the polarization information of the scene, compensate for the disadvantage of infrared intensity images in describing high-frequency information such as scene contour edges and texture details, and has unique advantages in target detection and recognition, background noise suppression, and counter camouflage. The article summarized the research progress of infrared polarization image fusion technology from two aspects: single algorithm image fusion and multi-algorithm combination image fusion. It analyzed the design ideas of typical algorithms and summarized the advantages and disadvantages of each algorithm. Based on the current trend where single algorithm serves as the mainstream and multi-algorithm combination as the development trend for infrared polarization image fusion, this paper anticipates its potential future development direction.

Key words: image fusion, infrared polarization, single algorithm, multi algorithm combination

引言

图像融合是通过算法将同一场景不同来源或不同时刻的两幅或多幅图像融合为一幅图像, 它利用图像之间在时间和空间信息的相关性和互补性, 使融合结果能够更全面、更准确地反映场景的真实

面貌, 从而提升人类视觉系统和计算机对图像识别的准确度。

红外强度图像反映了场景的辐射能量分布情况, 当目标与背景具有一定温差或辐射能量差异时, 可以利用图像亮暗分布从背景中检测出目标。

收稿日期: 2024-12-12, 修回日期: 2025-11-02

基金项目: 综合研究项目 (KY23N014)

Foundation item: Supported by the Comprehensive Research Project (KY23N014)

作者简介 (Biography): 郑进江 (1993-), 男, 安徽合肥人, 硕士, 主要从事光电对抗技术方面的研究, E-mail: 3542755412@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: lxxhong@163.com

Received date: 2024-12-12, **revised date:** 2025-11-02

但是当目标与背景温度相当、红外辐射能量差异较小时,往往难以有效检测或识别目标。新型红外伪装、红外诱饵及红外隐身等技术能够显著降低或改变目标的红外辐射强度特征,减小目标与背景的红外辐射差异,使基于强度信息的传统探测技术面临巨大挑战。而目标/背景的红外偏振信息在温差不大时仍然具有较大差异,红外偏振图像能够很好的抑制背景噪声,从而发现目标。

为了完整描述场景的红外辐射特征,可以采用图像融合技术。将红外强度图像和偏振图像进行恰当融合,实现两种红外特征信息的互补,从而提高红外探测的准确性。

近年来,在红外偏振图像融合领域,涌现出了许多融合算法。本文主要对当前的红外偏振图像融合算法进行归纳和综述,分析典型算法的特点,展望其发展方向,以期对相关研究提供借鉴。

1 背景知识

1.1 偏振成像机理

依据菲涅尔反射定律,自然光经过光滑表面反射后成为部分偏振光。与可见光类似,红外波段的反射光具有偏振特性。因此,根据能量守恒和基尔霍夫辐射定律,物体自身热辐射也具有偏振特性。在红外偏振成像过程中,通常用斯托克斯矢量(S_0, S_1, S_2, S_3)来描述光的偏振态。其中, S_0 表示入射光的总光强, S_1 表示入射光水平偏振方向的光强, S_2 表示入射光 45° 偏振方向的光强, S_3 表示入射光圆偏振的光强。通常入射光为自然光或部分偏振光,直接旋转偏振片得到的并不是该偏振方向的强度,还包括其余方向的强度,因此需要进一步计算。如式(1)所示,可以解算出入射光的斯托克斯参量。其中, $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$ 分别表示偏振片旋转 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时得到的强度值; I_R 和 I_L 分别是旋转波片得到的右旋偏振光和左旋偏振光的强度。

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ |I_0 - I_{90}| \\ |I_{45} - I_{135}| \\ |I_L - I_R| \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过斯托克斯参量能够计算出入射光的偏振度(Degree of Polarization, DOP)、线偏振度(Degree of Linear Polarization, DOLP)、偏振角(Angle of Polarization, AOP),计算方法如式(2)、(3)、(4)所示。

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2)$$

$$DOLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (3)$$

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (4)$$

自然界中一般圆偏振分量很小,因此,在实验中通常认为圆偏振分量为零,即斯托克斯矢量为($S_0, S_1, S_2, 0$)。

1.2 偏振成像系统

偏振成像系统经过几十年的发展,已经有了长足的进步。传统的偏振成像系统有分时型、分振幅型和分孔径型,它们的结构如图1所示。

分时偏振成像系统常通过在探测器前端配置可旋转的偏振片或者转盘上安装不同偏振方向的偏振片来实现,它属于偏振成像技术中较为成熟的一种应用方案。这种结构的优点在于设计简单,体积小,装调便利,获得图像不需要进行精确的配准就可用于计算。然而,该系统也存在一个显著缺点:无法在同一时间点捕获不同偏振态的图像,不适用于运动目标。其结构如图1(a)所示。

分振幅偏振成像系统利用偏振分光片将入射光线分割为四个独立路径,每路分别放置不同方向的偏振器件。这四束具有特定偏振方向的光线随后被导向四个独立的焦平面探测器。该系统的一大优势在于能够实时捕捉并区分不同偏振方向的

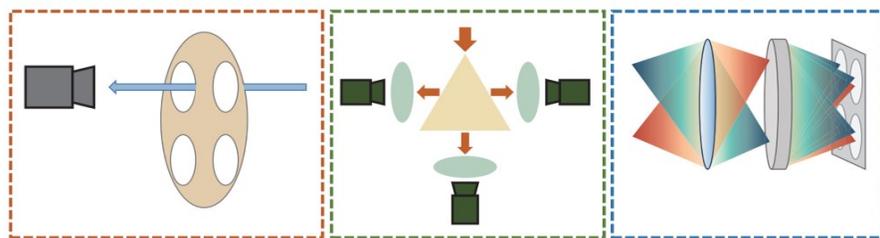


图1 传统偏振成像系统结构示意图^[1]: (a)分时型, (b)分振幅型, (c)分孔径型

Fig. 1 Schematic diagram of traditional polarization imaging system structure^[1]: (a)time-sharing type; (b)segmented amplitude type; (c)aperture type

信息,适合动态目标的检测。然而,其结构设计较复杂,体积相对庞大,后期图像配准难度较高。此外,采用四个独立的探测器不仅增加了制造成本,还导致了较高的能量损耗。其结构如图1(b)所示。

分孔径偏振成像系统采用重成像光学设计将入射光分为4束,同一个探测器平面分为4个区域,每个区域对应的是不同检偏角的感光单元,再通过计算得到目标的偏振信息。这种结构能够同时探测不同偏振态,可用于运动目标偏振成像,但系统设计复杂,且会造成分辨率下降。其结构如图1(c)所示。

随着微纳加工技术的进步,分焦平面偏振成像技术得到快速发展,是当前应用最为广泛的偏振成像系统。这种成像系统将微偏振元件直接集成在焦平面探测器上,每四个像素分别集成了 0° 、 45° 、 90° 及 135° 的微偏振片,组成一个成像单元,其原理如图2所示。这种结构设计具有体积小、重量轻、实时成像、环境适应性强等优点,是未来偏振成像系统的发展方向。但也存在成像器件加工工艺要求高,成本大等问题。

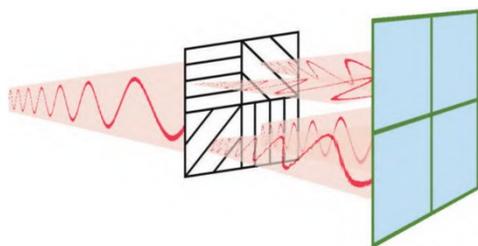


图2 分焦平面偏振成像系统^[1]

Fig. 2 Focus plane polarization imaging system^[1]

1.3 红外偏振图像融合机理

1.3.1 红外图像的特点

图3是不同方式得到的热水玻璃杯成像结果。红外成像技术能够将场景的热辐射强弱分布转化为人眼可见的灰度图像,即红外强度图像,如图3

(b)所示。与图3(a)的可见光图像相比,红外强度图像环境适应性更强,无需外界照明,能够获得场景整体温度分布,实现场景信息的全天候描述。但是红外强度图像也存在局限性:①光谱信息缺失;②在温差较小的复杂背景中空间分辨率低;③图像信息以代表亮度分布的低频信息为主,对比度低。因此,红外强度图像往往会丢失很多高频信息,导致场景纹理细节不清晰,轮廓边缘模糊,不利于目标探测和识别。

红外偏振成像是利用物体表面反射或发射光波的偏振信息进行成像,物体的材质、形状、粗糙度、表面纹理等性质对红外偏振特征有较大影响,而温度影响较小。一般情况下,人造目标与自然目标的红外偏振特征差异较大。因此,可以通过红外偏振图像在温差不大的场景中区分出人造目标和自然背景。如图3(c)和(d)所示,红外偏振图像能够同时获得场景的强度和偏振信息,物体边缘轮廓、表面取向、纹理等细节信息保持较好,对比度大,且能够获取目标表面的三维特征,有利于目标的探测和识别。但红外偏振图像能量损失较多,整体图像较暗,且缺少了重要的热辐射差异信息,增加了目标探测和识别的复杂度。

显然,红外强度图像以灰度分布等低频信息为主导;红外偏振图像则以细节等高频信息为主导,两者都无法全面、准确的描述场景的红外辐射特征。鉴于两者具有很强的互补性,将它们进行恰当融合,获取尽可能多的目标辐射信息,是一种行之有效的途径。

1.3.2 红外偏振图像融合层级结构

红外偏振图像融合是通过算法将同一场景的红外强度图像和偏振图像融合为一幅图像,更全面准确地反映场景的真实面貌。根据融合阶段,可以划分为三个层次^[3],如图4所示,包括以像素为处理单元的像素级融合,以特征信息为对象的特征级融

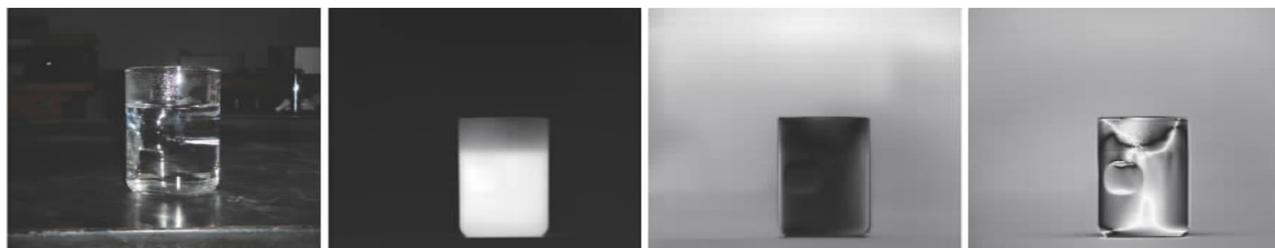


图3 玻璃杯不同成像方式的对比:(a)可见光图像;(b)强度图像;(c)偏振度图像;(d)偏振角图像^[2]

Fig. 3 Comparison of different imaging methods for glass cups: (a) Visible light image; (b) intensity image; (c) polarization degree image; (d) polarization angle image^[2]

合和以任务场景为导引的决策级融合。其中像素级融合的应用最为广泛,大多数融合方法都属于该层级。

目前,红外偏振图像融合领域提出了很多算法,根据算法数量和组合方式,可以概括为单一算法和多算法组合,后者根据组合方式,又可以分为串联式、并联式和嵌接式三种。

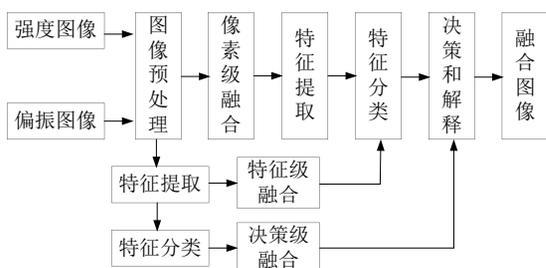


图4 图像融合的三个层级结构

Fig. 4 Three hierarchical structures of image fusion

2 单一算法图像融合

单一算法的图像融合根据信息处理方法的不同,可以分为基于多尺度变换的融合、基于数学/统计学的融合、智能图像融合、基于色彩空间的融合以及基于区域的融合等方法。

2.1 基于多尺度变换的图像融合

多尺度变换融合已成为当前图像融合的主流方法之一,融合过程如图5所示,可分为三个阶段:①以红外强度图像和红外偏振图像作为源图像,进行多尺度分解得到低频和高频子图像;②根据不同融合准则,分别对低频和高频进行融合;③对融合后的子图像进行多尺度逆变换,重构得到最终融合结果。常用的多尺度变换融合方法有小波分解、塔形分解法以及多尺度几何分解法等。

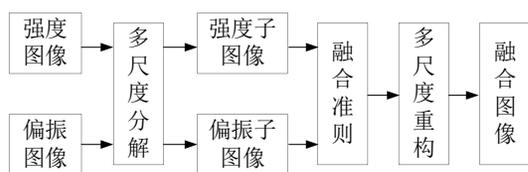


图5 多尺度变换融合示意图

Fig. 5 Diagram of multi-scale transformation fusion

(1) 基于小波分解的融合

小波变换能够将图像分解为不同尺度的低频和高频图像,重构过程中信息损失较少,可以灵活选择融合策略,以适用于不同目的。例如ZHAO Y等^[4]将小波变换(wavelet transform, WT)与伪彩色映

射用于红外偏振图像融合,提升了图像中不同材料的对比度,可以应用于区分电路板等电子器件的导体和非导体材料。YANG W.^[5]、张雨晨等^[6]针对低频和高频选择恰当的融合策略,进一步提升了融合效果。此外,虞文俊^[7]针对离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)存在的平移敏感和方向有限的缺点,采用提升方案构建小波,将红外强度、偏振度和偏振角图像进行了融合,改善了红外图像的质量。史国川^[8]针对海上舰船雾天图像模糊,探测困难的问题,利用DWT算法对低频和高频成分分别进行融合,提升了舰船检测效果。安富^[9]、朱攀^[10]分别采用DWT算法和双树复小波变换(dual-tree complex wavelet transform, DTCWT)对同一场景进行了融合实验,融合图像的边缘轮廓等细节信息保留和视觉效果更好,其融合图像对比如图6所示。

(2) 基于塔形分解的融合

常用的塔形分解包括拉普拉斯金字塔(laplace pyramid, LP)、梯度金字塔、比例低通金字塔等,其中LP在细节信息保留、融合效果以及场景适应性上更具优势,因此在红外偏振图像融合中应用较多。例如,牛继勇^[11]利用LP将居民楼的红外强度和偏振度图像进行分解,并以局部区域平均梯度大小作为高频图像的融合依据,得到了边缘细节信息保留较好的融合图像,其融合结果图7(c)所示。鉴于LP的方向局限性,人们在每个子带上加入方向滤波器,实现了多方向分解,这就是控向拉普拉斯金字塔(oriental laplace pyramid, OLP)。例如,YUE Z等^[12]利用OLP融合了居民楼的红外强度和偏振度图像,相比而言,OLP对图像的细节信息的表征能力更强,例如图7(f)中空调管线的表征比图7(c)更清晰。

(3) 基于支持度变换的融合

支持度变换(support value transform, SVT)是一种二值冗余变换,在最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)基础上发展而来的一种新的多尺度变换。SVT可以得到图像的支持度矩阵用以表示图像之间的相关性,可以很好地提取图像方向、颜色、灰度特征等关键信息,且具有平移不变性、无振铃效应等特点。杨风暴^[13-14]利用SVT将卡车场景的红外偏振图像进行分解,并设计了不同的融合准则,获得了高质量的融合图像,其结果如图8所示。文献[13]的融合结果在保留强度信息(如房檐)方面表现突出,但损失了部分区域的细节(如卡车后方树、云层);文献[14]虽能

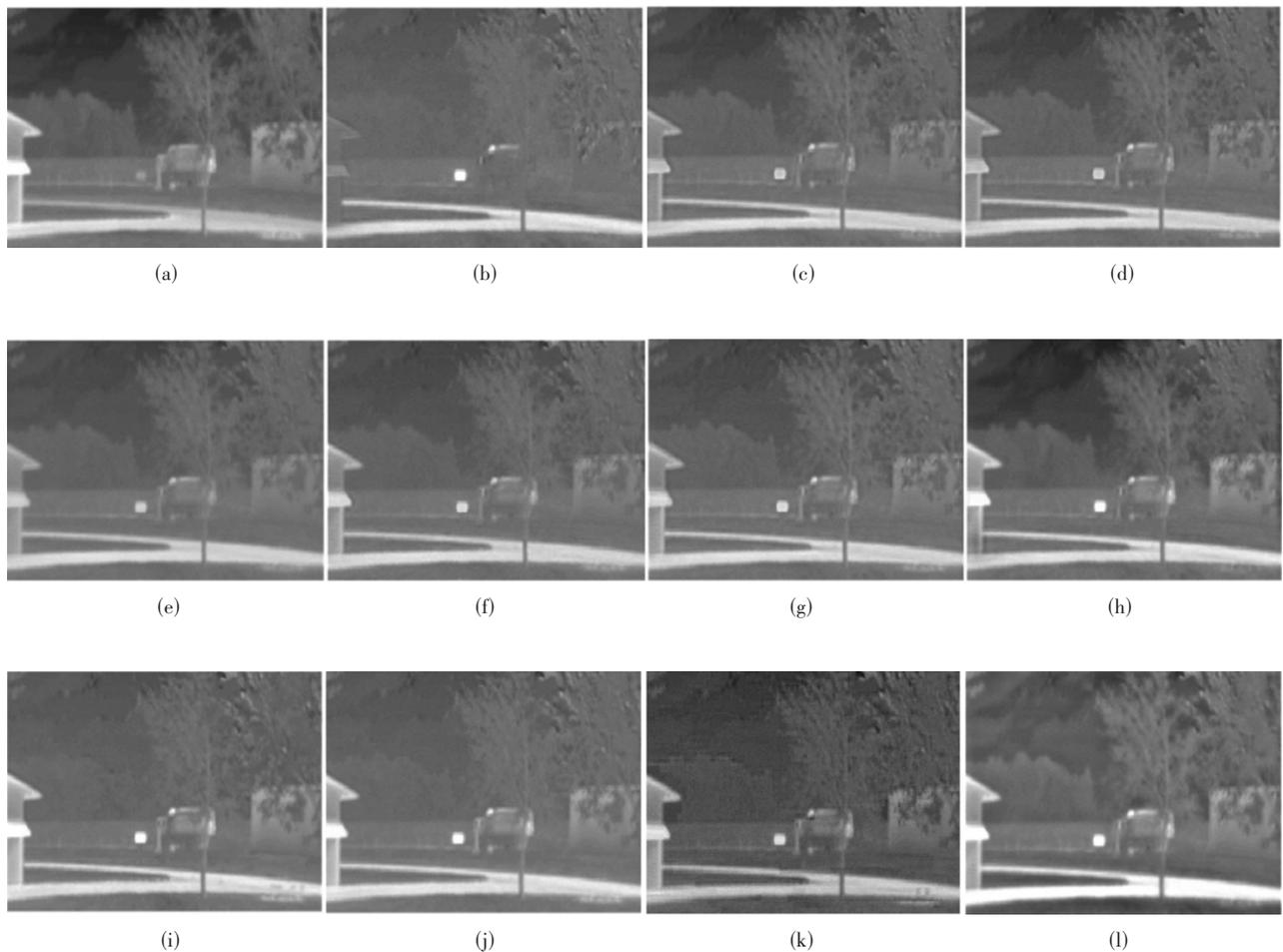


图6 不同小波分解融合算法对比:(a)强度图像;(b)偏振度图像;(c)DTCWT;(d)NSCT;(e)SVT;(f)BEMD;(g)NSCT+PCNN;(h)DTCWT+SR;(i)SR;(j)SOMP;(k)文献[9],(l)文献[10]

Fig. 6 Comparison of different wavelet decomposition fusion algorithms:(a)Intensity image;(b)polarization degree image;(c) DTCWT;(d)NSCT;(e)SVT;(f)BEMD;(g)NSCT+PCNN;(h)DTCWT+SR;(i)SR;(j)SOMP;(k) Ref.[9],(l)Ref.[10]

较好保留场景细节,但强度信息存在损失(如房檐)。此外,蔡怀宇^[15]将SVT图像融合方法用于人脸的长波红外图像增强,提升了面部细节特征。总体而言,SVT在融合过程中能够更精细地提取图像特征,是一种很有前途的图像融合方法。

(4)基于几何分解的融合

多尺度几何分解能够实现图像不同尺度和不同方向的分解,对边缘、轮廓信息表征更准确,弥补了小波方向性不足的缺点。较早提出的Contourlet变换突出了融合图像的高频信息,但该方法不具有平移不变性,容易出现伪吉布斯现象。为解决这些问题,后续提出了非下采样轮廓波变换(non-sub-sampled contourlet transform, NSCT)、非下采样剪切波变换(non-subsampled shearlet transform, NSST)等方法。这些方法提升了融合图像的高频信息保

持能力,改善了图像的视觉效果,在对边缘轮廓等高频信息要求较高的目标检测和识别任务中较为常见。例如,李伟伟^[16]利用NSCT将强度图像和偏振图像分解,对低频和高频子带系数进行局部能量和目标区域特性系数融合,得到细节信息保留好,对比度大的融合图像,有利于场景的理解和感知。GUO R^[17]将NSCT和2D Teager算子应用于红外偏振图像融合,得到了视觉效果良好的图像。周强^[18]采用NSST和区域显著性规则,进行了中波和长波红外偏振图像融合实验,融合图像的对数熵、信息熵和互信息值有较大提升。杨风暴、姜兆桢等^[19-20]进一步将NSST算法与局部能量匹配规则相结合,解决了以往红外偏振图像融合后边缘信息损失和细节信息丢失的问题。此后,ZHANG J H^[21]根据红外反射辐射和发射辐射效应,利用正交差分法提取红

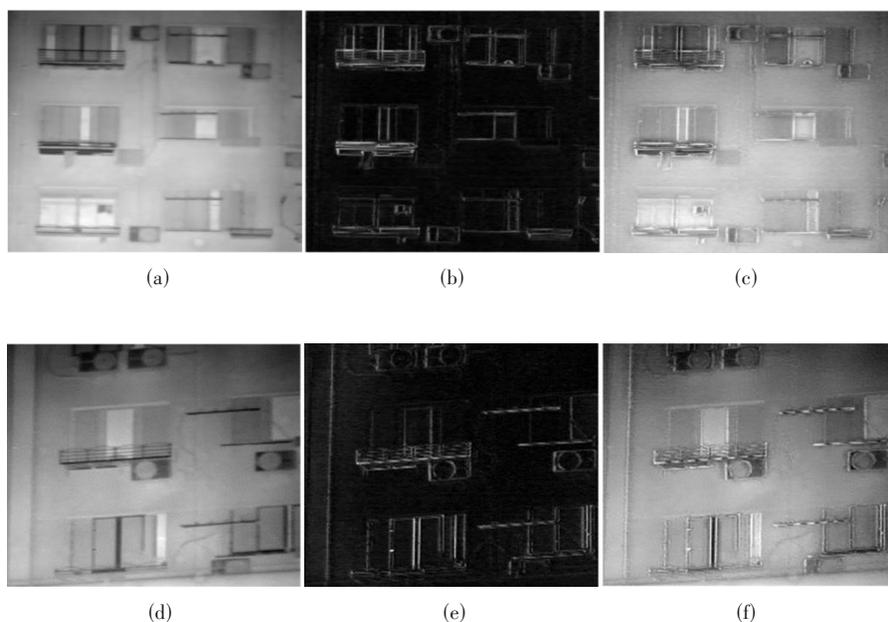


图7 不同塔形分解融合算法对比:(a)强度图像;(b)偏振度图像;(c)文献[10],(d)强度图像;(e)偏振度图像,(f)文献[12]

Fig. 7 Comparison of different tower-shaped decomposition and fusion algorithms:(a)Intensity image;(b)Polarization degree image;(c)Ref.[10],(d)Intensity image;(e)Polarization degree image,(f)Ref.[12]



图8 支持度变换融合效果对比:(a)强度图像;(b)偏振度图像;(c)文献[13],(d)文献[14]

Fig. 8 Comparison of fusion effects with support value transform:(a)Intensity image;(b)polarization degree image;(c)Ref. [13],(d)Ref. [14]

外偏振图像的水平和垂直偏振特征,通过 NSST 算法将红外强度图像和偏振图像进行融合,进一步提高了图像的质量。ZHANG L^[22]采用 NSST 算法提取图像纹理特征,而后利用相似度指标衡量特征差异,将其作为红外偏振特征在融合过程中的传递权重,实现了红外偏振特征的精确传递,其融合结果与其他方法对比如图 9 所示。

2020 年,包达尔罕^[23]提出了一种混合 l_0l_1 层分解的多尺度变换融合算法。混合 l_0l_1 层分解可以有效地将图像分解为基层和细节层,较好保持图像边缘信息,有效克服光晕现象和过度增强。其结果具有较好的质量和适应性,但该算法相对 LP、平稳小波变换(stationary wavelet transform, SWT)、SVT 运算时间较长。

基于多尺度变换图像融合算法的优缺点见表 1。该方法能够在不同尺度、不同分辨率上进行特征提取和融合,符合人眼视觉系统的特点,也有利于计算机信息处理,能够达到很好的融合效果。特别是在目标检测领域,多尺度分析的红外偏振图像融合方法应用广泛,例如文献[8]水面舰艇目标的检测、文献[19]复杂背景中伪装目标检测等,融合后图像中待检测目标相对原图像更加突出。在空中目标检测方面,低空无人机在多云的环境下,容易受到云层干扰,造成目标检测准确度下降。通过多尺度变换的融合方法,能够增强无人机的边缘轮廓特征,减弱云层对无人机检测的影响。

2.2 基于数学/统计学的图像融合

基于数学/统计学的图像融合,其核心在于构建

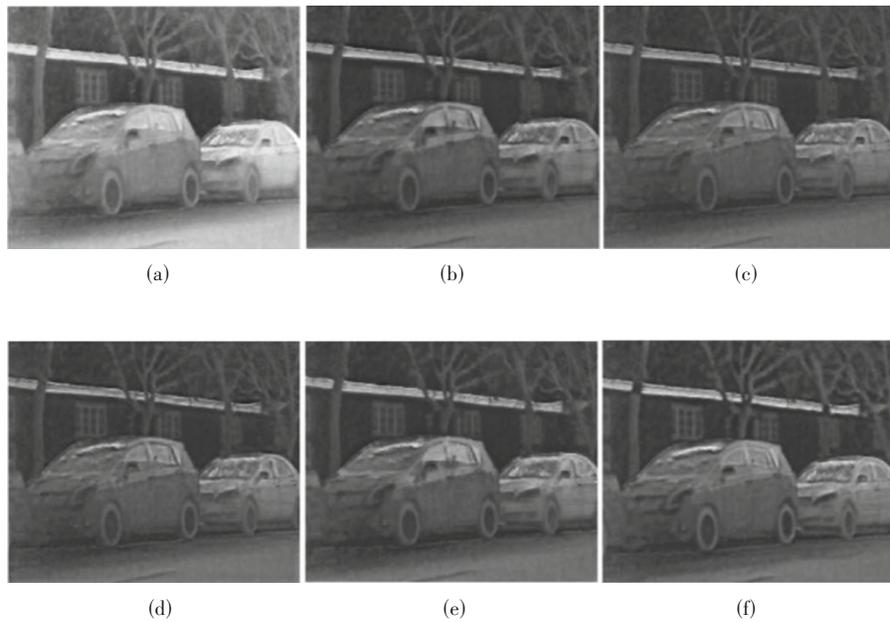


图9 不同几何分解融合算法对比:(a)文献[22];(b)NSCT;(c)NSST;(d) NSST-Tophat;(e)DTCWT;(f)LP

Fig.9 Comparison of different geometric decomposition fusion algorithms:(a)Ref.[22];(b)NSCT;(c)NSST;(d)NSST-Tophat;(e)DTCWT,(f)LP

表1 基于多尺度变换方法对比

Table 1 Comparison of image fusion algorithms based on multi-scale transformation

融合算法	优点	缺点
WT	简单,运算快	细节信息融合不佳
DWT	抗噪性好	平移敏感性和方向有限
DTCWT	平移和旋转不变性	相位歧义
LP	简单,运算快	对比度较低
OLP	平移和旋转不变性	细节保持不好
SVT	细节保持好,平移不变性	复杂,运算慢
NSCT	边缘保持好	复杂,运算慢
NSST	边缘保持好	复杂,运算慢
混合 l_0l_1 层分解多尺度变换	光晕和过度增强减弱,边缘保持好	复杂,运算慢

并遵循特定的假设或数学模型框架,如主成分分析(principal component analysis, PCA)、压缩感知(compressed sensing, CS)、傅里叶变换(fourier transform, FT)、形态学变换等。由于数学/统计学融合方法能够高效提取图像特征,获得较好的融合图像,该方法在红外偏振图像融合领域有较为广泛的应用。例如,CHEN Y^[24]提出了一种基于梯度的CS图像融合框架,结合加权平均规则给出了相关图像融合方案,能够将源图像的灰度信息进行更好的融合。WANG Z^[25]将PCA算法应用于红外偏振图像融合,提高了融合图像的信息量和清晰度。XU M^[26]将马尔可夫随机场模型应用于遥感图像融合。2017

年,ZHU P分别将Tophat方法^[27]和改进的toggle算子^[28]应用红外偏振图像融合,得到的融合图像具有更高的对比度和清晰度,视觉效果也有较大提升,结果如图10(f)和(g)所示。2020年,他又将二元二维经验模态分解(bidimensional empirical mode decomposition, BEMD)和稀疏表示(sparse representation, SR)方法结合,融合图像在主观和客观评价指标上都有显著提升^[29],结果如图10(h)所示。

针对红外偏振图像的频谱特点,2021年,牛继勇^[30]在对源图像进行傅里叶分析的基础上,以频谱绝对值之和最大作为融合规则,得到了视觉效果较好的融合图像。2023年,陈锦妮^[31]将反正切函数作

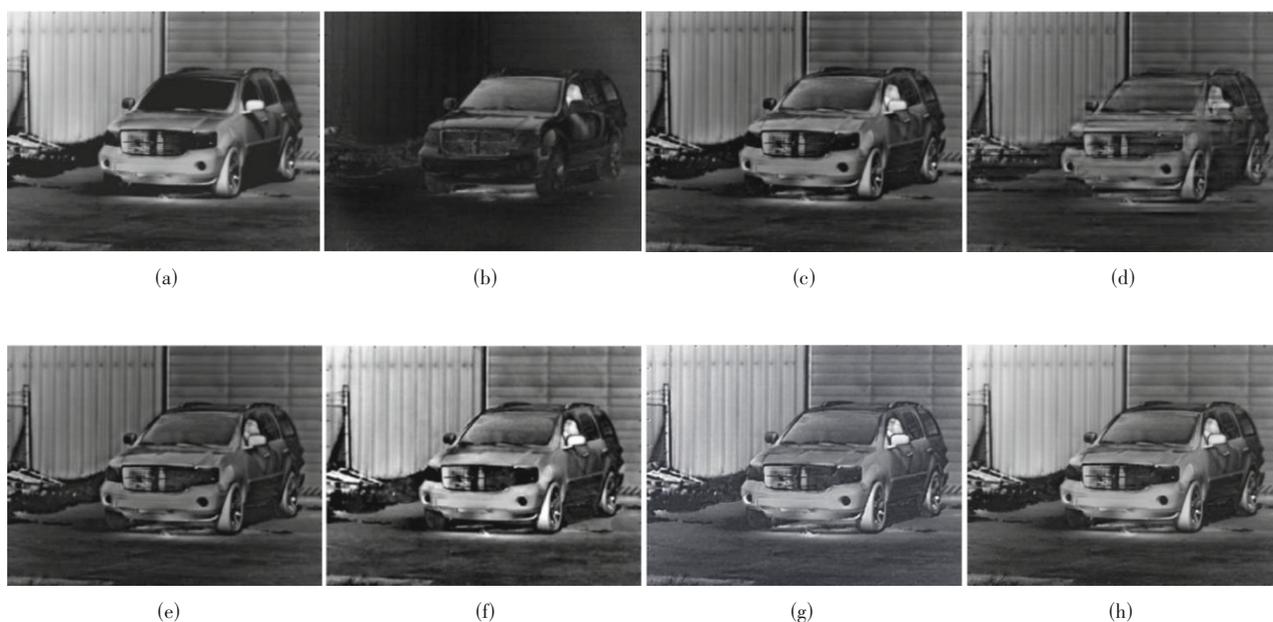


图10 不同数学/统计学融合算法对比:(a)强度图像,(a)强度图像;(b)偏振度图像;(c)LP;(d)DWT;(e)NSCT;(f)文献[27];(g)文献[28];(h)文献[29]

Fig. 10 Comparison of different fusion algorithms in mathematics/statistics:(a)Intensity image;(b)Polarization degree image;(c)LP;(d)DWT;(e)NSCT;(f)Ref.[27];(g)Ref.[28];(h)Ref.[29]

为权重函数,并与多尺度结构分解技术相结合,解决了传统多尺度分解融合算法在偏振图像融合中遇到的对比度不足、目标偏振特征模糊以及纹理细节缺失等问题。

基于数学/统计学的融合方法的优缺点见表2。当源图像能够较好地符合预设的数学模型时,往往会有很好的融合效果;反之,则可能引发融合质量的下降,甚至导致融合失效。例如,PCA、CS等方法,能够减少数据量,提升图像处理速度,适用于对实时性要求较高的融合场景;FT能够在频率域上进行融合处理,增强或削弱特定频率的信息;形态学变换能够突出目标与背景的对比度等。在红外偏振图像融合领域,由于单一的数学/统计学融合各有侧重点,场景适应能力有限,一般会与其他融合方法结合使用。

2.3 智能图像融合

智能图像融合是一种将生物体智能机制抽象为数学模型,从而实现图像信息智能融合处理的技术。目前主要有基于优化模型的烟花算法(fireworks algorithm, FWA)、基于拟态仿生、基于卷积神经网络的脉冲耦合神经网络(pulse coupled neural network, PCNN)等。

基于优化模型融合方法上的研究,陈卫^[32]利用FWA实现智能图像融合,保留红外与偏振特征,性能优于传统方法。2021年,YANG Z^[33]结合红外强度、偏振度与烟花算法,开展了红外偏振图像融合实验。吕胜等^[34]基于拟态仿生学,模拟章鱼拟态过程融合红外光强与偏振图像,依据特征差异选择融合结构。

在深度学习红外偏振图像融合方法的研究上,

表2 基于数学/统计学的图像融合算法对比

Table 2 Comparison of image fusion algorithms based on mathematical/statistical methods

融合算法	优点	缺点
PCA	数据冗余少,抗噪性好	计算量较大,依赖先验知识
CS	计算量和数据存储空间小,融合质量高	观测矩阵设计较难
基于马尔可夫随机场	适应性和可靠性强	算法复杂度较高
FT	频域分析能力好和无损融合	边缘、纹理处理能力有限
形态学变换	边缘、纹理细节信息提取能力强	抗噪性差,计算复杂

LI K^[35]提出抗干扰融合算法,利用偏振显著特征与注意力引导滤波网络,有效融合噪声场景下的红外偏振图像。李奕^[36]通过进化学习优化PCNN,实现自适应双通道图像融合;优化参数选择,提升算法适应性。2019年,SU X^[37]结合NSST与PCNN,有效融合中波和长波红外图像。同年,ZHANG J^[38]提出稀疏表示与PCNN融合红外偏振图像,提升了多项图像融合质量评价指标,但复杂度较高。2024年,HU C^[39]创新融合方法,利用NSST与改进PCNN,保留偏振信息,增强图像质量,其融合结果与其他融合方法的对比如图11所示。

此外,生成对抗网络等方法在偏振图像融合中也得到广泛应用。例如,2022年,DING X^[40]提出使用偏振融合对抗生成网络来学习偏振信息与物体辐射之间的关系,可以有效提取不同偏振态图像的偏振相关性。实验结果表明,该方法有利于偏振信息的提取,且能够有效去除背向散射光并恢复物体

的辐射亮度。LIU J^[41]提出了一种语义引导的双判别器生成对抗网络用于偏振图像融合,通过创建偏振图像质量判别器来指导融合过程,在生成器和两个判别器之间建立对抗博弈关系。实验结果表明,该方法的视觉效果和定量指标上相对其他参考算法具有优势,能够显著提高透明、伪装目标的检测和分割性能。

智能图像融合方法优缺点见表3。

智能图像融合不仅涉及像素层级融合,更拓展到特征级和决策级,能够准确提取图像关键特征,获得符合人类视觉和计算机处理特点的融合图像。可以预见,随着人工智能技术的快速发展,以深度学习为代表的新型智能图像融合方法将会得到更多的应用。

2.4 基于彩色空间的图像融合

研究表明,人眼能分辨的颜色等级超过一千万种,远远大于灰度等级总数。因此,将红外偏振图

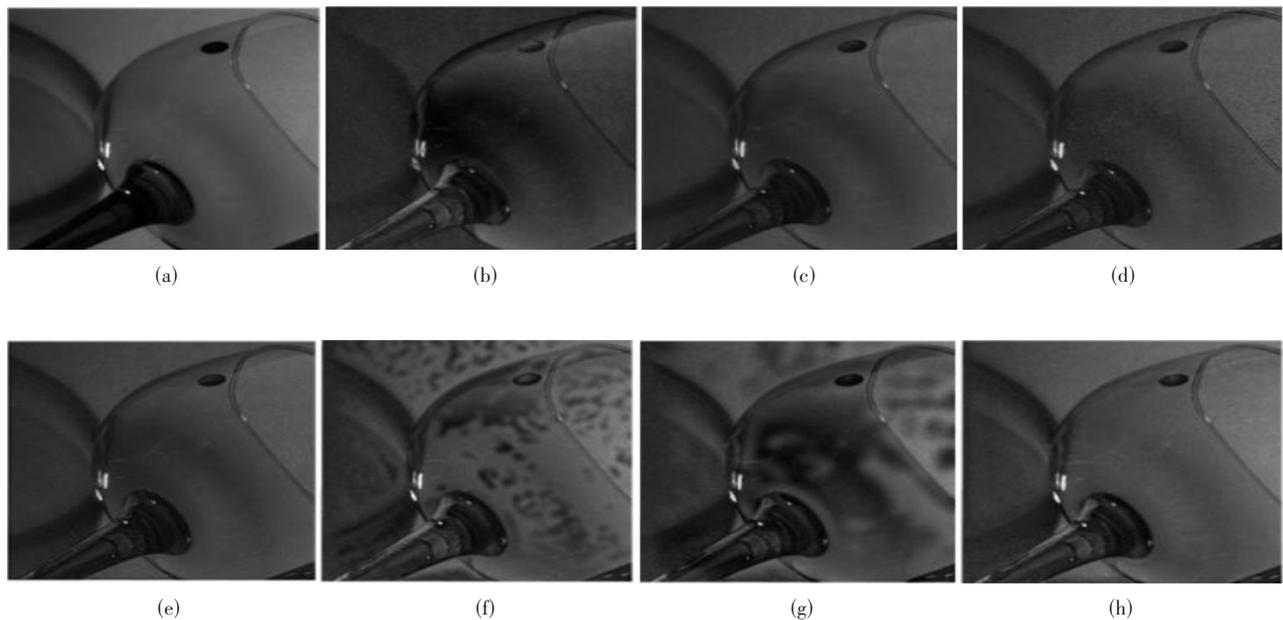


图11 不同智能融合算法对比:(a)强度图像;(b)偏振度图像;(c)加权平均;(d)PCNN;(e)WT;(f)NSCT-PCNN1;(g)NSCT-PCNN2;(h)文献[39]

Fig. 11 Comparison of different intelligent fusion algorithms: (a) Intensity image; (b) Polarization degree image; (c) mean fusion; (d) PCNN; (e) WT; (f) NSCT-PCNN1; (g) NSCT-PCNN2; (h) Ref.[39]

表3 智能图像融合方法对比

Table 3 Comparison of intelligent image fusion methods

融合算法	优点	缺点
FWA	图像特点定最优融合策略,融合质量高	算法复杂,理论研究不成熟
基于拟态仿生学	图像差异特征定算法,融合质量高	算法复杂,理论研究不成熟
PCNN	边缘、纹理信息保持好,并行处理,速度快	模型复杂,参数较多且依赖经验

像进行彩色融合,以不同颜色表征偏振信息,能充分发挥人眼视觉在彩色感知方面的优势,提高人眼对图像的感知。

基于彩色空间的图像融合是利用不同彩色空间,如RGB空间、HIS空间、HSV空间等,通过特定算法将两个或多个彩色图像合并成一个新的图像。

Lawrence B. Wolff开创性地将偏振图像转至RGB空间融合,获得良好视觉效果。汪方斌等^[42]用高斯差分优化开展了人脸红外偏振图像的RGB空间融合,提升了识别精度。Merino O. G.首次将长波红外、偏振度和偏振角图像在HSV空间进行融合, Yemelyanov K M进一步改进了HSV融合法。LAVIGNE D A^[43]提出可见光与红外偏振HSV融合算法,将偏振特征映射至RGB空间显示,提升对阴影目标探测效果。CHEN W^[44]结合HSV与小波包变换,重构中波红外偏振图像。周彦卿^[45]针对红外偏振特性,改进HSV融合算法,提升了图像对比度。LIANG J^[46]通过HSV转换融合算法实现了图像的去雾。SU Z^[47]改进了传统的HSV颜色空间的红外图像融合方法,通过将强度图像和偏振图像的共同特征和差异特征融合,增强S通道和V通道细节信息,获得了伪影较少、颜色对比度高的图像,如图12所示。

YANG F^[48]通过基于HIS空间的图像融合算法增强了图像对比度,消除了传统颜色传递存在的目标与背景颜色相似问题。郭喆^[49]提出基于暗原色多特征的融合方法,并用于红外与偏振图像融合。基于颜色空间的融合方法优缺点见表4。

单一融合算法在融合图像时各有侧重,不能根据场景的差异特征动态调整,难以满足不同的融合需求。例如PCA在某一源图像提供信息量较大时,容易丢失细节信息和弱小目标;DWT仅对水平、垂直和对角方向信息检测效果较好,具有方向局限性;对比度金字塔抗噪性能较差等。因此,研究人

表4 基于颜色空间的图像融合方法对比

Table 4 Comparison of several image fusion ways based on color space

融合算法	优点	缺点
RGB	简单直观,空间转换简单	颜色偏差,细节丢失
HSV	符合人眼视觉,对比度高	算法复杂,光谱畸变
HSI	符合人眼视觉,对比度高	算法复杂,光谱畸变

员在考虑单一融合算法优势的基础上^[50],提出了多算法组合的图像融合方法。

3 多算法组合的图像融合

多算法组合图像融合是将多种融合算法进行合理组合,有效增强源图像间差异特征的保留能力,并显著降低信息在融合过程中的丢失,提升了融合图像的质量。按照组合方式可将多算法组合归纳为串联式、并联式和嵌接式三种。

3.1 串联式组合

串联式多算法组合的图像融合是将部分具有类似特征的源图像进行一次融合,而后再将其他特征图像与一次融合后的图像进行二次融合,以此类推,得到最终的融合结果,其原理如图13所示。

在红外强度和偏振图像融合中,常见的方法是将红外偏振度和偏振角图像进行一次融合,而后再将该融合图像与红外强度图像进行二次融合。例如李伟伟^[51]基于梯度特征和支持度变换提出了一种二次融合方法,融合过程如图14所示。

在实际应用中,可以根据融合任务需求或源图像特点,调整融合顺序和融合规则。YU X^[52]利用NSCT与模糊C类均值(fuzzy C-means, FCM)融合红外偏振图像,首先融合偏振度和偏振角图像,而后对融合后偏振特征图像进行FCM算法分割,同时该图像和红外强度图像进行NSCT分解,最后逆变换重构得到高对比度融合图像。2017年,ZHANG L^[53]提出基于结构相似度的多尺度融合方法,以红外



图12 彩色空间融合结果对比:(a)强度图像;(b)偏振度图像;(c)Tyo方法;(d)文献[47]

Fig. 12 Comparison of color space fusion results: (a) Intensity image; (b) polarization degree image; (c) Tyo method; (d) Ref. [47]

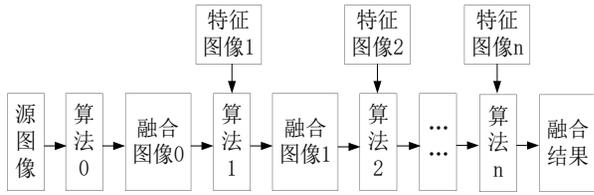


图 13 串联式多算法组合的图像融合流程

Fig. 13 Image fusion process by serial multi algorithm combination

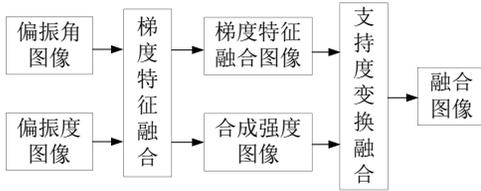


图 14 文献[51]提出的图像融合方法

Fig. 14 An image fusion process proposed by Ref. [51]

强度图为基层图,用结构相似度确定偏振图分解层数,求和分解特征为细节图,融合基层图与细节图,解决了模糊与信息丢失问题,其融合结果如图 15 所示,(a)-(d)为汽车场景的红外偏振图像融合结果,(e)-(h)为建筑物场景的红外偏振图像融合结果。可以看出,该方法在视觉效果和细节信息保留上都相比参照方法更好。

串联式独立性强,可针对图像特征设计特定算法,且无需过多考虑算法之间的互补性,能够实现图像特征的二次提取;但算法若对同一特征敏感,会导致其他特征提取效果不佳,影响融合质量。因此,串联式融合方法通常用于多特征融合,适合复杂场景中的目标检测任务。

3.2 并联式组合

并联式组合的图像融合是分别采用不同算法对源图像独立融合,获取具有各算法特色的融合图像,再依据相应准则对这些图像进行二次融合,最终生成集各算法优势的融合图像。其融合原理如图 16 所示。

在红外偏振图像融合中,常见的是将红外强度图像和红外偏振图像分别进行融合,而后根据融合准则得到最终融合结果。李伟伟^[54]通过颜色映射与支持度变换融合红外偏振与强度图像,用灰度融合图替代 $YC_{\alpha}C_{\beta}$ 的亮度信息,显著提升伪彩色图的色彩、细节、清晰度及目标背景对比度,其融合过程如图 17 所示。

针对并联式融合权重确定困难的问题,张雷^[55]提出基于差异特征指数测度的权重确定法。针对图像的亮度差异、边缘轮廓和纹理差异,利用局部能量取大(maximum energy value, MEV)、多尺度引

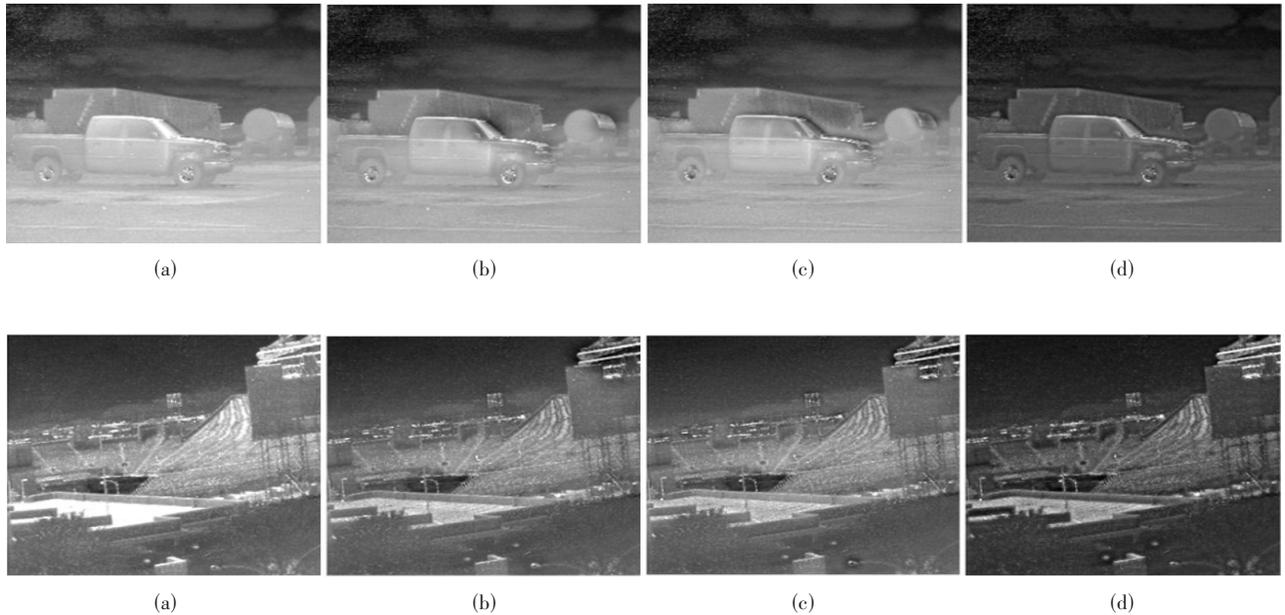


图 15 串联式融合算法对比:(a)文献[53]; (b)NSCT; (c)NSST; (d)NSST-Tophat; (e)文献[53]; (f)NSCT; (g)NSST; (h)NSST-Tophat

Fig. 15 Comparison of cascaded fusion algorithms: (a)Ref.[53]; (b)NSCT; (c)NSST; (d)NSST-Tophat; (e)Ref.[53]; (f) NSCT; (g)NSST; (h)NSST-Tophat

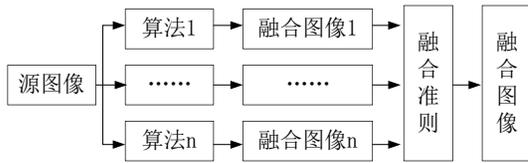


图 16 并联式多算法组合的图像融合流程

Fig. 16 Flowchart of parallel multi algorithm combination fusion

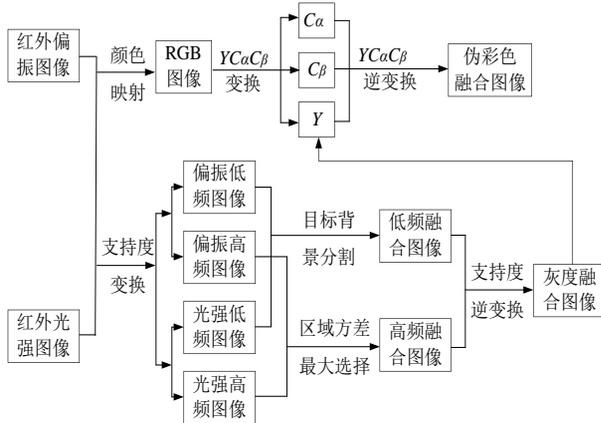


图 17 文献[54]的算法原理图

Fig. 17 Algorithm schematic of Ref. [54]

导滤波(multi-scale guided filtering, MGST)、NSST算法分别融合强度和偏振图像,而后根据差异特征测度确定融合权重;最后将3种算法的融合图像进行2次融合,其融合结果如图18所示。可以看出,该方法对汽车的轮廓边缘、纹理细节融合效果较好,但光强较大时,融合图像强度特征过于突出,导致部分细节信息丢失。

并联式能够最大程度保留图像特征,减小信息丢失,并根据算法的特点和任务需求自主设定各算法融合图像在二次融合过程中的权重大小,突出算法优势。但该结构要求算法之间具有较强的互补性,且图像融合权重的确定还没有完备的方法,目前多数是依靠个人经验,主观性较强。并联式组合需要详细分析算法以及待融合图像的特点,考虑图

像特征互补性的同时兼顾算法互补,才能充分发挥各算法的优势,提升整体融合效果。

3.3 嵌接式组合

嵌接式多算法组合的图像融合是利用不同算法间的互补效应与结构协同,以图像特征提取为桥梁,实现算法模块间的深度嵌套与融合。这种组合方式中每个算法的中间处理结果直接作为后续一个或多个算法的输入,构建了一个紧密相连的处理链。这种嵌套结构实质上将第一个算法视为分解算法,其后的算法则扮演了融合策略与重构规则的角色,通常以第一种算法的融合重构图作为最终融合结果。嵌接式结构各算法之间相互嵌接,彼此影响较强,因此算法独立性较差。这也要求参与嵌接的算法间具有高度的互补性,否则可能导致融合效果不佳甚至信息失真。其融合过程如图19所示。

在红外光强与偏振图像融合中嵌接式组合最为常见,且常借助多尺度分析方法来实现算法的嵌套连接。它通过在不同尺度上分解图像信息,并利用各算法在特定尺度上的优势进行互补融合,有效提升了图像的质量与信息量。2017年,杨风暴^[56]提出了一种DWT、NSCT和改进的PCA算法协同的多算法组合融合方法。该方法针对三种融合算法的特点,首先对光强图像和偏振图像进行DWT分解,而后针对DWT分解的低频分量进行NSCT二次分解,并对NSCT分解中的低频和高频分别采用不同融合策略,最后对相应的高低频分量进行NSCT逆变换和DWT逆变换重构图像,其融合过程如图20所示。

该方法在进行红外强度和偏振图像融合时,融合结果在主观视觉效果、细节信息保留等方面比单一或简单组合方法更具优势,具有较强的场景适应能力。图21为该方法融合结果与其他算法的比较。

此外,2023年,唐晟、汪方斌等^[57-58]将人脸的红外斯托克斯矢量图(I、Q、U分量)进行非负矩阵融合



图 18 并联式融合算法对比:(a)NSST; (b)MEV-MGST-NSST; (c)NSST-SWT-PCA; (d)文献[55]

Fig. 18 Comparison of parallel fusion algorithms:(a)NSST; (b)MEV-MGST-NSST; (c)NSST-SWT-PCA; (d) Ref. [55]

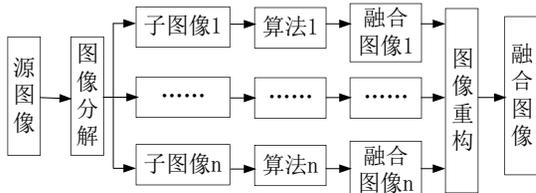


图 19 嵌接式多算法组合的图像融合流程
 Fig. 19 Embedded multi algorithm combination fusion flow-chart

后,再进行非下采样剪切变换域扩散滤波进行二次融合,实现了多分辨率的人脸红外偏振热像融合。

嵌接式能够将具备互补特性的多种算法巧妙地整合为一个强大的融合系统,在处理图像的高频

与低频信息时具有独特优势。然而,并非将具有互补性的算法进行嵌接就能获得较好的融合结果。这需要构建递进互补的嵌接机制,通过多级特征提取的协同互补性实现融合增强。嵌接式组合相比其他算法能够更全面、细致的提取源图像关键信息,尤其在偏振图像特征的提取上更具优势,因此,该类组合算法是未来偏振图像融合算法的发展方向之一。

基于多算法组合的图像融合方法优缺点见表5。

4 总结与展望

红外偏振图像融合技术是国内外研究的热点,

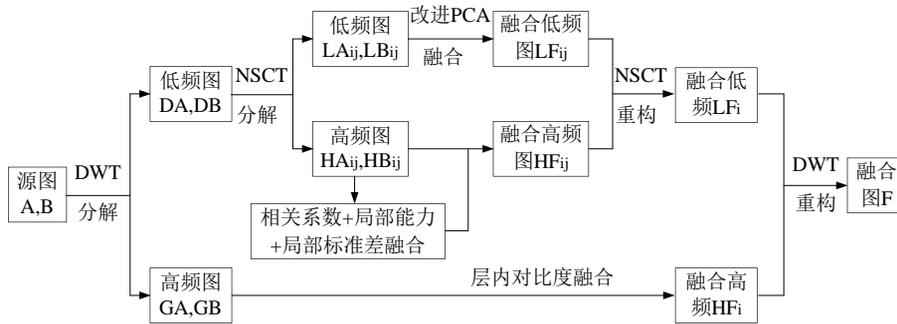


图 20 DWT、NSCT和改进PCA协同的图像融合过程^[56]
 Fig. 20 The process of collaborative fusion method of DWT, NSCT and improved PCA^[56]

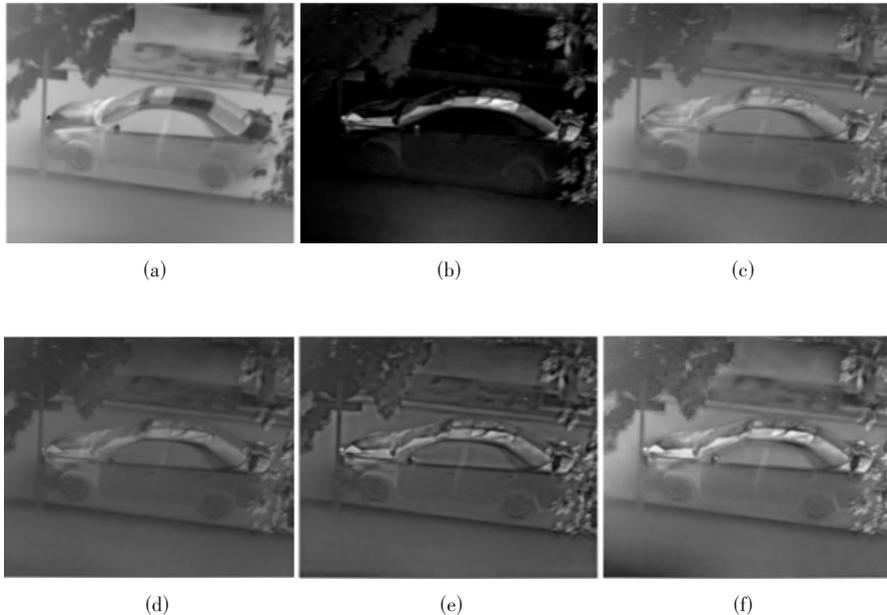


图 21 嵌接式融合算法对比:(a)强度图像:(b)偏振图像(a)强度图像:(b)偏振图像;(c)改进PCA;(d)DWT-PCA;(e)NSCT-DWT;(f)文献[56]

Fig. 21 Comparison of embedded fusion algorithms:(a)Intensity image;(b)Polarization image;(c)Improve PCA;(d)DWT-PCA;(e)NSCT-DWT;(f) Ref.[56]

表5 多算法组合融合方法对比

Table 5 Comparison of image fusion methods based on multi algorithm combination

组合方式	优点	局限
串联式	算法独立,不考虑互补性,选择灵活	算法间功能重叠和冗余
并联式	算法及结果独立,融合效果好	考虑算法互补性,权重确定方法不成熟
嵌接式	结构紧凑、嵌接性好、较好提取特征	考虑算法及组合的互补性,选择有约束性

在目标伪装、探测识别和抑制背景噪声等方面具有独特的优势。随着近年来图像处理技术的突破性进展,该领域的研究进入快速发展阶段。本文综合分析了红外偏振图像融合技术的发展现状,从单一算法融合和多算法组合融合两方面阐述了各类方法的基本思想、研究进展,并讨论了各类方法的特点。总体来说,红外偏振图像融合技术仍然以单一算法融合为主流,多算法组合融合为未来发展趋势。

未来研究可以考虑从以下几个方面展开:1)寻找更能“稀疏”分解及表示的图像多尺度分解方法;2)以智能神经网络为基础改进图像融合准则,增加网络的灵活性,探索如何将深度学习方法应用于该领域,改进现有融合方法;3)嵌接式多算法组合中如何根据图像差异特征、不同算法特点确定最佳组合顺序;4)降低融合算法的复杂度,增强红外偏振图像融合的实时性;5)可见光图像与红外偏振图像的融合。

References

- [1] ZHAO Y Q, QIAO X B, LI N. Polarization vision [J]. Scientia Sinica Informationis, 2024, 54(07): 1620-1645. (赵永强, 乔新博, 李宁, 等. 偏振视觉[J]. 中国科学: 信息科学), 2024, 54(07): 1620-1645.
- [2] CHEN W L, WANG X, JIN W Q, et al. Approach to fusing MWIR polarization image based on wavelet packet transform [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(5): 578-582-610. (陈伟力, 王霞, 金伟其, 等. 基于小波包变换的中波红外偏振图像融合研究[J]. 北京理工大学学报) 2011, 31(5): 578-582+610.
- [3] MENG L J, LIAO C J, WANG Zeng-Bin, et al. Development and military applications of multi-source image fusion technology [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2011, 27(3): 17-19. (孟令杰, 廖楚江, 王增斌, 等. 多源图像融合技术的发展与军事应用研究[J]. 航天电子对抗) 2011, 27(3): 17-19.
- [4] ZHAO Y, PAN Q, ZHANG H. Material classification based on multiband polarimetric images fusion [C]//Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VII. SPIE, 2006, 6240: 58-65.
- [5] YANG W, GU G, CHEN Q, et al. A wavelet-based adaptive fusion algorithm of infrared polarization imaging [C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Infrared Imaging and Applications. SPIE, 2011, 8193: 576-584.
- [6] ZHANG Y C, LI J Y. Polarization image fusion based on wavelet transform [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 578-582. (张雨晨, 李江勇. 基于小波变换的中波红外偏振图像融合[J]. 激光与红外) 2020, 50(5): 578-582.
- [7] YU W J, GU G H, YANG W. Fusion algorithm of infrared polarization images based on wavelet transform [J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 289-292. (虞文俊, 顾国华, 杨蔚. 基于小波变换的红外偏振图像融合算法[J]. 激光技术) 2013, 37(3): 289-292.
- [8] SHI G C, TUO H N, WANG F, et al. An adaptive selective fusion method for infrared polarization based on DWT [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(4): 174-177. (史国川, 拓浩男, 王峰, 等. 基于DWT的红外偏振自适应选择融合方法[J]. 舰船电子工程) 2021, 41(4): 174-177.
- [9] AN F, YANG F B, LI W W, et al. Fusion of infrared polarization and intensity images based on DWT [J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(2): 18-22. (安富, 杨风暴, 李伟伟, 等. 基于DWT的红外偏振与光强图像的融合[J]. 光电技术应用) 2013, 28(2): 18-22.
- [10] ZHU P, LIU Z Y, HUANG Z H. Infrared polarization and intensity image fusion based on dual-tree complex wavelet transform and sparse representation [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 213-221. (朱攀, 刘泽阳, 黄战华. 基于DTCWT和稀疏表示的红外偏振与光强图像融合[J]. 光子学报) 2017, 46(12): 213-221.
- [11] NIU J Y, YUE Z, XU Y G. Fusion of infrared light intensity and polarization image based on Laplacian pyramid [J]. Infrared, 2019, 40(11): 35-41. (牛继勇, 岳振, 徐永贵. 基于拉普拉斯金字塔的红外光强与偏振图像融合[J]. 红外) 2019, 40(11): 35-41.
- [12] YUE Z, Li F M. An infrared polarization image fusion algorithm based on oriented Laplacian pyramid [C]//Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics: Optical Imaging, Remote Sensing, and Laser-Matter Interaction 2013. SPIE, 2014, 9142: 60-70.
- [13] YANG F B, LI W W, LIN S Z, et al. Study on fusion of infrared polarization and intensity images [J]. Infrared Technology, 2011, 33(5): 262-266. (杨风暴, 李伟伟, 蔺素珍, 等. 红外偏振与红外光强图像的融合研究[J]. 红外技术) 2011, 33(5): 262-266.
- [14] YANG F, Wei H. Fusion of infrared polarization and intensity images using support value transform and fuzzy

- combination rules [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 235–243.
- [15] CAI H Y, YANG J Q, HUANG Z H, et al. LWIR human face image enhancement method based on polarimetric image fusion [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(4): 262–268.
(蔡怀宇, 杨建乔, 黄战华, 等. 基于偏振图像融合的长波红外人脸图像增强技术[J]. *纳米技术与精密工程*) 2016, 14(4): 262–268.
- [16] LI W W, YANG F B, AN F. Fusion of infrared polarization and intensity images based on NSCT [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(2): 58–61.
(李伟伟, 杨风暴, 安富. 基于NSCT的红外偏振与光强图像的融合研究[J]. *光电技术应用*) 2012, 27(2): 58–61.
- [17] GUO R, ZHANG J, WANG F, et al. The algorithm of image fusion for infrared polarization based on Contourlet transform and Teager operator [C]//Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences held June – July 2015. SPIE, 2015, 9795: 55–62.
- [18] ZHOU Q, ZHAO J F, FENG H J, et al. Infrared polarization image fusion with non-sampling Shearlets [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(8): 1508–1516.
(周强, 赵巨峰, 冯华君, 等. 非下采样剪切波的红外偏振图像融合[J]. *浙江大学学报(工学版)*) 2014, 48(8): 1508–1516.
- [19] YANG F B, ZHAO Y X, JI L N, et al. An infrared polarization image fusion method based on local energy matching [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(4): 319–324.
(杨风暴, 赵艳霞, 吉琳娜, 等. 基于局部能量匹配的红外偏振图像融合[J]. *红外技术*) 2016, 38(4): 319–324.
- [20] JIANG Z Z, HAN Y S, XIE R C, et al. Research on an infrared polarized image fusion algorithm based on NSST transform [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2020, 31(11): 1140–1148.
(姜兆祯, 韩裕生, 谢瑞超, 等. 一种基于NSST变换的红外偏振图像融合算法研究[J]. *光电子激光*) 2020, 31(11): 1140–1148.
- [21] ZHANG J H, ZHANG Y, SHI Z G. Long-wave infrared polarization feature extraction and image fusion based on the orthogonality difference method [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2018, 27(2): 023021–023021.
- [22] ZHANG L, YANG F, JI L. Infrared polarization and intensity image fusion algorithm based on the feature transfer [J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, 52: 135–145.
- [23] BAO D H, GAO W W, YANG J Y. Fusion algorithm for infrared intensity and polarization images using hybrid l_0l_1 layer decomposition [J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(07): 676–682.
(包达尔罕, 高文炜, 杨金颖. 基于混合 l_0l_1 层分解的红外光强与偏振图像融合算法[J]. *红外技术*) 2020, 42(07): 676–682.
- [24] CHEN Y, QIN Z. Gradient-based compressive image fusion [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2015, 16: 227–237.
- [25] WANG Z, DELLER Jr J R, Fleet B D. Pixel-level multi-sensor image fusion based on matrix completion and robust principal component analysis [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2016, 25(1): 013007–013007.
- [26] XU M, CHEN H, VARSHNEY P K. An image fusion approach based on Markov random fields [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2011, 49(12): 5116–5127.
- [27] ZHU P, Huang Z. A fusion method for infrared – visible image and infrared-polarization image based on multi-scale center-surround top-hat transform [J]. *Optical review*, 2017, 24: 370–382.
- [28] ZHU P, DING L, MA X, et al. Fusion of infrared polarization and intensity images based on improved toggle operator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 139–151.
- [29] ZHU P, LIU L, ZHOU X. Infrared polarization and intensity image fusion based on bivariate BEMD and sparse representation [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80: 4455–4471.
- [30] NIU J Y, XU Y G, YUE Z. The infrared polarization image analysis and fusion based on fourier [J]. *Journal of Weifang University*, 2021, 21(6): 1–6.
(牛继勇, 徐永贵, 岳振. 基于傅里叶变换的红外偏振图像分析及融合[J]. *潍坊学院学报*) 2021, 21(6): 1–6.
- [31] CHEN J N, CHEN Y Y, LI Y H, et al. Fusion of infrared intensity and polarized images based on structure and decomposition [J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(3): 257–265.
(陈锦妮, 陈宇洋, 李云红, 等. 基于结构与分解的红外光强与偏振图像融合[J]. *红外技术*) 2023, 45(3): 257–265.
- [32] CHEN W, SUN X B, QIAO Y L, et al. Intelligent fusion method of infrared polarization image based on FWA [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(4): 523–532.
(陈卫, 孙晓兵, 乔延利, 等. 基于FWA的红外偏振图像智能融合方法[J]. *红外与毫米波学报*) 2020, 39(4): 523–532.
- [33] YANG Z, LU G, CAI W, et al. Algorithm of infrared-polarization image fusion based on fireworks algorithm [C]//International Conference on Signal Image Processing and Communication (ICSIPC 2021). SPIE, 2021, 11848: 365–374.
- [34] LV S, YANG F B, JI L N, et al. Combination fusion of multi-types mimic variables of infrared intensity and polarization image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 63–72.
(吕胜, 杨风暴, 吉琳娜, 等. 红外光强与偏振图像多类拟态变元组合融合[J]. *红外与激光工程*) 2018, 47(5): 63–72.
- [35] LI K, QI M, ZHUANG S, et al. Noise-aware infrared polarization image fusion based on salient prior with attention-guided filtering network [J]. *Optics Express*, 2023, 31(16): 25781–25796.
- [36] LI Y, WU X J. A novel fusion method using self-adaptive dual-channel pulse coupled neural networks based on PSO evolutionary Learning [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(2): 217–222.
(李奕, 吴小俊. 粒子群进化学习自适应双通道脉冲耦合神经网络图像融合方法研究[J]. *电子学报*) 2014,

- 42(2): 217-222.
- [37] SU X, CAO C, ZENG X, et al. Infrared dual-band image fusion with simplified pulse coupled neural network and visual saliency map in nonsubsampling shearlet transform domain [C]//Eleventh International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2019). SPIE, 2019, 11209: 253-260.
- [38] ZHANG J, ZHOU H, WEI S, et al. Infrared polarization image fusion via multi-scale sparse representation and pulse coupled neural network [C]//AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology. SPIE, 2019, 11338: 567-577.
- [39] HU C, FAN B, BIAN J, et al. Polarization fusion algorithm based on NSCT decomposition and improved dual-channel PCNN model [C]//Fourth International Conference on Computer Vision and Data Mining (ICCVDM 2023). SPIE, 2024, 13063: 600-611.
- [40] DING X, WANG Y, FU X. Multi-polarization fusion generative adversarial networks for clear underwater imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 152: 106971.
- [41] LIU J, DUAN J, HAO Y, et al. Semantic-guided polarization image fusion method based on a dual-discriminator GAN [J]. *Optic Express*, 2022, 30: 43601-43621.
- [42] WANG F B, JIN X, ZHU D R, et al. Infrared polarized face recognition based on RGB color space [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(12): 535-543. (汪方斌, 金蓄, 朱达荣, 等. 基于 RGB 颜色空间的红外偏振人脸识别 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(12): 535-543.
- [43] LAVIGNE D A, BRETON M. A new fusion algorithm for shadow penetration using visible and midwave infrared polarimetric images [C]//2010 13th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2010: 1-7.
- [44] CHEN W, WANG S, JIN W, et al. Color reconstruction of medium infrared polarization images based on HSV and wavelet packet transform [C]//6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical System Technologies for Manufacturing and Testing. SPIE, 2012, 8420: 310-318.
- [45] ZHOU Y Q, ZHANG W, GU J L, et al. Improved infrared polarization imaging fusion based on HSV [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(12): 1379-1383. (周彦卿, 张卫, 顾静良, 等. 基于 HSV 空间的红外偏振图像改进融合算法 [J]. *激光与红外* 2014, 44(12): 1379-1383.
- [46] LIANG J, ZHANG W, REN L, et al. Polarimetric dehazing method for visibility improvement based on visible and infrared image fusion [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(29): 8221-8226.
- [47] SU Z, WANG X, ZHAO J, et al. Fusion method of infrared-polarization images based on common and unique salient feature [C]//Seventh Asia Pacific Conference on Optics Manufacture and 2021 International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (APCOM and YSAOM 2021). SPIE, 2022, 12166: 393-398.
- [48] YANG F, XIE C. Color contrast enhancement method of infrared polarization fused image [C]//AOPC 2015: Image Processing and Analysis. SPIE, 2015, 9675: 537-541.
- [49] GUO Z, YANG F B, JI L N, et al. A multi-feature separation fusion method of dark channel between infrared polarization and infrared intensity images [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(27): 76-81. (郭喆, 杨风暴, 吉琳娜, 等. 一种红外偏振与光强图像的暗原色多特征分离融合方法 [J]. *科学技术与工程* 2017, 17(27): 76-81.
- [50] YUAN H F, YANG F B, ZHANG L, et al. A comparative study of the performance of different image fusion technology [J]. *China Sciencepaper*, 2015, 10(20): 2405-2411. (原惠峰, 杨风暴, 张雷, 等. 不同图像融合技术的融合性能分析比较 [J]. *中国科技论文* 2015, 10(20): 2405-2411.
- [51] LI W W, YANG F B, LIN S Z, et al. Second fusion method of infrared polarization image [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 515-520. (李伟伟, 杨风暴, 蔺素珍, 等. 一种红外偏振图像的二次融合方法 [J]. *应用光学* 2012, 33(3): 515-520.
- [52] YU X, CHEN Q, GU G, et al. An infrared polarization image fusion method based on NSCT and fuzzy C-means clustering segmentation algorithms [C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Infrared Technology and Applications. SPIE, 2014, 9300: 215-223.
- [53] ZHANG L, YANG F, JI L. Multi-scale fusion algorithm based on structure similarity index constraint for infrared polarization and intensity images [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 24646-24655.
- [54] LI W W, YANG F B, LIN S Z, et al. Study on pseudo-color fusion of infrared polarization and intensity image [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(2): 109-113. (李伟伟, 杨风暴, 蔺素珍, 等. 红外偏振与红外光强图像的伪彩色融合研究 [J]. *红外技术* 2012, 34(2): 109-113.
- [55] ZHANG L, YANG F B, JI L N. Multi algorithm fusion of infrared polarization and intensity image based on difference feature exponential measure [J]. *Fire Control & Command Control*, 2018, 43(2): 49-54+59. (张雷, 杨风暴, 吉琳娜. 差异特征指数测度的红外偏振与光强图像多算法融合 [J]. *火力与指挥控制* 2018, 43(2): 49-54+59.
- [56] YANG F B, DONG A R, ZHANG L, et al. Infrared polarization image fusion using the synergistic combination of DWT, NSCT and improved PCA [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(3): 201-208. (杨风暴, 董安冉, 张雷, 等. DWT ■ NSCT 和改进 PCA 协同组合红外偏振图像融合 [J]. *红外技术* 2017, 39(3): 201-208.
- [57] TANG S. Face polarized thermal image fusion based on texture feature multi-resolution analysis [D]. Anhui Jianzhu University, 2024. (唐晟. 基于纹理特征多分辨率分析的人脸偏振热像融合 [D]. 安徽建筑大学 2024.
- [58] WANG F B, TANG S. A fusion algorithm of polarimetric-facial thermal images based on modified nonlinear diffusion filter in NSST domain [J]. *Journal of Changchun University*, 2023, 33(2): 11-20. (汪方斌, 唐晟. 基于 NSST 域非线性扩散滤波修正的人脸偏振热像融合算法 [J]. *长春大学学报* 2023, 33(2): 11-20.