

文章编号: 2095-4980(2020)05-0870-07

## 基于SGC变换耦合边缘特征加权的图像融合算法

杨许亮<sup>1</sup>, 万琳<sup>2</sup>

(1.广州大学松田学院 计算机科学与技术系, 广东 广州 510000; 2.华中科技大学 软件学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 当前图像融合主要通过图像特征取大的方法来融合图像系数, 忽略了图像边缘特征的相关性, 使融合结果中存在块现象和不连续现象等不足。为此, 引入二代曲波(SGC)变换, 设计边缘特征加权的图像融合算法。将输入图像通过SGC变换, 分解出其低频和高频系数; 采用区域能量模型, 计算出图像所包含的能量特征, 通过均值模型, 计算出图像所包含的亮度特征。利用图像的能量和亮度特征, 构造双特征低频系数融合函数, 获取能量特征和亮度特征都较为理想的融合低频系数。利用Sobel算子对图像的边缘特征进行检测, 利用检测结果构造边缘特征加权的高频系数融合准则, 获取高频系数融合结果。最后, 借助二代曲波逆变换处理融合系数, 获取融合图像。实验测试结果显示, 相对于当前融合技术, 所提算法具有更好的融合效果, 其融合图像具备更好的边缘连续性以及清晰度。

**关键词:** 图像融合; 二代曲波变换; 区域能量; 双特征; 低频系数; Sobel算子; 边缘特征加权  
**中图分类号:** TN911.73      **文献标志码:** A      **doi:** 10.11805/TKYDA2019504

## An image fusion algorithm based on Second Generation Curvelet transform coupled with edge feature weighting

YANG Xuliang<sup>1</sup>, WAN Lin<sup>2</sup>

(1.Department of Computer Science and Technology, Sontian College of Guangzhou University, Guangzhou Guangdong 510000, China, 2.School of Software, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430000, China)

**Abstract:** Many image fusion methods, such as large image features to fuse image coefficients, ignore the correlation of edge features between images, resulting in block phenomenon and discontinuity in the fused image. This paper designs an image fusion algorithm with edge feature weighting based on the second generation of curved wave transform. Firstly, the input image is decomposed into low frequency and high frequency coefficients by Second Generation Curvelet(SGC) transform. Then, the region energy model is employed to calculate the energy features of the image, and the mean value model is adopted to calculate the brightness features of the image. By using the energy and brightness features of the image, the fusion function of low-frequency coefficients with two features is constructed to obtain the fusion low-frequency coefficients with excellent energy and brightness features. Sobel operator is introduced to detect the edge features of the image, and the fusion function of high frequency coefficients weighted by the edge features is constructed based on the detection results to obtain the fusion results. Finally, the fusion experiments are carried out with the algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm has better fusion effect than current algorithms, and the edge continuity and clarity of the fusion image are better.

**Keywords:** image fusion; Second Generation Curvelet transform; regional energy; double features; low frequency coefficients; Sobel operator; edge feature weighting

为将多个目标内容清晰地置于一幅图像中, 人们开始对图像融合技术开展研究<sup>[1-4]</sup>。当下融合方法较多, 如杜进楷等<sup>[5]</sup>在非下采样剪切波变换的基础上设计了图像融合方法。由于图像拉普拉斯能量特征取大法没考虑

收稿日期: 2019-11-28; 修回日期: 2020-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60973085); 广东省青年创新人才资助项目(2018KQNCX355)

作者简介: 杨许亮(1985-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机图像、计算机应用、区块链和软件工程。email:yangxiliang1985gz@yeah.net

图像间边缘特征的关系, 导致融合图像中含有边缘不连续现象。NEJATI 等<sup>[6]</sup>在融合图像时, 没有对融合区域的边缘特征进行计算, 导致融合图像含有块现象。RAHMAN 等<sup>[7]</sup>基于空间频率和拉普拉斯的聚焦测度方法, 不能较好地测量图像的细节信息, 导致融合图像存在振铃现象。LI 等<sup>[8]</sup>通过加权法和图像系数取大法, 对 SGC 变换得到不同图像系数进行融合, 获取融合结果, 由于系数取大法忽略了图像间边缘特征的相关性, 使融合图像中具有间断现象。AISHWARYA 等<sup>[9]</sup>基于小波变换的图像分解方法完成的图像融合, 被方向选择的多样性所限制, 易丢失图像信息, 且系数取大的方法没考虑图像间的边缘相关性, 导致该算法融合性能不佳。MUSTAFA 等<sup>[10]</sup>采取的图像融合方法对训练损失函数的依赖性较强, 且算法中的训练损失函数仅考虑了图像的结构相似性, 没考虑图像的边缘相关性, 易丢失图像的亮度以及边缘等特征, 融合图像效果不佳。

为避免融合图像中出现块现象与间断效应, 本文提出基于二代曲波变换耦合边缘特征加权的图像融合算法。在二代曲波变换作用下, 获取对输入图像信息保真度较好的低频和高频系数。在区域能量和均值模型的作用下, 分别获取图像的能量和亮度信息, 融合低频系数。在 Sobel 算子的作用下, 获取图像的边缘信息, 构造边缘特征加权的高频系数融合准则, 获取融合高频系数, 进而在逆二代曲波变换下生成融合图像。通过实验测试了本文算法的融合有效性。

### 1 图像融合算法设计

图像融合算法的流程如图 1 所示, 可以发现, 所提算法采用 SGC 变换, 对输入图像进行分解, 获取不同图像系数, 用于后续系数融合。由于 SGC 变换的良好稀疏表示能力, 分解所得图像系数富含输入图像丰富的原始信息。采用区域能量以及均值模型分别计算出图像的能量以及亮度特征, 用以获取融合低频系数, 使之能够更好地表征图像的概貌以及色彩内容。利用 Sobel 算子计算出图像的边缘信息, 再利用其在高频系数的融合过程中进行边缘特征加权, 考虑图像间边缘特征的相关性, 使融合高频系数能够更好地表征图像的细节内容。

#### 1.1 SGC 变换的图像分解

曲波变换较 Contourlet 变换、非下采样 Shearlet 变换等常用图像变换方法, 具有更好的稀疏性, 使分解所得不同图像系数能够包含更多输入图像的原始信息, 有助于提高融合图像的视觉表达效果<sup>[11-12]</sup>。虽然曲波变换分解图像的特性较为优越, 但其需要依靠 Ridgelet 分析才能完成图像的分解。而 Ridgelet 分析的计算较为复杂, 需要较多的计算时间<sup>[13]</sup>。对此, Donoho 等设计了在频域下进行图像分解的 SGC 变换, 其继承了曲波变换的优点, 摆脱了 Ridgelet 分析过程, 采用快速傅里叶变换完成图像的分解<sup>[14]</sup>。

SGC 变换分解图像时, 需要采用图 2 所示的窗口  $W_j(x)$  对图像进行频域分割<sup>[15]</sup>。

$$\begin{cases} W_j(x) = V_j(x)B_j(x) \\ V_j(x) = \sqrt{\varphi_{j+1}^2(x) - \varphi_j^2(x)} \\ B_j(x) = B(2^{\lfloor j/2 \rfloor} x_2/x_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $j$  为尺度量;  $x$  为空间位置量;  $x_1, x_2$  分别为  $W_j(x)$  的左、右下角位置量;  $V(\cdot)$  为过渡窗口函数;  $B(\cdot)$  为角度窗函数;  $\varphi(\cdot)$  为低通窗口的内积函数;  $\lfloor \cdot \rfloor$  代表向下取整运算。

利用剪切矩阵  $Z_{\eta_i}$  重构  $W_j(x)$ :

$$W_{j,l}(x) = V_j(x)B_j(Z_{\eta_i}x) \quad (2)$$

$$Z_{\eta_i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \eta_i & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

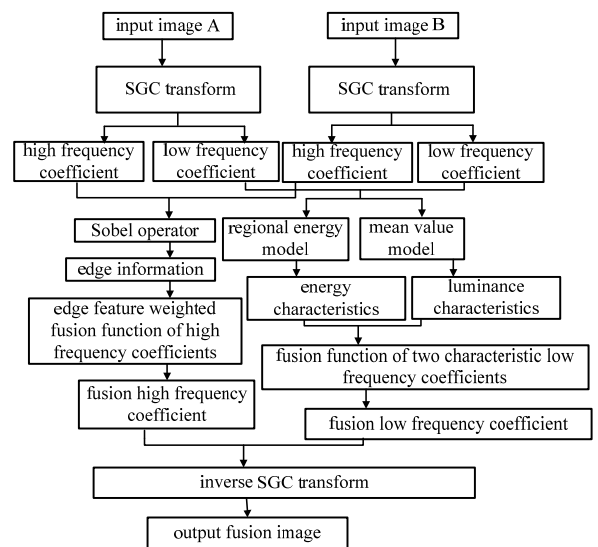


Fig.1 Flow of the proposed image fusion algorithm  
图 1 所提图像融合算法的流程

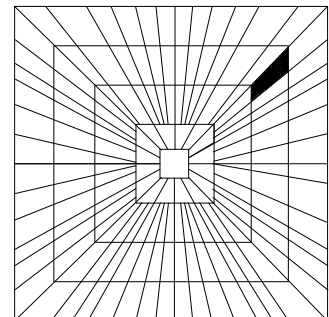


Fig.2 Segmentation window of frequency domain  
图 2 频域分割窗口

式中  $\tan \eta_l$  为等距斜率序列,  $\tan \eta_l = l \times 2^{-\lfloor j/2 \rfloor}$ ,  $l = -2^{\lfloor j/2 \rfloor}, \dots, 2^{\lfloor j/2 \rfloor} - 1$ , 其中  $l$  为方向数量。

笛卡尔坐标系下曲波变换函数  $C_{j,l,k}(x)$  为:

$$C_{j,l,k}(x) = 2^{3j/4} C_j \left[ \mathbf{Z}_\eta^T (x - \mathbf{Z}_\eta^{-T} b) \right] \quad (4)$$

式中:  $b = (k_1 \times 2^{-j}, k_2 \times 2^{-j/2})$ ;  $k = (k_1, k_2) \in \mathbf{Z}^2$  为位移参数。

利用二维离散信号  $f[t_1, t_2] (0 \leq t_1, t_2 < n)$  对  $C_{j,l,k}(x)$  进行 USFFT 计算, 便可实现 SGC 变换, 从而获取图像的不同系数<sup>[16]</sup>。

## 1.2 图像系数融合

图像的概貌信息主要依靠于低频系数来呈现。通过区域能量可算出图像的能量特征, 反应图像的概貌信息。能量特征值越大, 说明概貌信息越丰富。通过均值可算出图像的亮度特征, 反应图像的色彩信息。因此, 本文联合图像的能量特征以及亮度特征融合低频系数, 使之能较好呈现图像概貌信息的同时兼顾图像的色彩信息, 提高融合图像的质量。

图像  $I(x,y)$  中  $M \times N$  大小的窗口  $R$  对应的区域能量(Local Energy, LE)为<sup>[17]</sup>:

$$LE = \sum_{i,j \in R} |I(i+x, j+y)|^2 \quad (5)$$

$I(x,y)$  对应的均值(Average Energy, AE)为<sup>[18]</sup>:

$$AE = \frac{1}{W \times V} \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^V I(x,y) \quad (6)$$

式中  $W \times V$  为  $I(x,y)$  的大小。

通过式(6)求得不同低频系数  $S_a, S_b$  对应的能量特征值分别为  $AES_a, AES_b$ 。通过式(5)求得不同低频系数  $S_a, S_b$  对应的亮度特征值分别为  $LES_a, LES_b$ 。利用能量特征  $AES_a, AES_b$  和亮度特征  $LES_a, LES_b$  构造的双特征低频系数融合函数可表述为:

$$S_{ab} = \frac{(AES_a + LES_a)S_a + (AES_b + LES_b)S_b}{AES_a + LES_a + AES_b + LES_b} \quad (7)$$

通过式(7)可求得不同低频系数  $S_a, S_b$  的融合结果  $S_{ab}$ 。

高频系数呈现了图像的边缘等细节, 本文利用图像的边缘特征来融合高频系数。Sobel 算子为当前图像边缘特征计算的一种主流算子。相较于其他图像边缘计算方法, Sobel 算子在检测图像边缘时还能减少噪声<sup>[19]</sup>。

Sobel 算子计算图像  $U_i(x,y)$  (其中  $i=a,b$ ) 的边缘特征值时, 依靠矩阵  $\mathbf{P}, \mathbf{E}$  实现。利用  $\mathbf{P}, \mathbf{E}$  计算  $U_i(x,y)$  的水平边缘特征值  $U_{iX}$  及垂直边缘特征值  $U_{iY}$  的过程为<sup>[20]</sup>:

$$U_{iX} = \mathbf{P} \times U_i(x,y) \quad (8)$$

$$U_{iY} = \mathbf{E} \times U_i(x,y) \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ 。

通过  $U_{iX}, U_{iY}$  计算图像  $U_i(x,y)$  边缘特征值  $TU_i$  为:

$$TU_i = \sqrt{U_{iX}^2 + U_{iY}^2} \quad (10)$$

通过式(10)求得不同高频系数  $U_a, U_b$  对应的边缘特征值分别为  $TU_a, TU_b$ 。通过边缘特征  $TU_a, TU_b$  进行加权, 计算融合高频系数  $U_{ab}$  为:

$$U_{ab} = \frac{TU_a \times U_a + TU_b \times U_b}{TU_a + TU_b} \quad (11)$$

$U_{ab}$  和  $S_{ab}$  在逆二代曲波作用下, 即可得融合图像。

## 2 实验结果

利用 Matlab 2010b 在 Intel Core i5-4210U 处理器、500 GB 硬盘的 Lenovo 计算机上建立实验环境, 并在该实验环境下测试本文算法的有效性, 同时将文献[7-10]中算法视为对照组。

2.1 图像融合量化测试与分析

采用 Nikon D3500 相机在图 3 所示的原始图上, 对不同的内容进行聚焦, 获取 12 组不同聚焦内容的输入图像(每一组含有 2 幅图像), 用于对照组算法和本文算法的图像融合测试。将各算法融合图像对应的信息熵(Information Entropy, IE)和平均梯度(Mean Gradient, MG)作为各算法的量化测试参数。

IE 体现图像所含信息量大小。在灰度级总数为  $S$  的图像中, IE 为<sup>[21]</sup>:

$$IE = -\sum_{i=0}^{S-1} P_i \log_2 P_i \tag{12}$$

式中  $P_i$  为灰度级  $i$  对应像素点出现的几率。

MG 借助图像  $I$  在水平和垂直方向上的差分值  $\Delta I_x$  和  $\Delta I_y$ , 反映图像的边缘等细节特征, 其与图像的质量成正比。令图像的尺寸为  $M \times N$ , 则 MG 的计算方法为<sup>[22]</sup>:

$$MG = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \left( \frac{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2}{2} \right)^{1/2} \tag{13}$$

考虑文章篇幅, 本文仅给出各算法对第一组和第二组图像的融合结果。各算法对第一组图像的融合结果如图 4 所示, 对第二组图像的融合结果如图 5 所示。从图 4 和图 5 中各算法的融合结果可见, 本文算法融合的图像具有最佳的效果。各算法融合图像对应的 IE 和 MG 参数值如图 6 所示。



Fig.3 Initial image  
图 3 原始图

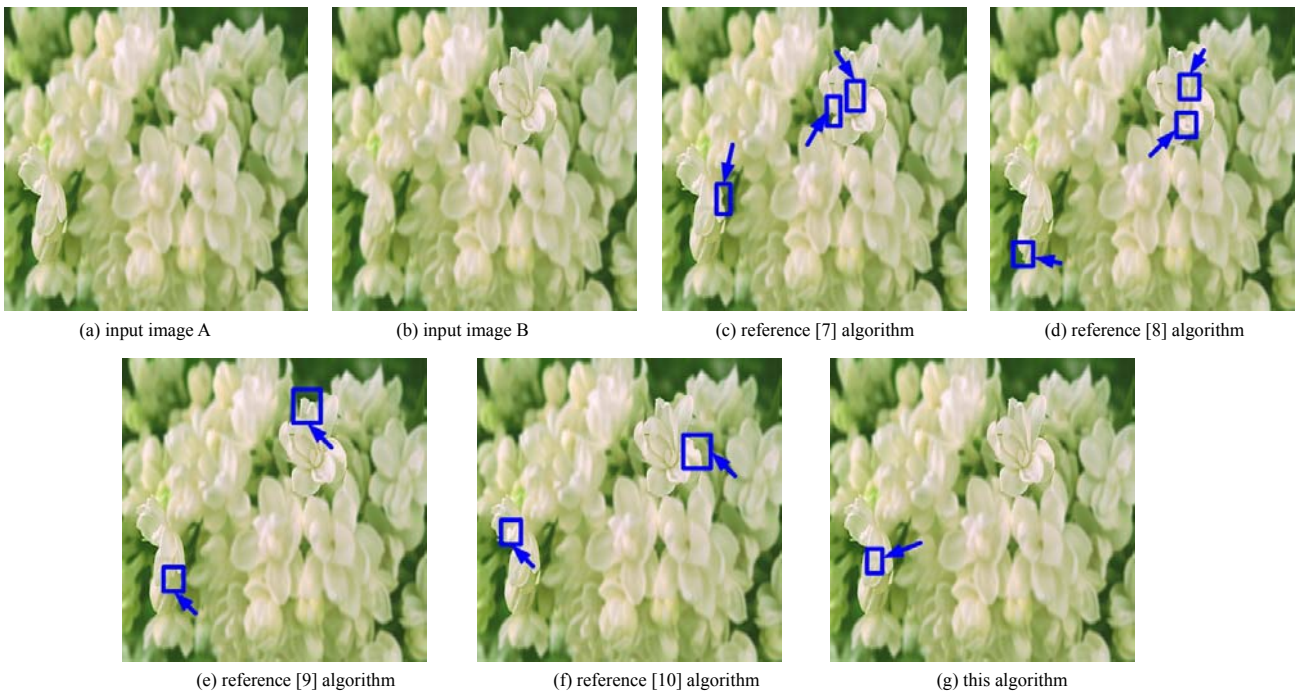
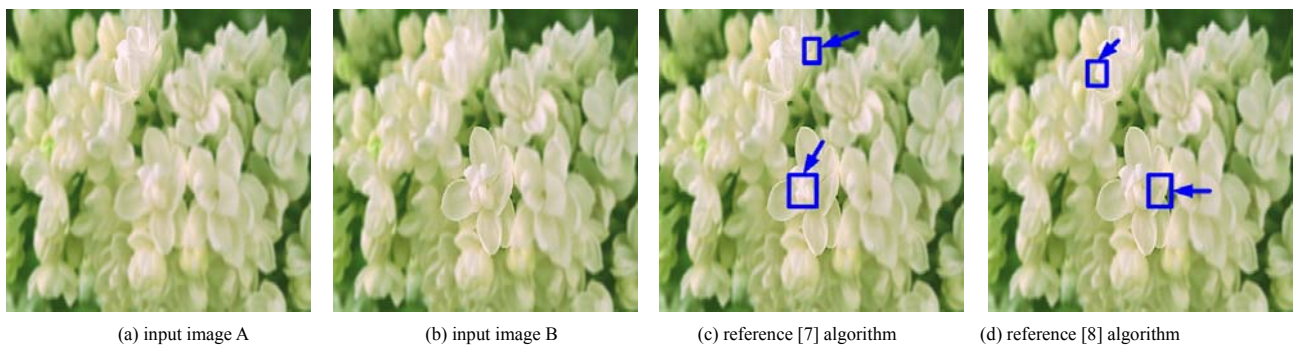


Fig.4 Fusion results of each algorithm for the first group of images  
图 4 各算法对第一组图像的融合结果



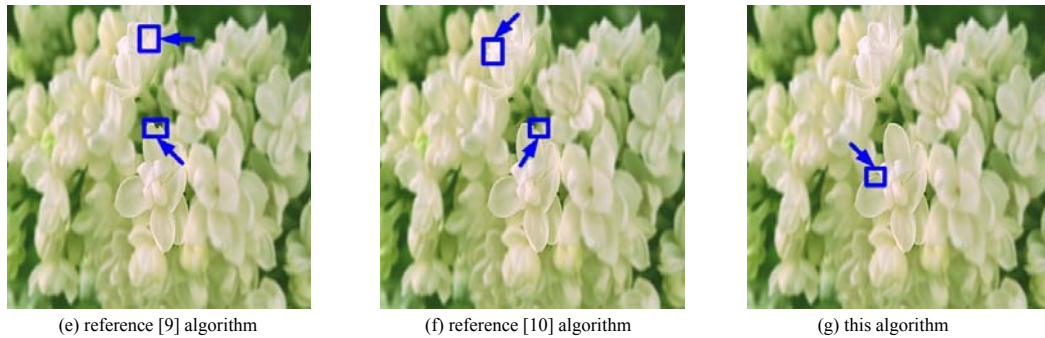


Fig.5 Fusion results of each algorithm for the second group of images  
图 5 各算法对第二组图像融合结果

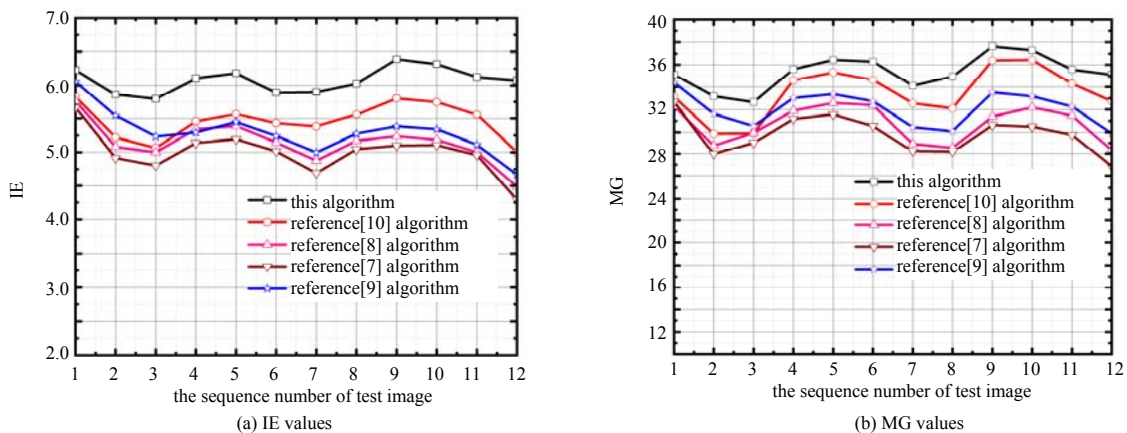


Fig.6 IE and MG values of the fusion image of several algorithms  
图 6 各种算法融合图像的 IE 和 MG 参数值

观察第 9 组各算法融合图像的 IE 和 MG 值可见, 本文算法的 IE 和 MG 值分别为 6.39 和 37.66, 文献[7]算法的 IE 和 MG 值分别为 5.10 和 30.63, 文献[8]算法的 IE 和 MG 值分别为 5.23 和 31.36, 文献[9]算法的 IE 和 MG 值分别为 5.38 和 33.51, 文献[10]算法的 IE 和 MG 值分别为 5.81 和 36.39。由此可见, 本文算法融合图像具有较高的 IE 和 MG 值, 说明本文算法具有较好的融合性能。因为本文算法在图像的能量及亮度特征的基础上, 完成了低频系数的融合。同时还采用 Sobel 算子获取图像的边缘特征, 并以此为依据, 完成了高频系数的融合, 使融合图像具有较好的质量, 提高了算法的融合性能。文献[7]算法在空间频率信息和拉普拉斯特征的基础上, 构建输入图像的三态图, 通过测量梯度的方法计算聚焦度, 并以聚焦度为依据计算融合图像的权重值, 获取融合结果。由于空间频率和拉普拉斯的聚焦测度方法没有较好地测量图像的细节信息, 而且根据聚焦度计算权重值的过程没有考虑图像的边缘特征, 导致该方法的融合效果较差。文献[8]算法采用 SGC 获取图像系数, 并通过加权法和图像系数取大法获取融合系数, 完成图像融合。由于该方法在加权过程和系数取大过程中, 忽略了图像间边缘特征相关性的测算, 使该方法的融合特性有所下降。文献[9]算法通过双树复小波变换获取图像的不同系数, 采用稀疏表示以及高频系数取大的方法, 分别获取融合的低频与高频系数, 进而完成图像融合。由于小波变换的图像分解方法, 被方向选择的多样性所限制, 易丢失图像信息, 且高频系数取大的方法没有考虑图像间的边缘相关性, 不利于保护融合图像的边缘特征, 使该算法融合性能不佳。文献[10]算法引入多尺度特征提取模块, 从多焦点图像对中提取共同特征, 计算图像间的结构相似性, 并使用该结构相似性度量结果作为训练损失函数, 对卷积神经网络进行训练, 用以融合图像。这种采用深度学习的方法对训练损失函数的依赖性较强, 且该算法中的训练损失函数仅从图像的结构相似性出发, 对卷积神经网络进行训练, 易丢失图像的亮度以及边缘等特征, 从而降低了该算法的融合性能。

## 2.2 图像融合视觉效果测试与分析

利用对照组和本文算法对火烈鸟摆件图像的融合效果如图 7 所示。对比图 7 中各算法的融合效果可知, 图 7(c)中左边火烈鸟胸脯底部存在振铃现象, 右边火烈鸟尾部和头部都存在间断现象。图 7(d)中左边火烈鸟背部存在块现象, 左腿下部存在间断现象, 右边火烈鸟脖子处存在块现象。图 7(e)中左边火烈鸟腿部具有块现象, 右边

火烈鸟脖子处具有间断现象。图 7(f)中左边火烈鸟的喙部具有不连续现象,而且其背部羽毛处较为偏暗,右边火烈鸟喙部具有块现象。图 7(g)中左边火烈鸟腿部和喙部都不具有间断以及块现象,但其眼部具有轻微振铃现象,右边火烈鸟脖子处和喙部的连续性都较好,且融合图像的亮度也较为正常。说明本文算法的融合性能较强,融合图像不具有块现象和间断现象。因为本文算法采用了稀疏表达能力较强的二代曲波变换分解输入图像,使得分解所得不同图像系数能够包含更多输入图像的原始信息。同时本文算法还通过图像的能量和亮度特征,构造了双特征低频系数融合函数,使得所获取融合低频系数能较好呈现图像概貌信息的同时兼顾图像的色彩信息,从而使得本文算法融合图像的质量较好。

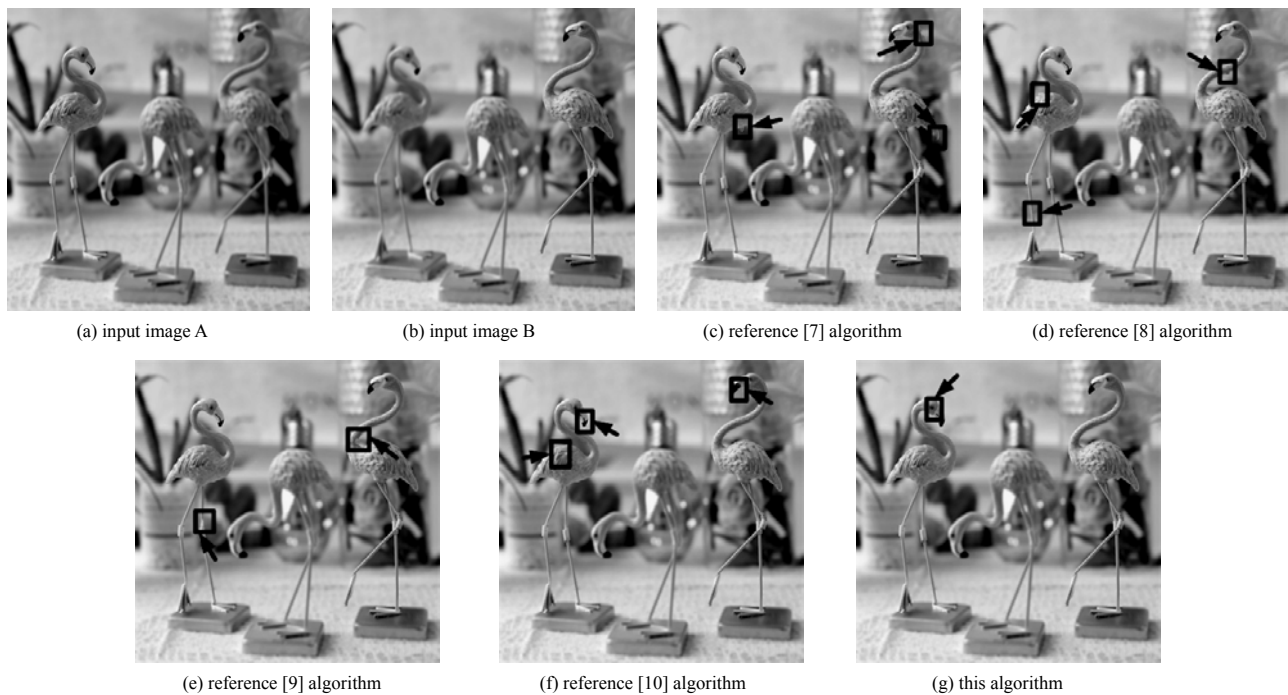


Fig.7 Fusion results of the image of flamingo ornament by each algorithm  
图 7 各算法对火烈鸟摆件图像融合结果

### 3 结论

本文利用稀疏表达能力较强的二代曲波变换分解输入图像,获取不同图像系数。以图像的能量和亮度特征为依据,构造双特征低频系数融合函数,获取融合低频系数,以提高融合图像的信息丰富度及色彩特征。在 Sobel 算子计算出的图像边缘特征的基础上,融合高频系数,进而获取融合图像。对本文算法进行融合图像视觉效果测试以及量化测试,实验结果显示,本文算法融合的图像具有较高的 IE 和 MG 值,视觉效果较为优秀,具有较为理想的融合性能。

#### 参考文献:

- [1] 王合龙,边栓成. 一种增强细节的红外图像处理算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):139-142. (WANG Helong, BIAN Shuancheng. An infrared image processing algorithm for enhancing details[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):139-142.)
- [2] 张家民,时东锋,黄见. 图像融合在偏振关联成像中的应用[J]. 红外与激光工程, 2018,47(12):373-379. (ZHANG Jiamin, SHI Dongfeng, HUANG Jian. Application of image fusion in polarization correlated imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018,47(12):373-379.) DOI:10.3780/IRLA201847.1226002.
- [3] 张炜. THT 机制耦合高斯模糊的图像融合方案[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017,39(12):143-151. (ZHANG Wei. An image fusion algorithm based on THT mechanism coupled with Gaussian fuzzy logic[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2017,39(12):143-151.) DOI:10.13718/j.cnki.xdzk.2017.12.021.
- [4] JANG S L, JAYAKUMAR C J. Multimodal image fusion using an evolutionary based algorithm for brain tumor detection[J]. Biomedical Research, 2018,29(14):2932-2937.

- [5] 杜进楷,丁冬冬,龙海莲. 基于 NSST 和稀疏表示相结合的图像融合算法[J]. 电脑知识与技术, 2019,15(15):217-221. (DU Jinkai,DING Dongdong, LONG Hailian. Image fusion algorithm based on NSST and sparse representation[J]. Computer Knowledge and Technology, 2019,15(15):217-221.) DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2019.1655.
- [6] NEJATI M,SAMAVI S,KARIMI N. Surface area-based focus criterion for multi-focus image fusion[J]. Information Fusion, 2017,36(1):284-295. DOI:10.1016/j.inffus.2016.12.009.
- [7] RAHMAN M A,LIU S,WONG C Y. Multi-focal image fusion using degree of focus and fuzzy logic[J]. Digital Signal Processing, 2017,60(1):1-19. DOI:10.1016/j.dsp.2016.08.004.
- [8] LI S,ZHANG W,YANG S. Intelligence fusion method research of multisource high-resolution remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2017,21(3):415-424. DOI:10.11834/jrs.20176386.
- [9] AISHWARYA N,BENNILA T C. Visible and infrared image fusion using DTCWT and adaptive combined clustered dictionary[J]. Infrared Physics & Technology, 2018,93(1):300-309. DOI:10.1016/j.infrared.2018.08.013.
- [10] MUSTAFA H T,YANG J,ZAREAPOOR M. Multi-scale convolutional neural network for multi-focus image fusion[J]. Image and Vision Computing, 2019,85(1):26-35. DOI:10.1016/j.imavis.2019.03.001.
- [11] 王培珍,翟羽佳,王慧. 基于曲波变换和压缩感知的煤岩惰质组分类[J]. 中国矿业大学学报, 2019,48(5):1119-1125. (WANG Peizhen, ZHAI Yujia,WANG Hui. Classification for inertinite of coal based on curvelet transform and compressed sensing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019,48(5):1119-1125.) DOI:10.13247/j.cnki.jcuml.001062.
- [12] YANG Hongyuan, LONG Yun, LIN Jun. A seismic interpolation and denoising method with curvelet transform matching filter[J]. Acta Geophysica, 2017,65(5):1029-1042. DOI:10.1007/s11600-017-0078-x.
- [13] WANG Hailin,ZHOU Yuxuan,WU Xiaoling. Reconstruction of compressively sampled MR images based on a local shrinkage thresholding algorithm with curvelet transform[J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 2019,57(10): 2145-2158. DOI:10.1007/s11517-019-02017-7.
- [14] LI Shengyang,ZHANG Wanfeng,YANG Song. Intelligence fusion method research of multisource high-resolution remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2017,21(3):415-424. DOI:10.11834/jrs.20176386.
- [15] YANG Hongmei,LIU Zhigang. Defective condition detection of rotary double ears of junction device of catenary system in electrified railway based on 2nd generation curvelet transform[J]. Journal of the China Railway Society, 2017,39(9):53-58. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2017.09.008.
- [16] AHMED R,RIAZ M M,GHAFOOR A. Attack resistant watermarking technique based on fast curvelet transform and robust principal component analysis[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018,77(8):9443-9453. DOI:10.1007/s11042-017-5128-5.
- [17] 朱文维,李俊峰. 基于非下采样剪切波变换和特征合成的医学图像融合算法[J]. 计算机系统应用, 2019,28(10):170-177. (ZHU Wenwei,LI Junfeng. Medical image fusion algorithm based on non-subsampled shearlet transform and feature synthesis[J]. Computer Systems & Applications, 2019,28(10):170-177.) DOI:10.15888/j.cnki.csa.007109.
- [18] AISHWARYA N,BENNILA T C. An image fusion framework using morphology and sparse representation[J]. Multimedia Tools & Applications, 2018,77(8):9719-9736. DOI:10.1007/s11042-017-5562-4.
- [19] SADIQ H A,ABD R R,BASHEERA M M. Image edge detection operators based on orthogonal polynomials[J]. International Journal of Image and Data Fusion, 2017,8(3):293-308.
- [20] HOSNY K M,HAMZA H M,LASHIN N A. Copy for duplication forgery detection in colour images using QPCETMs and sub-image approach[J]. IET Image Processing, 2019,13(9):1437-1446.
- [21] 黄建荣,印鉴. 峰值皮层模型耦合 Weber 局部描述符的图像融合算法[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019,41(4): 130-138. (HUANG Jianrong,YIN Jian. The image fusion algorithm based on peak cortical model coupled with WLD[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2019,41(4):130-138.) DOI:10.13718/j.cnki.xdzk.2019.04.019.
- [22] ZHU Jin,JIN Weiqi,LI Li. Multiscale infrared and visible image fusion using gradient domain guided image filtering[J]. 2018,89(1):8-19. DOI:10.1016/j.infrared.2017.12.003.