

基于对比度和结构提取的红外与可见光图像融合

宋加文, 朱大明*, 付志涛, 陈思静

昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650031

摘要 为解决现有尺度变换方法在融合红外与可见光图像时出现对比度低和边缘轮廓不清晰问题, 提出一种基于对比度和结构提取的方法。首先对可见光图像进行自适应增强, 对红外图像进行线性归一化处理; 然后分别利用稠密 SIFT 描述符和局部梯度能量算子提取图像的局部对比度和显著结构, 结合局部对比度和显著结构的权重得到权重图, 通过快速引导滤波器消除权重图的不连续性和噪声; 最后利用金字塔分解方法对细化后的权重图和经过增强和线性归一化的源图像进行融合。在公共数据集上进行大量实验, 使用 6 种评价指标对实验结果进行定量分析, 并对所提方法与 10 种主流的图像融合算法进行定性对比。实验结果表明, 所提方法可以有效保留源图像的对比度、边缘轮廓和细节信息, 并在视觉感知和定量指标上取得更优的融合效果。

关键词 图像融合; 稠密 SIFT; 结构张量; 红外图像; 可见光图像

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222132

Infrared and Visible Image Fusion Based on Contrast and Structure Extraction

Song Jiawen, Zhu Daming*, Fu Zhitao, Chen Sijing

Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650031, Yunnan, China

Abstract This work presents a method based on contrast and structure extraction to overcome the the difficulties of low contrast and unclear edge contour in the fusion of infrared and visible images caused by existing multi-scale transformation methods. First, the visible image is adaptively improved and the infrared image is linearly normalized. Then, the local contrast and salient structure of the image are extracted using dense SIFT descriptors and local gradient energy operators, respectively, and the weight map is obtained by combining the weights of the local contrast and salient structure. The weight map eliminates discontinuities and noise with a rapid guidance filter. Finally, the weight map after thinning and the source image after enhancement and linear normalization are fused by the pyramid decomposition technique. Moreover, this research conducted a large number of experiments on publicly available datasets using six evaluation indicators to quantitatively examine the experimental outcomes, and qualitatively compared the proposed method with 10 mainstream image fusion algorithms. The experimental findings show that the suggested method can effectively preserve the contrast, edge contour, and detail information of the source image while achieving the best fusion effect in visual perception and quantitative indicators.

Key words image fusion; dense SIFT; structural tensor; infrared image; visible image

1 引言

随着传感器技术的快速发展, 多源传感器可以从不同方面获取图像信息, 而恰当的图像融合方法可以有效地从多源图像中提取有用信息, 生成鲁棒和兼备重要信息的图像。因此, 图像融合技术在计算机视觉

领域发挥着越来越重要的作用^[1]。目前图像融合技术已广泛应用于不同类型的图像, 如医学图像、遥感图像、多聚焦图像、可见光与红外图像、多曝光图像。其中红外与可见光图像融合是融合技术中的重要一项。

可见光图像通常具有较高的空间分辨率和丰富的细节纹理, 自然呈现的强度和对比度与人类视觉感知

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-08-11; 录用日期: 2022-08-29; 网络首发日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(41961053)

通信作者: *634617255@qq.com

一致,但可见光图像的质量容易受到天气条件和遮挡等影响。红外图像是由红外传感器捕捉热辐射成像得到的,不易受环境影响,并且目标信息显著,但红外图像空间分辨率低,纹理和细节信息较差。所以红外和可见光图像融合互补后可以更完整、准确地描述场景,便于后续的应用与决策^[2-3]。例如目标检测^[4]、目标识别^[5]、监视^[6]都是红外和可见光图像融合的典型应用。

近年来,研究者在红外和可见光图像融合领域提出大量的方法。这些方法通常可以分为两类,即传统方法和深度学习方法,多尺度变换方法是传统方法中最常用的方法^[7]。多尺度变换方法包括金字塔变换^[8-10]、小波变换^[11]、非下采样轮廓波变换^[12]、非下采样剪切波变换(NSST)^[13]、边缘保持滤波器^[14]和其他多尺度变换方法^[3, 15]。对于多尺度变换方法,其融合过程通常是:先对每个源图像进行多尺度分解,然后根据特定的融合规则将所有源图像的相应子带组合在一起,最后利用逆多尺度分解生成融合图像。由于基于多尺度的变换方法得到的图像特征与人类视觉特征是一致的,所以融合图像通常具有良好的视觉效果^[1, 16]。

在多尺度变换方法的早期,Toet等^[10]提出一种基于对比度金字塔的图像融合方法。该方法通过对比度金字塔可以有效识别和保留与视觉感知相关的高对比度细节,但由于融合结果是基于像素的简单选择,所以融合后的效果不佳^[3, 8]。后续,其他更复杂的多尺度变换方法被提出。Huang等^[17]提出一种基于NSST域不同约束条件的红外图像与可见光图像融合算法。该方法利用总变分最小化的思想对融合图像进行优化,保留了源图像显著目标,但融合图像细节模糊、对比度低,在视觉上不令人满意。Ma等^[15]提出一种基于梯度

转移和总变分最小化的红外与可见光图像融合方法,称为梯度转移融合(GTF)。该方法在一定程度上保留了源图像信息,但其融合结果边缘轮廓不清晰,视觉效果模糊^[2, 9]。在现有多尺度变换方法中,大多数方法都不能有效地保留图像边缘和细节信息,并且常使用“平均规则”来融合基础层,使基础层中能量丢失,降低了融合图像的整体对比度。

为此,本文提出一种基于对比度与结构提取的融合方法。首先对可见光图像进行自适应增强以消除源图像中的不良影响;然后使用稠密 scale invariant feature transform (SIFT) 描述符和局部梯度能量(LGE)算子提取图像的局部对比度和显著结构;并结合局部对比度和显著结构得到权重图,进而使用金字塔分解对细化后的权重图与经过增强和线性归一化的源图像进行融合。所提方法可以很好地保留图像对比度和边缘信息,并可以充分融入源图像中有效信息。

2 相关理论

2.1 图像自适应增强

由于可见光图像很容易受到成像环境的影响,例如不良照明、雾和其他恶劣天气^[1],故在融合之前对可见光图像进行自适应增强,以降低不良影响。

基于导向滤波的自适应增强算法^[18]在增强可见光图像方面取得较好效果,方法包括3个步骤,即图像分解、动态范围压缩、对比度恢复。在面对不同场景的可见光图像时,可根据照明条件对其进行自适应增强,从而恢复图像低照度区域原始细节,进而提高可见光图像可见性,效果如图1所示。而且这个算法的自适应特性能够防止过度增强现象。



图1 可见光图像及其增强图像示例。(a) Marne;(b)增强 Marne;(c) Road;(d)增强 Road

Fig. 1 Examples of visible image and its enhanced image. (a) Marne; (b) enhanced Marne; (c) Road; (d) enhanced Road

2.2 结构张量

图像的梯度特征能够准确反映图像的纹理、边缘和几何结构。梯度特征可以通过像素差异来测量,即一阶方向导数^[19-20]。结构张量是局部梯度特征分析的有效工具,已被广泛应用于图像处理任务,以下是结构张量定义过程。

对于任意 $\epsilon \rightarrow 0^+$, 图像 $f(x, y)$ 在 θ 方向 (x, y) 位置的变化平方可表示为

$$(\mathrm{d}f)^2 = \left\| f(x + \epsilon \cos \theta, y + \epsilon \sin \theta) - f(x, y) \right\|_2^2 \approx \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \epsilon \cos \theta + \frac{\partial f_i}{\partial y} \epsilon \sin \theta \right)^2. \quad (1)$$

图像 $f(x, y)$ 在 (x, y) 位置的变化率 $C(\theta)$ 可以表示为

$$C(\theta) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial f_i}{\partial y} \sin \theta \right)^2 = (\cos \theta, \sin \theta) \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \right)^2 & \sum_{i=1}^m \frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial y} \\ \sum_{i=1}^m \frac{\partial f_i}{\partial y} \frac{\partial f_i}{\partial x} & \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \right)^2 \end{bmatrix} (\cos \theta, \sin \theta)^T = (\cos \theta, \sin \theta) \sum_{i=1}^m \nabla f_i \nabla f_i^T (\cos \theta, \sin \theta)^T, \quad (2)$$

式中: $\nabla f_i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x}, \frac{\partial f_i}{\partial y} \right)^T$ 。二阶半正定矩阵表示为

$$P = \sum_{i=1}^m \nabla f_i \nabla f_i^T = \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $E = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \right)^2$, $F = \sum_{i=1}^m \frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial y}$, $G = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \right)^2$; P

通常被称为结构张量。

结构张量显著性(STS)检测算子可以定义为

$$O_{\text{STS}} = \sqrt{(\lambda_1 + \lambda_2)^2 + 0.5(\lambda_1 - \lambda_2)^2}, \quad (4)$$

式中: λ_1 和 λ_2 是结构张量的特征值。得到它们的表达式为

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(E + G) \pm \sqrt{(G - E)^2 + 4F^2} \right]. \quad (5)$$

3 所提方法内容

将详细讨论所提红外与可见光图像融合方法。融

合流程如图 2 所示。

1) 对可见光图像进行自适应增强,对红外图像进行线性归一化,得到图像 J_q ;

2) 通过稠密 SIFT 描述符和 LGE 算子对 J_q 进行测量,得到图像的局部对比度和显著结构,然后计算局部对比度的权重 C_q 和显著结构的权重 S_q ;

3) 结合 C_q 和 S_q ,得到初始权重图 M_q ;

4) 通过快速引导滤波器细化 M_q ,以消除不连续性和噪声,得到 R_q ;

5) 对 R_q 进行归一化,得到最终权重图 \bar{R}_q ;

6) 最终利用高斯金字塔和拉普拉斯金字塔分别分解 \bar{R}_q 和 J_q ,然后进行每层级混合,得到一个新的融合拉普拉斯金字塔 $L\{F(x, y)\}'$,最后对融合后的拉普拉斯金字塔进行重构,得到最终的融合图像 $F(x, y)$ 。

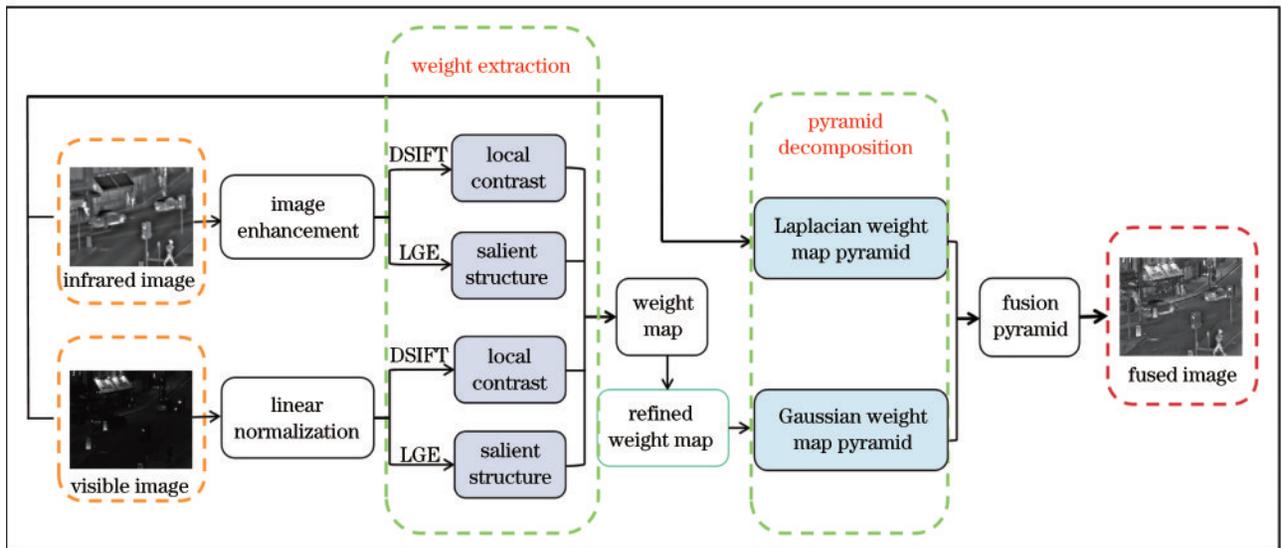


图 2 所提融合方法的流程

Fig. 2 Flowchart of the proposed fusion method

3.1 权重提取

为有效提取图像的对比度和显著结构,分别使用稠密 SIFT 描述符测量图像局部对比度以及 LGE 算子检测图像显著结构,然后计算红外和可见光图像的局部对比度和显著结构的相应权重。

3.1.1 对比度提取

在计算机视觉领域,图像局部特征和描述符是研究热点,在图像配准和目标识别中起着重要的作用^[21]。其中稠密 SIFT 描述符已逐渐应用于图像融合领域,如多聚焦图像融合^[22]。其思想是使用非标准化稠密 SIFT 来提取图像的局部对比度细节。然而,稠密 SIFT 描述符不是旋转和缩放不变的,但在红外与可见光图像融合中图像已预先得到配准,因此不需要旋转和尺度不变性^[23]。而且基于稠密 SIFT 描述符的活动

水平度量更可靠,对噪声更具鲁棒性,故通过稠密 SIFT 描述符提取图像局部对比度。

图像的对比度 C_q 通过稠密 SIFT 描述符测量,表达式为

$$C_q(x, y) = \left\| \text{DSIFT} \left[J_q(x, y) \right] \right\|, \quad q \in [1, n], \quad (6)$$

式中: $\text{DSIFT}(\cdot)$ 表示用于计算非标准化稠密 SIFT 的运算符。

3.1.2 结构提取

梯度图像包含源图像的边缘和纹理信息,由于结构张量显著性检测算子可以有效检测图像梯度信息,因此通过它来提取图像显著结构。然而,由于缺乏强度函数,结构张量显著性检测算子无法检测到图像梯度的细微特征。为提高结构检测性能,引入邻域能量算子来细化结构张量显著性检测算子,得到简单高效

的 LGE 算子。利用 LGE 算子提取梯度图像 S_q , 表达式为

$$S_q(x, y) = \text{NE}_{J_q}(x, y) \cdot \text{ST}_{J_q}(x, y), q \in [1, n], \quad (7)$$

式中: $\text{ST}_{J_q}(x, y)$ 是结构张量显著性检测算子从图像 J_q 提取的显著图像。 $\text{NE}_{J_q}(x, y)$ 表示 (x, y) 处的邻域能量特征, 可定义为

$$\text{NE}_{J_q}(x, y) = \sum_{a=-N}^N \sum_{b=-N}^N J_q(x+a, y+b), \quad (8)$$

式中: $(2N+1) \times (2N+1)$ 是邻域的大小, N 值控制窗口大小, 影响融合性能和复杂性。

3.1.3 权重计算

局部对比度和显著结构的权重根据像素包含的信息量的多少来决定, 像素包含的信息越多, 赋予它的权重就越大, 反之亦然。因此, 局部对比度和显著结构权重的计算公式为

$$\bar{C}_q(x, y) = \begin{cases} 1, & C_q(x, y) = \max\{C_q(x, y), q \in [1, n]\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\bar{S}_q(x, y) = \begin{cases} 1, & S_q(x, y) = \max\{S_q(x, y), q \in [1, n]\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (10)$$

为保持源图像的信息完整, 将局部对比度和显著结构的两个权重相乘, 获得初始权重图 M_q :

$$M_q(x, y) = \bar{C}_q(x, y) \times \bar{S}_q(x, y), \quad (11)$$

式中: $\bar{C}_q(x, y)$ 和 $\bar{S}_q(x, y)$ 分别是式(9)和式(10)获得的二值图像。

3.2 权重图细化

从式(11)获得的权重图可能包含导致伪影的不一致性和噪声。因此, 有必要细化权重图, 故使用快速引导滤波细化权重图, 表达式为

$$R_q(x, y) = G_{r, \epsilon}[M_q(x, y), M_q(x, y)], q \in [1, n], \quad (12)$$

式中: $G_{r, \epsilon}$ 表示引导滤波器, r 和 ϵ 是引导滤波器的参数; M_q 用作输入图像和引导图像。对细化权重进行归一化处理, 以使每个像素的权重总和为 1, 最终权重图计算为

$$\bar{R}_q(x, y) = \frac{R_q(x, y) + c}{\sum_{q=1}^n R_q(x, y) + c}, q \in [1, n], \quad (13)$$

式中: c 是一个很小的正值, 例如 10^{-25} ; \bar{R}_q 是最终权重图。

3.3 金字塔分解

将高斯金字塔和拉普拉斯金字塔分别应用于分解式(13)中, 得到最终权重图和图像 J_q 。在每个层级对 J_q 的拉普拉斯金字塔与权重图的高斯金字塔进行混合, 得到一个新的融合拉普拉斯金字塔。最后对融合后的拉普拉斯金字塔进行重构, 得到最终的融合图像。

金字塔分解应用为

$$L\{F(x, y)\}^l = \sum_{q=1}^n \left[G\{\bar{R}_q(x, y)\}^l \times L\{J_q(x, y)\}^l \right], q \in [1, n], \quad (14)$$

式中: l 表示金字塔分解层级; $\{\bar{R}_q\}^l$ 和 $\{J_q\}^l$ 分别表示权重图和图像 J_q 的高斯金字塔和拉普拉斯金字塔; $L\{F(x, y)\}^l$ 表示融合的拉普拉斯金字塔, 从该金字塔组合能获得最终的融合图像 $F(x, y)$ 。

4 融合实验

首先介绍实验的数据集、参数设置和评价指标。然后在数据集上进行大量的实验, 并从视觉效果、客观指标方面对所提方法与其他 10 种优秀的方法进行比较, 以验证所提方法的有效性。对比的融合算法包括 INS^[19]、ADF^[24]、CNN^[25]、FPDE^[26]、GTF^[15]、HMSD₋GF^[18]、Hybrid_MSD^[3]、IFEVIP^[27]、TIF^[28]和 VSMWLS^[14]。

4.1 实验相关介绍

4.1.1 测试数据集

测试图像是从 VIFB 测试集和 TNO 数据集获得的, 这些图像已被广泛应用于红外与可见光图像融合, 可以全面验证所提方法的有效性。图像涵盖了不同的场景, 如舰艇、汽车、人和直升机等。并且每对可见光和红外图像都已被配准。

4.1.2 实验参数设置

窗口大小 N 设置为 4, 稠密 SIFT 描述符的尺度值大小设置为 16。根据文献[29], 引导滤波器的参数已设置为最佳值, 并且对比算法中的参数也均按照原文最优值进行设置。

4.1.3 融合评价指标

为定量评价融合算法性能, 在文献[30]公开代码中收集到 6 个指标, 来定量评价融合结果。6 个指标分别是基于信息理论的信息熵(EN)、基于图像特征的平均梯度(AG)、空间频率(SF)、边缘强度(EI)、 $Q^{AB/F}$ 、基于人类感知的指标 Q_{cb} 。

4.2 VIFB 测试集图像融合

在文献[30]的 VIFB 测试集中选取 elecbike、man、manlight、manwithbag、nightcar 及 tricycle 场景的 6 对红外与可见光图像进行测试, 部分融合结果如图 3 所示。

从图 3 的标注部分可以看出: 所提方法有效地融入了红外图像的显著信息, 并且场景中的物体边缘轮廓清晰, 纹理细节丰富, 具备良好的视觉效果; INS 方法所得融合图像的纹理细节信息较差, tricycle 场景的方框部分未融入红外图像的显著信息。表 1 为两种方法的融合结果的客观评价。所提方法的 6 个评价指标和时间效率优于 INS 方法, 表明所提方法具有较高的运行效率, 并且可以有效保留源图像的显著目标和纹

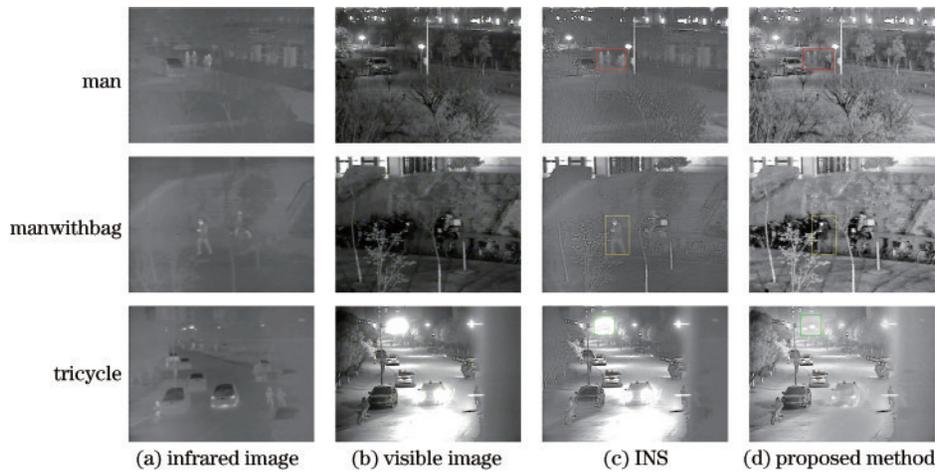


图 3 man、manwithbag 和 tricycle 场景的融合结果

Fig. 3 Fusion results of man, manwithbag, and tricycle scenarios

表 1 融合结果的客观评价(平均值)

Table 1 Objective evaluation of fusion results (mean value)

Method	AG ↑	EN ↑	Q_{cb} ↑	SF ↑	EI ↑	$Q^{AB/F}$ ↑	Time/s ↓
INS	4.988	6.551	0.486	18.160	50.414	0.694	3.269
Proposed method	7.107	7.295	0.573	22.358	72.388	0.774	1.581

理细节,使得融合图像边缘轮廓清晰,符合人类视觉感知。

4.3 TNO 数据集图像融合

为验证所提方法的泛化性能,从 TNO 数据集中

选取 21 对经典场景的红外与可见光图像用作测试。

4.3.1 定性分析

图 4~6 是不同方法得到的融合结果。在图 4 中:所提方法和其他 9 种算法均融入了红外图像中人和左

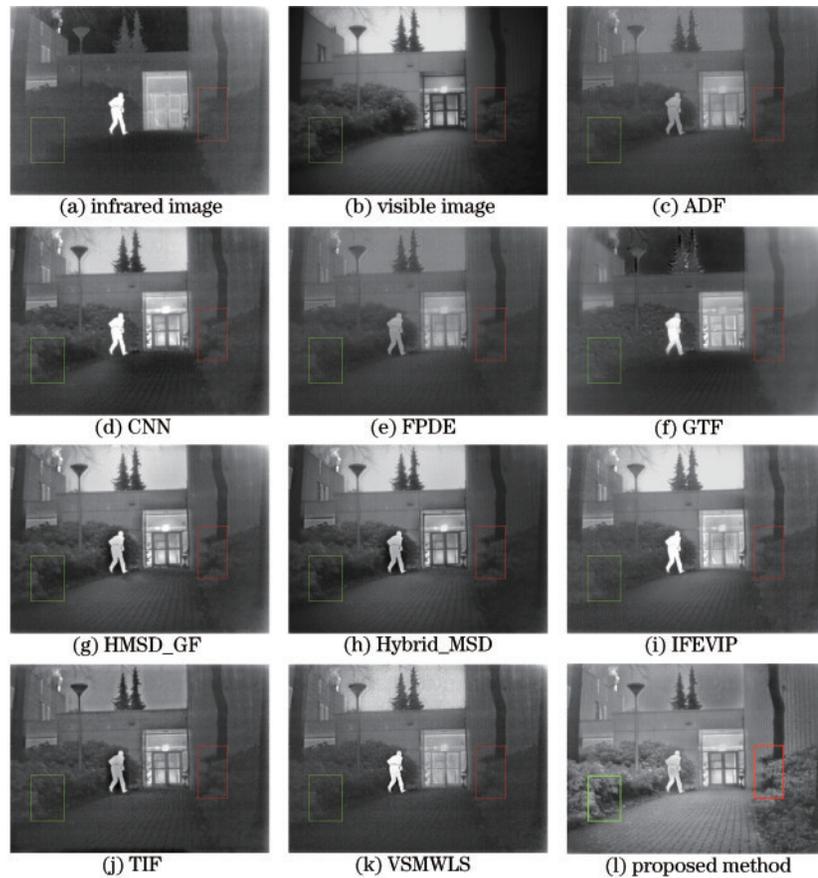


图 4 “Movie_01”场景融合结果

Fig. 4 Fusion results in the “Movie_01” scene

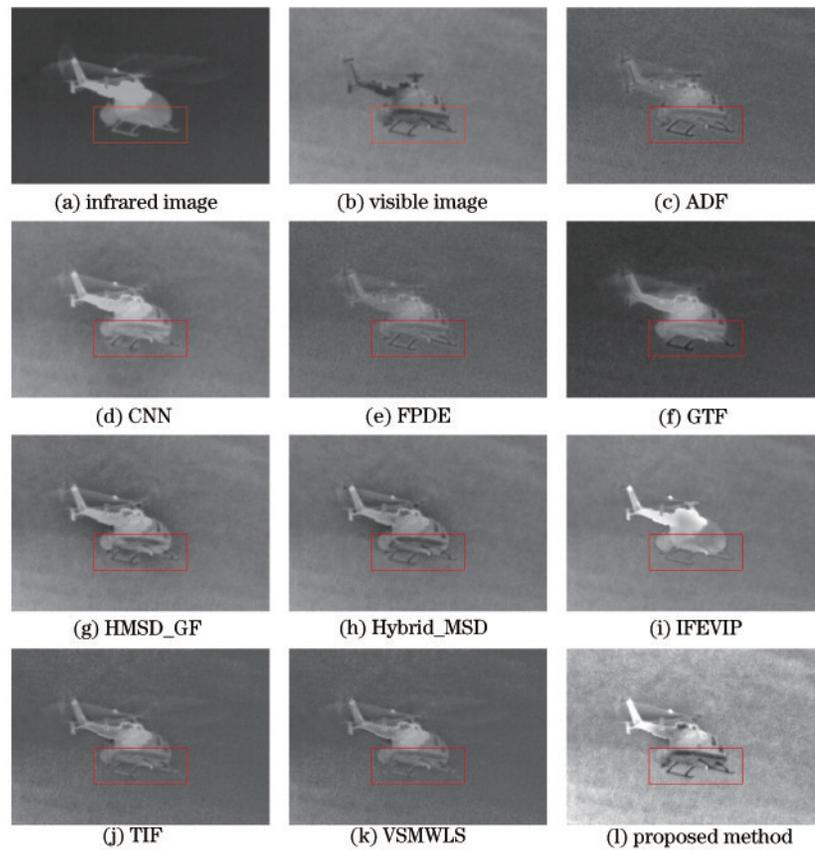


图 5 “helib_011”场景融合结果

Fig. 5 Fusion results in the “helib_011” scene

上角烟筒冒出的烟;其中 ADF、GTF 和 FPDE 方法获得的图像整体上视觉效果较为模糊,由于融合过多的红外信息,图像背景的对比较低,边缘轮廓不清晰;VSMWLS、CNN 和 IFEVIP 方法的融合图像中有噪声,细节丢失并且边界不清晰,如方框部分所示;HMSD_GF、TIF、Hybrid_MSD 方法融合效果较好,细节纹理保持较好,噪声信息少,但在人像处出现了黑色光晕;所提方法处理的图像细节更清晰,能够清楚看到花丛中叶子的轮廓等,并且路面条纹的纹理很清晰,很好地融入了可见光图像的细节和边缘信息,呈现出较高的图像分辨率。

在图 5 中:IFEVIP 方法得到的融合图像与红外图像接近,并未有效融入可见光图像的纹理和细节信息;ADF 和 FPDE 方法得到的图像整体视觉较为模糊,红外图像的显著信息丢失严重,从而导致图像对比较低;CNN 方法的图像边缘轮廓模糊,缺少可见光图像的细节纹理信息;GTF、TIF 和 VSMWLS 方法均不同程度丢失了可见光图像的背景信息,其中 GTF 处理的图像的纹理细节较差,TIF 和 VSMWLS 处理的图像的对比度较低;HMSD_GF、Hybrid_MSD 融合效果相对较好;相比其他 9 种算法,所提方法处理的图像的边缘轮廓清晰,对比度高,纹理细节信息丰富,如方框部分所示。

在图 6 中可以看到更多融合结果,其中差异显著部分已用箭头和方框进行标注,从图 6 中可以观察到与图 4 和图 5 类似的视觉效果。

4.3.2 定量分析

表 2 是对 21 组测试图像客观评价的平均值。所提方法有 5 个指标优于其他 9 种融合算法,取得最佳的融合效果。AG、EI、 $Q^{AB/F}$ 和 SF 指标最优,表明所提方法融合结果的细节和纹理丰富,对比度高,边缘轮廓清晰,验证了所提基于对比度和结构提取的方法的有效性; Q_b 值最优,表明融合图像符合人眼视觉,与定性分析结果一致;其中 EN 值低于 CNN 和 HMSD_GF 方法,在 10 种方法中排第 3,比最优值仅低 0.094,而由定性分析可知 CNN 和 HMSD_GF 方法存在噪声和光晕,导致伪信息增加,使 EN 值大于所提方法。综合上述分析并结合图 7 点线趋势可知,所提方法在保持视觉效果的情况下,充分注入了红外图像显著信息和可见光图像的细节纹理信息,取得较好的融合效果,验证了所提方法的有效性。在时间效率上:所提方法的运行时间较 CNN 方法快 58.991 s,比时间效率最高的 TIF 方法慢 1.393 s;与同类型的多尺度变换方法相比,和其中 ADF 和 HMSD_GF 方法的时间效率较为接近,但与 Hybrid_MSD 方法相比,时间效率优势比较明显。

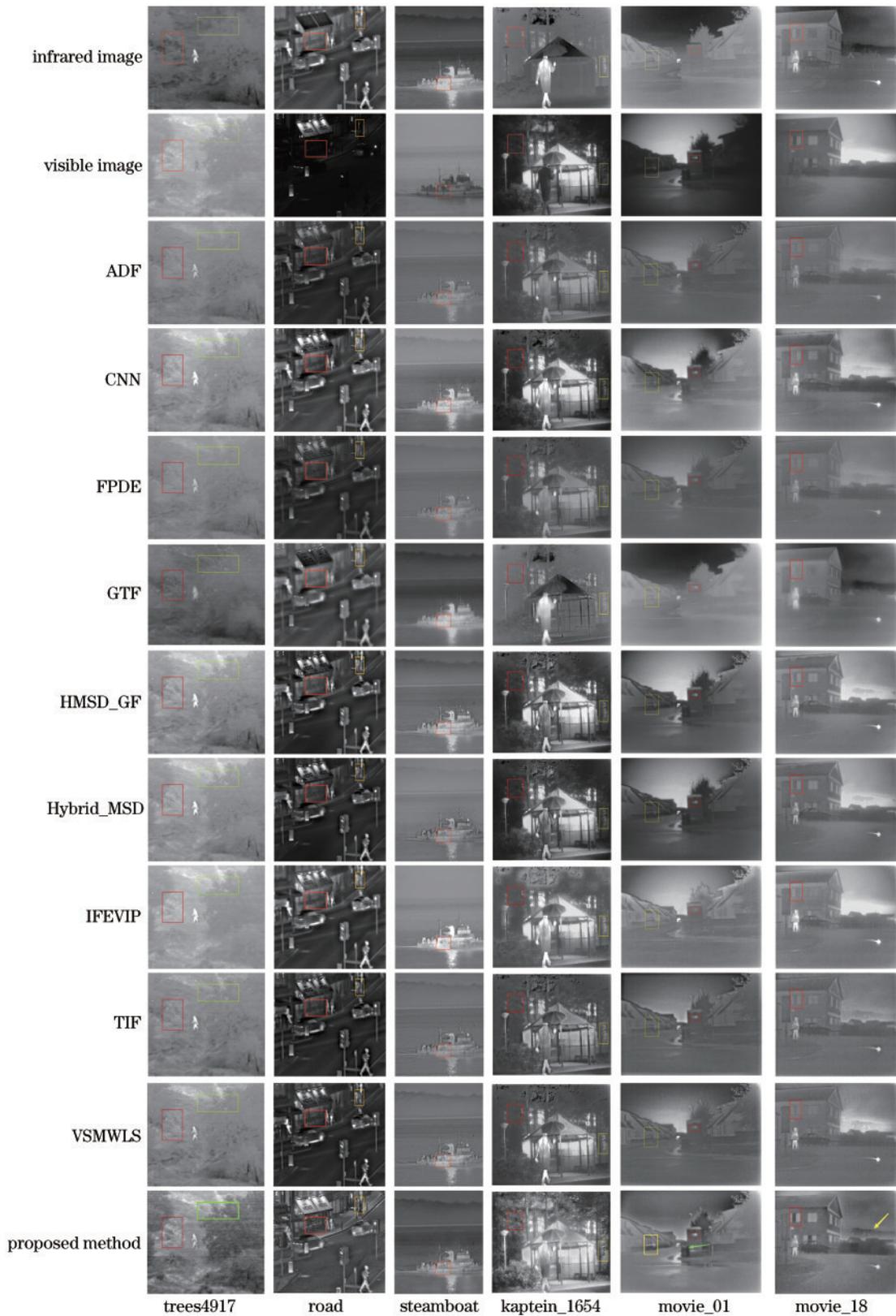


图 6 6 个经典场景的融合结果
Fig. 6 Fusion results in six classic scenes

4.4 方法分析

对所提方法的关键步骤对融合结果的影响进行分析。在 VIFB 和 TNO 测试集中随机选取 8 对图像,分

别利用所提方法、去除图像自适应增强的方法、去除权重的方法进行图像融合,并选取 4 个指标对融合结果进行客观评价,结果如表 3 所示。

表 2 融合结果的客观评价(平均值)
Table 2 Objective evaluation of fusion results (mean value)

Method	AG ↑	EN ↑	Q_{cb} ↑	SF ↑	EI ↑	$Q^{AB/F}$ ↑	Time/s ↓
ADF	3.644	6.290	0.502	9.093	36.398	0.417	0.718
CNN	4.313	7.074	0.555	11.122	44.069	0.488	60.484
FPDE	3.530	6.271	0.489	8.557	35.294	0.390	1.434
GTF	3.263	6.657	0.412	8.716	33.021	0.346	3.968
HMSD_GF	4.824	7.027	0.551	12.359	49.082	0.467	1.148
Hybrid_MSD	4.529	6.887	0.545	11.746	46.041	0.456	4.133
IFEVIP	3.830	6.681	0.469	9.730	39.390	0.407	0.173
TIF	4.024	6.555	0.527	10.369	41.515	0.433	0.100
VSMWLS	4.602	6.649	0.505	11.816	46.130	0.436	1.814
Proposed method	5.198	6.980	0.581	13.215	52.399	0.516	1.493

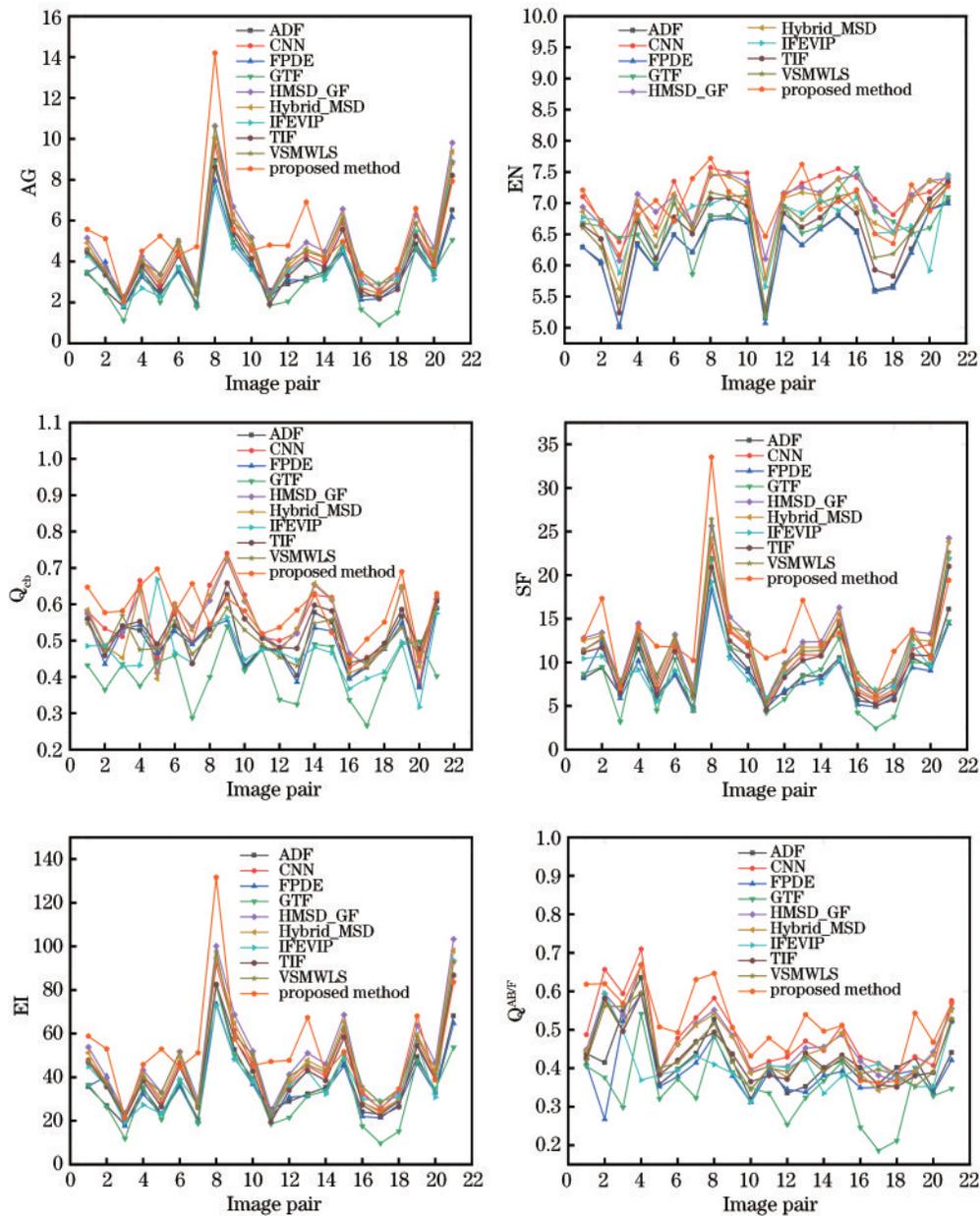


图 7 21 对测试图像的融合结果客观评价

Fig. 7 21 objective evaluation of fusion results of test images

表 3 权重和图像增强对融合效果的影响(平均值)

Table 3 Influence of weight and image enhancement on the fusion effect (mean value)

Method	AG	EN	SF	EI
Unweighted	4.084	4.801	15.448	40.388
No adaptive enhancement	4.351	7.103	15.707	44.553
Proposed method	6.104	7.140	19.864	61.843

5 结 论

针对红外与可见光图像融合结果的对比度低以及边缘轮廓不清晰问题,提出了一种基于对比度与结构提取的红外与可见光图像融合方法。将稠密 SIFT 描述符和结合局部能量的结构张量应用于红外与可见光图像融合,分别提取源图像局部对比度和显著结构这两个重要信息,进而有效提高图像对比度和图像清晰度,增强图像边缘轮廓,充分融入源图像信息,有利于后续目标检测、识别等任务。在不同场景的典型测试图像上,所提方法与 ADF、CNN、FPDE、GTF、HMSD_GF、Hybrid_MSD、IFEVIP、TIF、VSMWLS、INS 10 种具有代表性方法进行对比,所提方法在视觉感知和定量指标上取得更优的融合效果,实验结果证明了所提方法的有效性。在未来研究中,将致力于研究先进的可见光图像增强方法。此外,随着深度学习已经广泛应用于图像融合领域,后续将重点研究基于深度学习的融合方法。

参 考 文 献

- [1] Ma J Y, Ma Y, Li C. Infrared and visible image fusion methods and applications: a survey[J]. Information Fusion, 2019, 45: 153-178.
- [2] Li H, Qi X B, Xie W Y. Fast infrared and visible image fusion with structural decomposition[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 204: 106182.
- [3] Zhou Z Q, Wang B, Li S, et al. Perceptual fusion of infrared and visible images through a hybrid multi-scale decomposition with Gaussian and bilateral filters[J]. Information Fusion, 2016, 30: 15-26.
- [4] Lahmyed R, Ansari M E, Ellahyani A. A new thermal infrared and visible spectrum images-based pedestrian detection system[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(12): 15861-15885.
- [5] Ariffin S M Z, Jamil N, Rahman P N M A. Can thermal and visible image fusion improve ear recognition? [C]// 2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT), May 17-18, 2017, Amman, Jordan. New York: IEEE Press, 2017: 780-784.
- [6] Kansal K, Subramanyam A V, Wang Z, et al. SDL: spectrum-disentangled representation learning for visible-infrared person re-identification[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 30(10): 3422-3432.
- [7] 杨艳春, 裴佩佩, 党建武, 等. 基于交替梯度滤波器和

改进 PCNN 的红外与可见光图像融合[J]. 光学精密工程, 2022, 30(9): 1123-1138.

Yang Y C, Pei P P, Dang J W, et al. Infrared and visible image fusion based on an alternating gradient filter and improved PCNN[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(9): 1123-1138.

- [8] Jin H Y, Jiao L C, Liu F, et al. The fusion of infrared and visible images based on contrast pyramid directional filter banks using clonal selection optimising[J]. Optical Engineering, 2008, 47(2): 027002.
- [9] Chen J, Li X J, Luo L B, et al. Infrared and visible image fusion based on target-enhanced multiscale transform decomposition[J]. Information Sciences, 2020, 508: 64-78.
- [10] Toet A, van Ruyven L J, Valetton J M. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid[J]. Optical Engineering, 1989, 28(7): 789-792.
- [11] Madheswari K, Venkateswaran N. Swarm intelligence based optimisation in thermal image fusion using dual tree discrete wavelet transform[J]. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2017, 14(1): 24-43.
- [12] 傅志中, 王雪, 李晓峰, 等. 基于视觉显著性和 NSCT 的红外与可见光图像融合[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(2): 357-362.
- [13] Fu Z Z, Wang X, Li X F, et al. Infrared and visible image fusion based on visual saliency and NSCT[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(2): 357-362.
- [13] 林剑萍, 廖一鹏. 结合分数阶显著性检测及量子烟花算法的 NSST 域图像融合[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1406-1419.
- Lin J P, Liao Y P. A novel image fusion method with fractional saliency detection and QFWA in NSST[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1406-1419.
- [14] Ma J L, Zhou Z Q, Wang B, et al. Infrared and visible image fusion based on visual saliency map and weighted least square optimisation[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 82: 8-17.
- [15] Ma J Y, Chen C, Li C, et al. Infrared and visible image fusion via gradient transfer and total variation minimisation[J]. Information Fusion, 2016, 31: 100-109.
- [16] Liu Y, Liu S P, Wang Z F. A general framework for image fusion based on multi-scale transform and sparse representation[J]. Information Fusion, 2015, 24: 147-164.
- [17] Huang Y, Bi D Y, Wu D P. Infrared and visible image fusion is based on different constraints in the non-subsampled shearlet transform domain[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1169.
- [18] Zhou Z Q, Dong M J, Xie X Z, et al. The fusion of infrared and visible images for night-vision context enhancement[J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6480-6490.
- [19] Li X S, Zhou F Q, Tan H S, et al. Multimodal medical image fusion based on a joint bilateral filter and local gradient energy[J]. Information Sciences, 2021, 569: 302-325.
- [20] Li X S, Zhou F Q, Tan H S, et al. Multi-focus image

- fusion based on nonsubsampling contourlet transform and residual removal[J]. *Signal Processing*, 2021, 184: 108062.
- [21] Liu Y, Liu S P, Wang Z F. Multi-focus image fusion with dense SIFT[J]. *Information Fusion*, 2015, 23: 139-155.
- [22] Liu C, Yuen J, Torralba A. SIFT flow: dense correspondence across scenes and its applications[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(5): 978-994.
- [23] Hayat N, Imran M. Ghost-free multiexposure image fusion technique using dense SIFT descriptor and guided filter[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, 62: 295-308.
- [24] Bavirisetti D P, Dhuli R. The fusion of infrared and visible sensor images based on anisotropic diffusion and Karhunen-Loeve transform[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(1): 203-209.
- [25] Liu Y, Chen X, Cheng J. Infrared and visible image fusion with convolutional neural networks[J]. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 2018, 16(3): 1850018.
- [26] Bavirisetti D P, Xiao G, Liu G. Multi-sensor image fusion based on the fourth order partial differential equations[C]//2017 20th International Conference on Information Fusion, July 10-13, 2017, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [27] Zhang Y, Zhang L J, Bai X Z, et al. Infrared and visual image fusion through infrared feature extraction and visual information preservation[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 83: 227-237.
- [28] Bavirisetti D P, Dhuli R. Two-scale image fusion of visible and infrared images using saliency detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 52-64.
- [29] Nejati M, Karimi M, Soroushmehr S M R, et al. Fast exposure fusion using exposedness function[C]//2017 IEEE International Conference on Image Processing, September 17-20, 2017, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2017: 2234-2238.
- [30] Zhang X C, Ye P, Xiao G. VIFB: a visible and infrared image fusion benchmark[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 14-19, 2020, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 468-478.