

# 基于红外与可见光图像融合技术发展与性能评价

刘智嘉, 贾鹏, 夏寅辉, 林昱, 徐长彬  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:** 红外图像可以全天候且不受光照条件影响的根据目标和背景热辐射差异来区分目标和背景。可见光图像可以通过人的视觉系统的高空间分辨率和清晰度来提供景物的质地和结构细节。因此将红外图像和可见光图像融合可以结合两种图像优势, 融合后的图像效果预期良好。本文对传统经典方法和目前较新融合方法进行综述。首先回顾了红外和可见光图像的融合方法, 其次选取了一些融合图像的性能评价指标, 然后选择具有代表性的具体算法进行图像融合, 根据融合图像结果获取评测指标, 最后根据指标进行分析并对现状进行总结讨论, 及对以后的工作发展方向进行展望。

**关键词:** 红外图像; 可见光图像; 图像融合

**中图分类号:** TP391.41      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.05.021

## Development and performance evaluation of infrared and visual image fusion technology

LIU Zhi-jia, JIA Peng, XIA Yin-hui, LIN Yu, XU Chang-bin  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Infrared images can distinguish the target from the background according to their different radiation, no matter the condition of the weather and light. Visible images can provide texture and structural details of scenes through the high spatial resolution and sharpness of human visual system. Therefore, the fusion of infrared image and visible image can combine the advantages of the two kinds of images, and the image effect after fusion is expected to be good. Firstly, the traditional and new fusion methods are reviewed in this paper. Secondly, some evaluation indicators of fused images are selected, and then representative algorithms are selected for image fusion, and evaluation indicators are obtained according to the results of fused images. Finally, according to the analysis of indicators the status quo is summarized and discussed, and the future work is prospected.

**Key words:** infrared images; visual images; images fusion

### 1 概述

图像融合是图像增强技术中的一种,也是图像处理技术中的重要组成部分,图像融合旨在将不同传感器产生的图像中的有用信息融合在一起,输出一幅更适合视觉信息接收或者计算机处理分析和决策的图像。相对于单一传感器图像,融合图像可明

显改善清晰度和信息量方面的不足,可以更准确、更可靠、更全面地获得目标及场景信息。一个优秀的融合方法的关键在于是否能够有效地提取图像信息和恰当地使用融合原理,而且在图像中提取有用信息的同时又不带入伪影。随着科技的进步和发展,传感器技术也在迅速发展,伴随着相关应用程序也

需要越来越全面的信息来增强对各种条件的判断和利用。但是同类型传感器仅能获得某一类型的信息,所以融合技术在相关应用范围中越来越被需要。

不同类型的图像都可以进行图像融合,比如红外图像,可见光图像,微光成像图像和雷达图像。本文主要介绍红外和可见光图像的融合。图像融合的目的是将不同的信息融合在同一个图像上,所以被融合的图像的特征差异越大,融合的效果越突出。可见光图像是物体反射可见光所成的像,而红外图像是物体表面温度分部状态图像。由于成像原理不同,两种图像的特点总和基本上可以表达物体的绝大部分特征。可见光图像具有较高的空间分辨率、较高的对比度以及丰富的信息表现能力,但成像质量容易受光照程度和天气的影响,比如在光线较暗或者烟雾等环境下目标难以分辨。但在这种情况下,红外图像虽然有分辨率低和细节表现力差的缺点,成像却可以几乎不受干扰,仍然可以较好地呈现视场内景物温度分布。所以利用这两种图像的互补性来进行图像融合可在诸多领域广泛应用,如目标识别、检测、监视、遥感等等。

## 2 融合技术

### 2.1 基于多尺度变换的方法

基于多尺度分解的图像融合算法的主要特点是能够精确表征图像的空间结构,并具有空间和频谱的一致性。该方法主要包括三个步骤:多尺度分解;融合处理;图像重构。基于多尺度变换的方法使用范围较广,经典的方法较多,如金字塔法,小波和非下采样轮廓波等都属于多尺度变换方法。

#### (1) 金字塔变换

金字塔变换的概念于 20 世纪 80 年代提出,基本原理是将图像分解为不同尺寸空间频带的子图像,这些图像之间的数据结构形如金字塔所以讲该方法命名为金字塔法。金字塔法最主要的三种变换分别为:拉普拉斯金字塔、可控金字塔和对比度金字塔

拉普拉斯金字塔(LP)源于高斯金字塔<sup>[1-2]</sup>,其主要迭代过程为:低通滤波、采样、插值和差分<sup>[3]</sup>。如利用拉普拉斯金字塔变换和模糊逻辑融合水果的红外图像和可见光图像进行融合<sup>[4]</sup>,这比单用红外图像检测水果的效果更好。可控金字塔变换是将图像分解为不同尺度和方向的子图像的集

合。该方法具有自反转、无混叠、平移旋转不变的优点。对比度金字塔变换源于拉普拉斯金字塔变换,可以优化局部对比度<sup>[5]</sup>。

#### (2) 小波变换

小波变换也于 20 世纪 80 年代提出。该理论源于信号分解和重建的塔式算法<sup>[6]</sup>。金字塔变换和小波同属于多尺度变换,但是金字塔算法的多尺度系数彼此相关,而小波变换系数是不相关的。小波变换可以快速有效地表达一维分段平滑信号。红外和可见光图像融合主要的方法有离散小波变换、双树离散小波变换和提升小波变换。

离散小波变换的原理是将原图像用一组滤波器分解为一系列的高频子图像和低频子图像。其缺点是存在振荡、位移方差、混叠和方向性缺乏等问题<sup>[7]</sup>。双树离散小波变换因其基于分离滤波器组而具有计算效率高、位移不变和方向离散等离散小波不具备的优点<sup>[8]</sup>。提升小波变换<sup>[9]</sup>是一种完全的空间域变换方法,其优势为自适应设计、不规则采样等。

#### (3) 非下采样轮廓波变换(NSCT)

轮廓波变换基于拉普拉斯金字塔和方向滤波器组,其优势在于提取图像边缘的几何形状<sup>[10-11]</sup>。小波变换在将一维信号拓展为二维图像时可能会出现边缘点不连续的现象。通过使用非轮廓波滤波器就可以解决这样的问题。但是,轮廓波变换由于下采样和上采样以及使用的金字塔结构,会出现冗余移位方差等问题。为了解决这些问题,进而提出了非下采样轮廓波变换。

非下采样轮廓波变换基于非下采样金字塔和非下采样方向滤波器组,该方法具有灵活和完全位移不变的特点<sup>[12-13]</sup>。非下采样金字塔可实现多分辨率分解,该方法将图像分解成为一组高频和低频子图像。随后非下采样方向滤波器组分解其中高频子图像来实现多方向分解。非下采样轮廓波变换因为取消了轮廓波变换的上、下采样操作,而确保了频率的选择性和规律性并实现平移不变<sup>[14]</sup>。

#### (4) 保边滤波器

保边滤波器可以将图像分解为平滑的基层和一个或者多个细节层。它可以保持图像结构的空间一致性并减少边缘周边的晕影。使用保边滤波器可获得基层并获知强度变化的梯度。细节层包括一系列

细微尺度变化的图像并保存这些图像的细节。保边滤波器基于上述优点而被广泛应用,如均值滤波器、局部保边滤波器等。

均值滤波器是一种经典而简单的降噪方法,其原理是利用空间相邻像素的平均值来去除像素噪声。非局部均值滤波器原理相同,只是处理原则是根据灰度等级。局部保边滤波器可以同时保持全局突出图像边缘和局部形状,并增强局部细节。引导滤波器基于局部线性模型,是一种快速的线性时间滤波方法,具有保持边缘平滑和传递图像结构的优点<sup>[15]</sup>。

多尺度融合方法还有很多改进以及与其他方法相彼此结合的应用,如BMA滤波器和边缘权值结合的方法,对比如小波等传统多尺度算法也有明显进步<sup>[16]</sup>。

## 2.2 基于神经网络

神经网络通常由多个神经元组成,可以模仿人脑的感知行为机制来处理神经元信息。神经元之间的相互作用表征神经元信息的传递和处理。神经网络具有较强的适应性、容错性和抗噪能力<sup>[17]</sup>。

目前基于神经网络的红外和可见光图像融合的方法大多采用脉冲耦合神经网络(PCNN)或其变种。该方法最早于20世纪80年代后期提出。提出者引入一种称为ECKHORN模型的神经方法来模拟猫视觉皮层中神经元的同步脉冲和耦合。该方法在红外和可见光图像融合方案中常与多尺度变换相结合,一般包括三个步骤:首先,将源图像分解为低频子带和高频子带。然后,利用各种策略获得融合的低频子带和高频子带。最后,应用逆变换方法生成最终融合结果。

基于PCNN的红外和可见光图像融合方案的关键在于融合策略。一些方法在高频子带中使用PCNN方法,如一种改进的PCNN方法(NSCT-SF-PCNN)<sup>[18]</sup>,在NSCT域中调整高频系数,同时采用区域方差积分规则来融合低频子带系数。另外一种方法是在采用自适应PCNN和NSCT进行两次融合,且两次融合采用不同的融合是细节信息更清晰<sup>[19-20]</sup>。此外还可以采用PCNN来融合低频子带和高频子带系数,一种采用提升平稳小波变换获得原始图像的灵活多尺度平移不变表示方法,利用双通道PCNN来融合低频子带和高频子带系数<sup>[21]</sup>。以及利用双

树复合剪切波和PCNN方式混合算法<sup>[22]</sup>。当然除了和其他方法联合使用之外,PCNN还可以单独应用于红外和可见光图像的融合。如利用PCNN对源图像进行分隔并融合目标系数。

## 2.3 基于子空间的变换

基于子空间的方法的原理是将高维图像投影到低维空间——即子空间中。对子空间进行数据处理以获得原图像的结构,低维子空间因为数据结构简单,数据量相对较少,可以节省系统的内存和处理时间。主要方法有主成分分析和独立分量分析等<sup>[23]</sup>。

利用主成分分析法例如融合使用四阶偏微分方程分解(FPDE)的细节图像<sup>[24]</sup>,该方法可以得到传递到最终融合图像细节信息的最优权重值。

## 2.4 其他方法

除了上述较为常用的融合方法外,还有很多红外图像和可见光图像融合的方法。如显著性方法,该方法将目标作为重点对象,力求完全显示目标各种信息,同时也可以作为目标信息提取的方法<sup>[25]</sup>。又如基于模糊论的方法对模糊数据求解<sup>[26]</sup>,基于马尔科夫随机场的方法<sup>[27]</sup>等。另外还有一些强调某一方面信息的方法,如保留红外和可见光图像的亮度信息作为主要融合方向的方法<sup>[28]</sup>等,

## 2.5 混合方法

从上述分析可以看出不同的方法各有优势,但是根据应用不同,可能会有使用任意单一方法都不能满足需求,所以将两种或者更多的方法混合在一起达到某种特定效果就成为研究人员最常用的方式,如NSCT-SF-PCNN,局部保边LC(LEPLC)<sup>[29]</sup>也是多种融合方法的混合方法。

## 3 融合性能评价

图像融合性能评价主要分为主观评价和客观评价<sup>[30]</sup>。

主观评价方法是根据人类视觉系统的上评价融合图像的质量,其在融合质量评价中起着重要的作用。人对融合质量的判断根据图像细节、目标完备性、图像失真等几个规则,不断地比较不同的融合方法。正因为融合图像是为了视觉上更方便的获取信息,所以在红外和可见光质量评价中主观评价方法是可靠且直接的,并且占据评价的主流地位。最简单的主观评价方法是通过训练观察者对融合图像进

行评分,不过这样的方式具有人为不确定性、耗时长、成本高、且不可重复等缺点<sup>[31]</sup>。针对这些问题,提出了一种能够定量、自动地测量融合图像质量的客观评价方法。

与主观评价方法不同,客观评价方法可以定量地评价融合图像质量,它们与人类视觉感知高度一致,不易受观察者或者解释者偏好影响。客观评价方法由于基于信息论、结构相似度、图像梯度、统计和人类视觉系统等不同理论而又不同类型<sup>[32-34]</sup>。对于性能评价有很多评价指标,本文选取了目前覆盖相对较广泛的指标对融合结果进行衡量对比。

熵(EN)是用来表示融合图像中包含信息的量。熵的值与图像中包含信息量的多少成正比。不过熵的值会受到噪声干扰,与噪声量也成正比,所以熵往往作为辅助评测指标。

交互信息值(MI)是衡量源图像中到融合图像中被转移的信息量的多少的指标。

结构相似性(SSIM)广泛应用于各种处理后图像的效果评价,如降噪,融合等。该指标主要用来表示图像的失真和畸变程度。

标准差(SD)用来反应融合图像的分部和对比度的统计概念。具有高对比度的融合图像SD值较高,这表示融合图像的视觉效果良好。

空间频率(SF)是基于水平梯度和垂直梯度的图像质量指标,水平梯度也称为空间行频率,垂直梯度也称为空间列频率。空间频率可以有效表示图像的梯度分布。

视觉信息保真度(VIF)可以测量融合图像的信息保真度,并且其测试结果与视觉系统感知具有一致性。测量通过对源图像和融合滤波并划分不同区域,之后评估每个区域具有不是失真的视觉信息,之后计算每个子带的VIF,最后计算VIF的整体结果。

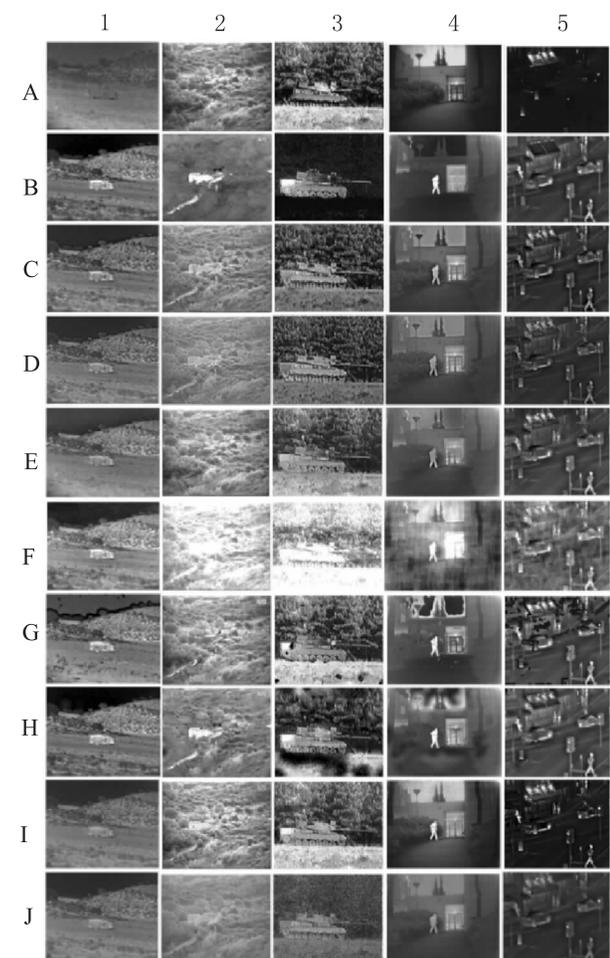
相关系数(CC)用来表示融合图像和源图像的线性相关度。

#### 4 实验

我们选择了拉普拉斯金字塔变换(LP)、非下采样轮廓波变换(NSCT)和引导波滤波器变换(GFF<sup>[35]</sup>)、双树多分辨率离散余弦变换(DTM-DCT<sup>[36]</sup>)、信息激励的PCNN即OI-PCNN<sup>[37]</sup>(O-P)、NSCT域中SF激励的PCNN(N-P)、LEPLC、FPDE共

八种融合方法。LP、NSCT和GFF是三种传统的经典融合方法。DTMDCT是基于小波变换的改进方法。O-P和N-P是两种典型的基于神经网络的融合方法。FPDE是基于子空间的方法。LEPLC是基于显著性的方法。

上述融合方法的代码都是公开的,并且参数与原始参数保持一致。评价参数指标选用前文中提到的评估指标即EN<sup>[38]</sup>、MI<sup>[39]</sup>、SSIM<sup>[40]</sup>、SD<sup>[41]</sup>、SF<sup>[42]</sup>、VIF<sup>[43]</sup>和CC<sup>[44]</sup>用来评估红外图像和可见光图像融合方法效果,各项评估值越大表示效果越好。



a(VI), b(IR), c(LP), d(NSCT), e(GFF), f(DTMDCT),  
g(O-P), h(N-P), i(LEPLC), j(FPDE)

图1 八种融合方法融合图像及源图像对比图

Fig. 1 Comparison of fusion images of eight fusion methods and source images

图1为实验结果对比图。实验图像使用5对可见光图像和对应的红外图像,每一列为一组图像,图像编号位于该列图像顶部。利用上述的8种不同方法进行图像融合并与源图像对比展示。每个英文字母对应该类或该方法融合图像,前两行为源图像,后

面为八种融合方法融合图像。通过直接观测可以看出 LP、NSCT 和 GFF 这三个传统的融合方法的融合图像效果总体基本类似,除 GFF 在第二张图片中车辆显示不太明显外,融合效果表现良好。使用 DT-MDCT 方法的融合图像比其他方法图像的亮度更高,但是第二张和第三张图片亮度过高。信息丢失严重,效果非常不理想。OI-PCNN 和 NSCT-SF-PCNN 这两种基于神经网络的融合方法共同特点是对于不同图像效果差异较大,融合图像整体对比度较高,目标在图像中更为明显,有较好的目标突出效果,但是许多非光滑色块严重失真,总体比较下 N-P 法稍好。LEPLC 是基于显著性方法的算法,在显著目标传递至融合图像方面的性能的表现较替他图像有明显优势。但一些细节损失,在该方法融合的第五张图片表现较为明显。FPDE 方法融合图像对比度较低。红外目标相对不够突出。在较暗环境下的图像融合较好,如融合图像的第四和第五张。细节表现较差,明亮环境下引入噪声过多,如该方法融合图像第三张,噪声过多,细节丢失。

表 1 八种融合方法各图像 EN 值对比表

Tab.1 Eight fusion methods for each image EN value comparison

	1	2	3	4	5
LP	7.1	7.2	7.45	6.6	6.45
NSCT	6.98	6.95	7.39	6.42	6.35
GFF	7.1	7.44	7.76	6.8	6.9
DTCMCT	7.43	5.75	4.94	7.3	7.52
O-P	7.25	7.48	7.92	7.15	7.19
N-P	6.8	7.07	7.49	6.69	6.75
LEPLC	7.2	7.51	7.89	7.06	7.15
FPDE	6.7	6.74	7.0	6.2	6.32

表 2 八种融合方法各图像 MI 值对比表

Tab.2 Eight fusion methods for each image MI value comparison

	1	2	3	4	5
LP	2.2	1.6	1.96	1.06	2.65
NSCT	2.3	1.35	1.96	1.12	2.75
GFF	3.45	6.95	2.3	2.25	4.42
DTCMCT	2.7	1.17	1.33	1.15	2.48
O-P	4.26	5.2	5.1	4.32	5.91
N-P	5.62	1.05	1.21	0.92	1.88
LEPLC	2.66	2.6	2.58	1.97	3.72
FPDE	2.51	1.38	1.3	1.22	2.95

表 3 八种融合方法各图像 SSIM 值对比表

Tab.3 Eight fusion methods for each image SSIMvalue comparison

	1	2	3	4	5
LP	0.77	0.581	0.435	0.415	0.396
NSCT	0.784	0.589	0.441	0.428	0.398
GFF	0.765	0.465	0.412	0.384	0.393
DTCMCT	0.681	0.465	0.556	0.418	0.471
O-P	0.692	0.482	0.396	0.368	0.381
N-P	0.69	0.53	0.342	0.425	0.378
LEPLC	0.779	0.575	0.445	0.407	0.422
FPDE	0.792	0.588	0.187	0.41	0.385

表 4 八种融合方法各图像 SD 值对比表

Tab.1 Eight fusion methods for each image SD value comparison

	1	2	3	4	5
LP	40.8	36.7	53.9	26.3	30.7
NSCT	39.3	31	51.3	23.1	29.5
GFF	39.6	46.2	60.9	33.6	50.4
DTCMCT	53.6	37.6	53	41.2	62.1
O-P	41.8	46.6	74.1	39.9	56.4
N-P	51.3	37.9	67.8	30.1	29.8
LEPLC	42.3	48.9	70.5	38.6	53.2
FPDE	36.5	27	74.5	19.6	28.1

表 5 八种融合方法各图像 SF 值对比表

Tab.5 Eight fusion methods for each image SF value comparison

	1	2	3	4	5
LP	10.7	15.5	34	11.2	12.3
NSCT	10.5	15.3	33.2	11	11.9
GFF	10.1	14.7	31	10.8	12.1
DTCMCT	12.4	13.9	26.2	12.9	10.9
O-P	13.1	15.9	37.5	13.2	19.8
N-P	10.3	12.8	29	10.1	11.7
LEPLC	13.9	21.2	37.8	16	16.1
FPDE	10.6	11.5	92.5	11	7.8

表 6 八种融合方法各图像 VIF 值对比表

Tab.6 Eight fusion methods for each image VIF value comparison

	1	2	3	4	5
LP	0.452	0.49	0.2	0.313	0.653
NSCT	0.439	0.392	0.218	0.314	0.635
GFF	0.483	0.499	0.304	0.362	0.507
DTCMCT	0.47	0.188	0.305	0.248	0.409
O-P	0.402	0.472	0.371	0.373	0.406
N-P	0.508	0.3	0.173	0.275	0.429
LEPLC	0.416	0.468	0.171	0.286	0.816
FPDE	0.341	0.312	0.122	0.339	0.445

表 7 八种融合方法各图像 CC 值对比表

Tab. 7 Eight fusion methods for each image CC value comparison

	1	2	3	4	5
LP	0.789	0.587	0.501	0.437	0.452
NSCT	0.801	0.6	0.513	0.468	0.672
GFF	0.786	0.559	0.452	0.578	0.63
DTMCT	0.723	0.511	0.4	0.445	0.461
O-P	0.707	0.489	0.391	0.618	0.553
N-P	0.695	0.537	0.391	0.422	0.382
LEPLC	0.794	0.557	0.45	0.58	0.588
FPDE	0.821	0.623	0.232	0.47	0.472

表 1 至表 7 是融合图像 7 个不同参数定量分析对比表。每一个表都是 8 种融合方法对 5 幅图的某一项特定参数的评分,且分数越高表明该方法在该项目的表现越好。通过定量分析,可以看到每种算法都有优劣势。LP 和 NSCT 总体来说不同图像各项评分差别不大,这两种算法在 CC 指标上占有明显优势,说明这两种方法的优势是可以将源图像的信息相对最大化的保留到融合图像中。GFF 方法总体来看在 CC 和 SF 总和中表现良好,说明在融合图像中保持了较多的梯度信息。DTMCT 方法融合的图像与视觉感知相同,同样的参数值在不同的图像中的相对表现也很不稳定。因为第二和第三幅融合图像信息丢失严重,所以在 EN 方面评分相对于其他方法差距非常大,该方法的主要优势在于 SSIM,说明该方法融合的图像在图像各部分结构上保持整体具有优势。因为该方法亮度较高,所以在明亮场景下反而效果较差,但是因为红外图像更多用于夜视和光线条件不好的场景下,所以光照条件差的情况下,图像各种细节相较其他方法显示较多。OI-PCNN 和 NSCT-SF-PCNN 同基于神经网络方法有一定的共性,在 MI 指标方面表现优异,但是在 SSIM 方面表现欠佳,这说明在定性试验中图像是严重失真的。在这两种方法对比中,OI-PCNN 除偶尔几个指标稍逊 NSCT-SF-PCNN 外,整体表现均优于后者。LEPLC 在 EN 和 SD 方面表现优异,表明该方法具有丰富的信息量和较大对比度。FPDE 在 MI 方面表现不佳,说明该方法融合的图像只有少量的源信息转移到融合图像中。以上显示的是各种方法的特点,其余指标各种方法表现差异不大。

## 5 结论和展望

红外和可见光图像融合的方法几乎都是在 20 世纪 80 年代开始迅速发展,从那时起该领域一直被重视,并发挥越来越大的作用。我们选取了各种主要算法的代表算法进行介绍和对比试验,根据常用的红外和可见光图像融合评价指标对不同方法融合的一系列图像进行测评。通过主观评价和客观评价相结合的方式对图像进行评价,以对不同方法的特点充分展示。

通过对各种方法的分析不仅可以发现不同方法的特点,同时也能够发现一些不足和改进的方向:

(1)传统的融合方法如基于金字塔变换、基于小波变换等方法在各个单项性能表现整体较为良好,没有明显不足,但是却并没有特别突出的融合性能,原因之一就是分解和融合的函数总是固定的,如果可以做到根据不同图像、不同步骤选择基函数,或者做到函数自适应,也许融合性能会有明显改变。

(2)红外和可见光图像融合方法众多,但是基于深度学习的方法非常少,现在深度学习发展迅速,利用深度学习进行红外和可见光图像融合应该会是很好的发展方向。

(3)因为红外图像和可见光图像传感器的空间分辨率不同,这方面可以与图像的超分辨率相结合。

(4)某些算法对特定图像表现较好但是对部分图像可能引入噪声而被放弃,可以适当加入降噪。

(5)传统融合方法的出发点立足于将源图像信息尽可能的保留至融合图像中,但是很多信息并非应用需求,可根据某些特定需求应用突出显示其有用信息,可以提高效率,降低系统需求。

(6)融合算法性能并不总是和融合图像性能匹配,融合评价指标也并非能够完全反应融合图像的主观评价,适当的修改评价指标和进入新评价指标有利于融合方法的进步。

### 参考文献:

- [1] YE Yinfang, NIE Jianying. Fusion of IR/PMMW image based on Laplacian pyramid transform[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and guidance, 2014, 34(2): 165-167. (in Chinese)
- 叶银芳, 聂建英. 基于拉普拉斯金字塔变换的红外/被动毫米波图像融合[J]. 弹箭与制导学报, 2014. 34

- (2):165-167.
- [2] XIAO Jinsheng, RAO Tianyu, JIA Qian, et al. An image fusion algorithm of Laplacian pyramid based on graph cutting[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(7): 1416-1424. (in Chinese)  
肖进胜, 饶天宇, 贾茜, 等. 基于图切割的拉普拉斯金字塔图像融合算法[J]. 光电子·激光, 2014, 25(7): 1416-1424.
- [3] WANG Yumei, CHEN Daimei, ZHAO Genbao. Image fusion algorithm of infrared and visible image based on target extraction and Laplace transformation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, (1): 104-112. (in Chinese)  
汪玉美, 陈代梅, 赵根保. 基于目标提取与拉普拉斯变换的红外和可见光图像融合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, (1): 104-112.
- [4] D Bulanon, T Burks, V Alchanatis. Image fusion of visible and thermal images for fruit detection, Biosyst. Eng, 2009, 103(1): 12-22.
- [5] Jin Haiyan, Jiao Licheng, Liu Fang. et al. Fusion of infrared and visible images based on contrast pyramid directional filter banks using clonal selection optimizing[J]. Opt. Eng., 2008, 47(2): 027002.
- [6] S G Mallat, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans, Pattern Anal. Mach. Intell, 1989, 11(7): 674-693.
- [7] Niu Yifeng, Xu Shengtao, Wu Lizhen, et al. Airborne infrared and visible image fusion for target perception based on target region segmentation and discrete wavelet transform[J]. Math. Problems Eng. 2012, 275138: 1-10.
- [8] K Madheswarim N. Venkateswaran, Swarm intelligence based optimization in thermal image fusion using dual tree discrete wavelet transform[J]. Quant. Infrared Thermography J. 2017, 14(1): 24-43.
- [9] LIU Ailin. Double filtering algorithm of infrared images based on lifting wavelet transform[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 545-548. (in Chinese)  
刘艾琳. 基于提升小波变换的红外图像双重滤波算法[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 545-548.
- [10] H Li, L Liu, W Huang C. et al. An improved fusion algorithm for infrared and visible images based on multi-scale transform[J]. Infrared Phys. Technol, 2016, (74): 28-37.
- [11] S Liu, Y Piao, M Tahir. Research on fusion technology based on low-light visible image and infrared image[J]. Opt. Eng., 2016, 55(12): 123104.
- [12] A L Cunha J Zhou, M. N. Do. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Trans. Image Process, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [13] Zhao Chunhui, Guo Yunting, Wang Yulei, A fast fusion scheme for infrared and visible light images in NSCT domain[J]. Infrared Phys. Technol., 2015, (72): 266-275.
- [14] Adu Jianhua, Gan Jianhong, Huang Jian. Image fusion based on nonsubsampling contourlet transform for infrared and visible light image[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, (61): 94-100.
- [15] Shuaiqi Liu, Mingzhu Shi, Zhuhui Zhu. et al. Image fusion based on complex-shearlet domain with guided filtering[J]. Multidim Syst Sign Process, 2015, (7): 5.
- [16] LI Bobo, MA Yong, ZHANG Xiaohua. et al. Infrared and visible image fusion based on BMA filter and edge[J]. Infrared Technology, 2018, 40(2): 139-146. (in Chinese)  
李博博, 马泳, 张晓晔, 等. 基于BMA滤波器和边缘的红外与可见光图像融合[J]. 红外技术, 2018, 40(2): 139-146.
- [17] H Jiang, Y Tian, Fuzzy image fusion based on modified self-generating neural network[J]. Expert Syst. Appl., 2011, 38(7): 8515-8523.
- [18] Qu Xiaobo, Yan Jingwen, Xiao Hongzhi, et al. Image fusion algorithm based on spatial frequency-motivated pulse coupled neural networks in nonsubsampling contourlet transform domain[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(12): 1508-1514.
- [19] WANG Lie, LUO Wen, CHEN Junhong, et al. Fusion of infrared and visible image based on adaptive PCNN and information extraction. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(4): 192-198. (in Chinese)  
王烈, 罗文, 陈俊鸿, 等. 自适应PCNN与信息提取的红外与可见光图像融合[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(4): 192-198.
- [20] Das S Kundu, M K NSCT-based multimodal medical image fusion using pulse-coupled neural network and modified spatial frequency[J]. Medical & Biological Engineering, 2012, 50(10): 1105.
- [21] G S El-taweel, A K Helmy. Image fusion scheme based on modified dual pulse coupled neural network[J]. IET Image Process, 2013, 7(5): 407-414.
- [22] M Yin, P Duan, W Liu, et al. A novel infrared and visible image fusion algorithm based on shift-invariant dual-tree

- complex shearlet transform and sparse representation[J]. *Neurocomputing*, 2017, 226: 182 – 192.
- [23] H B Mitchell. *Image Fusion: Theories, Techniques and Applications* [M]. Springer Science & Business Media, 2010.
- [24] D P Bavirisetti, G Xiao, G Liu. Multi-sensor image fusion based on fourth order partial differential equation [C]. *Proceedings of the International Conference on Information Fusion*, 2017: 1 – 9.
- [25] Z Zhang, Y Xu, J Yang, et al. A survey of sparse representation; algorithms and applications [J]. *IEEE Access* 2015 (3): 490 – 530.
- [26] Q Jiang, X Jin, S J, et al. A novel multi-focus image fusion method based on stationary wavelet transform and local features of fuzzy sets [C]. *IEEE Access*, 2017: 20286 – 20302.
- [27] T Shibata, M Tanaka, M Okutomi, et al. Veratile visible and near-infrared image fusion based on high visibility area selection [J]. *J. Electron. Imaging*, 2016, 25 (1): 013016.
- [28] S S Malik, B Shivprasad, G. Maruthi, et al. Feature level image fusion [C]. *Proceedings of CCSO*, 2013: 42 – 46.
- [29] X Zhang, Y Ma, F Fan, et al. Infrared and visible image fusion via saliency analysis and local edge-preserving multi-scale decomposition [J]. *JOSA A*, 2017, 34 (8): 1400 – 1410.
- [30] ZHU Lian, SUN Feng, XIA Fangli, et al. Review on image fusion reseach [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(2): 14 – 19. (in Chinese)  
朱炼, 孙枫, 夏芳莉, 等. 图像融合研究综述 [J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(2): 14 – 19.
- [31] A Toet, E M Franken, Perceptual evaluation of different image fusion schemes [J]. *Displays*, 2003, 24(1): 25 – 37.
- [32] WANG Yuqing, WANG Suojian. Quality assessment method of IR and visible fusion image [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 396 – 401. (in Chinese)  
王宇庆, 王索建. 红外与可见光融合图像的质量评价 [J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 396 – 401.
- [32] XIN jin, Qian Jiang, Shaowen Yao, et al. A survey of infrared and visual image fusion methods [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 478 – 501.
- [33] LIU Xinle. *Reseach on thermal infrared and visible image fusion* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)  
刘信乐. 热红外图像与可见光图像融合方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [34] GAO Shaoshu, JIN Weiqi, WANG Xia, et al. Perceptual sharpness metric for visible and infrared color fusion image [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (12): 3197 – 3202. (in Chinese)  
高绍姝, 金伟其, 王霞, 等. 可见光与红外彩色融合图像感知清晰度评价模型 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3197 – 3202.
- [35] S LI, H Qin, J Li, et al. Image fusion with guided filtering [J]. *IEEE trans. Image Process*, 2013, 22(7): 2864 – 2875.
- [36] V Naidu, Novel image fusion techniques using dct [J]. *Int J. Comput. Sci. Bus. Inf.*, 2013, 5(1): 1 – 18.
- [37] X Qu, C Hu, J Yan, et al. Image fusion algorithm based on orientation information motivated pulse coupled neural networks [C]. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automatoin*, 2008: 2437 – 2441.
- [38] J W Roberts, J Van Aardt, F Ahmed, et al. Assessment of image fusion procedures using entropy, image quality, and multispectral classification [J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2008, 2(1): 023522.
- [39] G Qu, D Zhang, P Yan. Information measure for performance of image fusion [J]. *Electron. Lett.*, 2002, 38(7): 313 – 315.
- [40] Z Wang, A C Bovik. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Process [J]. Lett*, 2002, 9(3): 81 – 84.
- [41] Y J Rao. In-fibre bragg grating sensors [J]. *Measurment Sci. Technol*, 1997, 8(4): 355.
- [42] A M Eskicioglu, P S Fisher. Image quality measures and their performance [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1995, 43 (12): 2959 – 2965.
- [43] Y Han, Y Cai, Y Cao, et al. A new image fusion performance metric based on visual information fidelity [J]. *Inform. Fus*, 2013, 14(2): 127 – 135.
- [44] M desh mukh, U Bhosale. Image fusion and image quality assessment of fused images [J]. *Int. J. Image Process*, 2010, 4(5): 484 – 508.