

多波段图像融合的直觉模糊化处理方法比较

赵竞超，蔺素珍，李大威，王丽芳，杨晓莉
(中北大学 大数据学院，山西 太原 030051)

摘要：为了在多波段图像融合中选用合适的直觉模糊化方法来处理不确定性问题，对5种常用的直觉模糊集方法在多波段图像融合中的应用进行了比较。首先将多波段图像进行直觉模糊化处理，对隶属度图像进行去模糊化得到直觉模糊图像；然后，将直觉模糊图像进行非下采样轮廓波变换(Nonsubsampled contourlet transform, NSCT)，对低频图像进行直觉模糊化处理，所得隶属度作为权重进行加权融合，高频使用取大规则进行融合；最后通过逆变换得到融合图像。对融合结果采用主观人眼视觉观察和客观评价指标体系进行分析比较，得到较好的直觉模糊集方法的优势性能。实验结果表明，与Sugeno、Yogita、Yager及Chaira四种直觉模糊化方法相比，Bala直觉模糊化方法可以有效提高融合结果的亮度和对比度，而且融合结果边缘清晰，纹理特征明显，具有更好的视觉融合效果和客观质量评价。

关键词：图像融合；直觉模糊集；多波段图像；方法比较；非下采样轮廓波变换

中图分类号：TP391 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-8891(2018)09-0881-06

A Comparative Study of Intuitionistic Fuzzy Sets in Multi-band Image Fusion

ZHAO Jingchao, LIN Suzhen, LI Dawei, WANG Lifang, YANG Xiaoli
(School of Data Science, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To determine the right intuitionistic fuzzy method in multiband image fusion, which can deal with the uncertainty problem, in this paper, five commonly used methods of intuitionistic fuzzy sets and their applications are compared. First, the multiband images were processed by the intuitionistic fuzzy sets, and the images of membership degree were blurred to obtain the intuitionistic fuzzy images. Then, the nonsubsampled contourlet transform (NSCT) was performed on intuitionistic fuzzy images, the low-frequency images were processed by the intuitionistic fuzzy sets and fused by the weighted average, where the weight is the membership degree, and the high-frequency images were fused by take-the-biggest-of-all. Finally, the fused image was constructed by the inverse NSCT. Both subjective and objective evaluations were compared to determine the best-performing intuitionistic fuzzy set method. The experimental results show that compared with Sugeno, Yogita, Yager, and Chaira methods, the Bala intuitionistic fuzzy method effectively improves the brightness and contrast of the fusion results. The fusion results have a clear edge and the texture feature is apparent, which offer a better visual effect and objective evaluation.

Key words: image fusion, intuitionistic fuzzy set, multi-band image, methods to compare, the nonsubsampled contourlet transform

0 引言

利用多波段图像融合技术可以在降低数据冗余的同时，通过综合利用不同谱段信息，达到对场景的

更全面更准确地认识，其前提是探测图像本身具有良好的像质和互补性^[1]。实际上，在复杂场景成像过程中，强噪声干扰、光照不均匀和设备固有缺陷等诸多非可预测因素在所难免，使得探测图像中往往存在边

收稿日期：2018-05-25；修订日期：2018-08-23。
作者简介：赵竞超（1994-），女，硕士研究生，主要研究方向为图像融合。
通信作者：蔺素珍（1966-），女，博士，教授，主要研究方向为图像处理、信息融合。E-mail: lsz@nuc.edu.cn。
基金项目：山西省应用基础研究项目（201701D121062）；中北大学第十四届研究生科技立项（20171443）。

缘模糊、目标过暗或过亮和纹理不清等，随之而来的是探测结果的模糊、不精确等不确定性^[2-3]。这时，利用传统的图像融合方法难以奏效，需要引入不确定性信息处理理论和方法。

研究表明在诸多不确定性信息理论中，直觉模糊集理论(Intuitionistic fuzzy set, IFS)在传统模糊集的基础上增加了非隶属度函数，同时考虑了“非此非彼”的中立情况，可以更加客观地描述事物模糊的本质，在处理模糊信息和不确定性方面具有更大的灵活性和实用性^[4]。现阶段，基于直觉模糊集理论处理图像中存在的 uncertainty 问题，已有一些探索性的报道，包括：文献[5]基于 Bala 方法将图像直觉模糊化，通过增强对比度和亮度来消除低微光夜视和噪声干扰带来的不确定性；利用 Chaira 直觉模糊集的隶属度图像增强了医学图像的边缘信息有利于恢复不可见的重要结构^[6]；将直觉模糊集理论和传统的图像融合方法相结合，消除医学图像中的模糊和不确定性^[7-9]。这些研究针对特定对象都取得了显著效果，但对于多波段图像融合而言存在以下问题：一是成像条件复杂，不像医学图像那样成像条件理想，便于直觉模糊化处理；二是多种直觉模糊集方法的优势性能不确定，尚未检索到哪种直觉模糊集更适用于多波段图像融合。

为此，本文以高精度智能探测系统常用的可见光图像、短波红外图像和长波红外图像为对象，首先使用不同的直觉模糊集方法对源图像进行直觉模糊化，然后采用同一融合规则对各波段的直觉模糊图像进行融合，通过对融合结果的主客观评价，揭示多波段图像融合中直觉模糊集方法的适用性，为多波段图像融合工程化提供参考。

1 直觉模糊化处理图像

1.1 直觉模糊集理论

Atanassov 定义的直觉模糊集为：

表 1 5 种直觉模糊集构建方法		Table 1 5 methods of constructing intuitionistic fuzzy sets	
IFS	Membership	Nonmembership	Intuitionistic fuzzy entropy
Sugeno	$\frac{(1+\lambda)\mu_F}{1+\lambda\mu_F}$	$\frac{1-\mu_S}{1+\lambda\mu_S}$	$\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \pi_S \times \exp(1-\pi_S)$
Yogita	$\frac{(1+\lambda)\mu_F}{1+\lambda\mu_F}$	$(1-\mu_{Y0}) \times \left(\exp\left(\frac{-\mu_{Y0}}{1.85}\right) \right)^{0.2}$	$\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \pi_{Y0} \times \exp(1-\pi_{Y0})$
Yager	$\frac{(1+\lambda)\mu_F}{1+\lambda\mu_F}$	$(1-\mu_{YA}^\lambda)^{1/\lambda}$	$\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \pi_{YA} \times \exp(1-\pi_{YA})$
Chaira	$\frac{(1+\lambda)\mu_F}{1+\lambda\mu_F}$	$(1-\mu_C)^{(\lambda+1)}$	$\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{2\mu_C\nu_C+\pi_C^2}{\mu_C^2+\nu_C^2+\pi_C^2}$
Bala ^[5]	$1-(1-\mu_F)$	$(1-\mu_F)^\lambda(\lambda+1)$	$\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{2\mu_B\nu_B+\pi_B^2}{\mu_B^2+\nu_B^2+\pi_B^2}$

定义 1 (直觉模糊集) 设 X 是一给定论域，则 X 上的一个直觉模糊集 A 为：

$$A = \{(x, \mu_A, \nu_A) | x \in X\}$$
 (1)

式中：隶属函数和非隶属函数分别满足 $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ 和 $\nu_A: X \rightarrow [0,1]$ ，且对于 A 上的所有 $x \in X$ ，满足 $0 \leq \mu_A + \nu_A \leq 1$ 。由于存在不确定性产生犹豫度 π_A ，满足 $0 \leq \pi_A \leq 1$ 和 $\mu_A + \nu_A + \pi_A = 1$ 。

1.2 直觉模糊化

首先对一幅大小为 $M \times N$ ，灰度级数为 L 的图像进行模糊化，构建模糊集 $I_F = \{I_{ij}, \mu_{ij}\}$ ，公式如下：

$$\mu_F = \frac{I_{ij} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$
 (2)

式中： I_{ij} 为图像的每个像素灰度值； μ_F 是 I_{ij} 属于模糊集 I_F 的程度； I_{\min} 和 I_{\max} 分别代表图像的最小和最大灰度值。

然后对模糊集 I_F 进行直觉模糊化处理。根据直觉模糊集理论，源图像从空间域提取转移到模糊域，有助于将隶属度函数扩展到灰度的总范围。将模糊域内的图像转移到直觉模糊域时，需要确定的隶属度函数、非隶属度函数和选取合适的理想参数来消除不确定性。本文选用的 5 种直觉模糊集中，使用相同隶属度函数的有 Sugeno IFS^[7]、Chaira IFS^[6]、Yager IFS^[10]、Yogita IFS^[11]，但是他们的非隶属度函数使用的是各自的直觉模糊互补函数，直觉模糊集中的参数随图像的选择改变，通过直觉模糊熵最大值法寻找其最优值。文献[12]提出了在直觉模糊集理论中不同熵测量的方法，直觉模糊熵可以测量直觉模糊集的不确定程度。表 1 为 5 种直觉模糊集的构建方法。表中： μ_F 为公式(2)所求的隶属度，根据隶属度函数和非隶属度函数可以求得各自的隶属度、非隶属度和犹豫度。 λ 是由直觉模糊熵所得参数。

1.3 去模糊化

图像进行直觉模糊化处理, 需要从模糊域变换回空间域, 常用方法是使用公式(2)的逆变换对隶属度图像进行去模糊化, 但这种方法容易丢失犹豫度图像中属于隶属度的部分。视犹豫度为“中立票”时, 其中可能有“支持”可能有“反对”, 但如果只给中立者简单的赋值 0.5, 而没有考虑其他支持或反对的影响, 显然是欠妥的。为了争取犹豫度中“支持”的一部分, 最大化还原隶属度, 本文首先使用公式(3)将直觉模糊集转换成模糊集, 然后再采用公式(2)的逆变换进行去模糊化:

$$\mu_{Fnew} = \mu_{IFS} + \pi_{IFS} \times \left(0.5 + \frac{\mu_{IFS}}{\pi_{IFS}}\right)$$

(3)

式中: μ_{Fnew} 是新的隶属度; μ_{IFS} 是各方法所得隶属度; π_{IFS} 是各方法所得犹豫度。

2 图像融合

2.1 本文方法

本文主要的融合方法比较总体思路如图 1 所示。所提的多波段图像融合直觉模糊化处理方法比较主要步骤如下:

- 1) 直觉模糊化处理阶段。将多波段源图像进行模糊化, 然后将所得图像进行直觉模糊化处理, 对隶属度图像进行去模糊化。
- 2) 融合阶段。对直觉模糊的多波段图像进行非下采样轮廓波变换。低频图像进行直觉模糊化, 采用公式(3)从直觉模糊集转换成模糊集, 根据所得隶属度进行权重系数计算, 从而对低频进行加权融合。高频图像使用取大规则进行融合。通过非下采样轮廓波逆变换得到融合图像。
- 3) 通过主客观评价对融合图像进行评价, 从而对直觉模糊集方法进行性能分析。

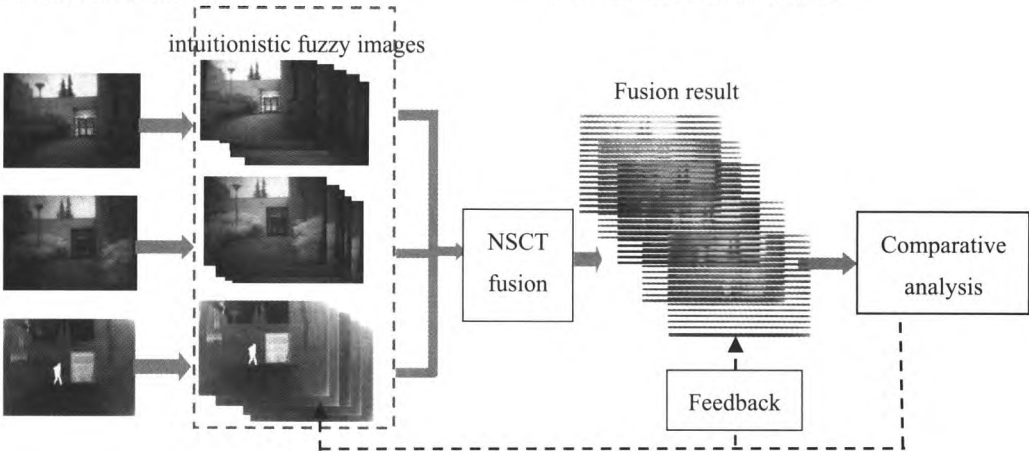


图 1 总体思路图

Fig.1 The basic ideas diagram

2.2 分解方法

非下采样轮廓波变换 (NSCT)^[13]是由非下采样金字塔和非下采样方向滤波器组成的。非下采样金字塔滤波器组将每个源图像分解为一组高低频子图像, 以实现多尺度分解, 而非下采样方向滤波器组分解高频子图像, 实现多方向分解^[14]。NSCT 对比轮廓波变换具有平移不变性。由于这些优点, NSCT 在红外和可见光图像融合中得到了广泛应用。因此本文选取 NSCT 对直觉模糊图像进行多尺度分解, 得到对应的高低频图像。

2.3 低频融合规则

由于低频图像具有图像的背景和纹理信息, 决定了融合图像的视觉效果^[15], 已证实加权平均可以充分融合低频信息^[16]。本文创新的使用直觉模糊集决定权重系数, 首先直觉模糊化处理低频图像, 并使用公式(3)转换成模糊集, 得到每幅低频图像的隶属度。然后计算权重系数, 可以利用直觉模糊化方法的优势较好地融合低频中有用的信息:

$$w_1 = \frac{\mu_{low1}}{\mu_{low1} + \mu_{low2} + \mu_{low3}}$$

(4)

$$w_2 = \frac{\mu_{low2}}{\mu_{low1} + \mu_{low2} + \mu_{low3}}$$

(5)

$$w_3 = \frac{\mu_{low3}}{\mu_{low1} + \mu_{low2} + \mu_{low3}}$$

(6)

式中: w_1, w_2, w_3 为低频融合的权重系数; $\mu_{low1}, \mu_{low2}, \mu_{low3}$ 为源图像的低频隶属度。

根据权重系数进行加权融合, 得到低频融合图像。

2.4 高频融合规则

高频图像通常包含粗尺度的结构信息和细节信息。所以本文选择取大规则有效地融合红外图像中的目标信息和可见光图像中的细节信息。

然后对融合后的低频和高频图像进行 NSCT 逆变换, 得到最终融合结果。

3 融合实验及结果评价

根据上述理论以及方法，实验数据为经过严格配准的多波段图像^[17]，这些图像来自 TNO 和文献[18]的建筑物场景、地面场景和水面波光场景。图 2 所示为具有

代表性的 3 组源图像及不同直觉模糊方法所得融合结果。本文采用主观分析和客观评价的方法对 5 种直觉模糊集方法的融合结果进行更加准确、可靠的分析评价。



图 2 3 组多波段图像及融合结果 Fig.2 Three sets of multi band images and fusion results

3.1 主观评价

通过比较可以清晰地看出，使用不同直觉模糊集方法得到的融合图像有明显的差异特性。Sugeno 方法和 Yogita 方法所得结果边缘纹理模糊，图像对比度低，不利于观察，如第二组中 Sugeno 融合结果可以清晰地观察到云的边缘纹理特征，但是建筑物和地面物体的纹理特征有所弱化；相对比前两种方法，Yager 方法边缘清晰锐利，细节信息增多，第二组 (f) 中树木边缘清晰可见，且建筑物的纹理特征明显，但仍存在整体亮度和对比度低的问题；Chaira 方法相对比 Yager 方法图像亮度有所提高，图像的边缘轮廓清晰度却有所降低；Bala 方法在图像的对比度、亮度、边缘保持度上都优于其他方法，目标清晰可见，更符合人眼视觉。

3.2 客观评价

由于直觉模糊化处理图像可以提高图像的亮度和对比度，所以本文选取均值 (MEAN) 来衡量图像的亮度，选取对比度 (Contrast, C)、标准差 (Standard Deviation, STD) 和空间频率 (Spatial Frequency, SF) 来衡量图像的对比度。图像融合是为了提供丰富的信息、提高清晰度而便于人眼观察，使用信息熵 (Information Entropy, IE)、互信息 (Mutual Information, MI) 反映融合结果信息量的多少；使用平均梯度 (Average Gradient, AG) 和清晰度 (qx) (Breener 方法^[19]) 反映融合图像清晰度；反映人眼视觉系统的指标包括边缘信息保留值 (Edge Information Preservation Values, EIPV)，视觉信息保真度 (Visual Information Fidelity for Fission, VIFF)。其中无参考

指标为 IE、C、qx、STD、SF 和 AG，其余均为有参考指标，假设源图像为参考图像分别计算各指标并取均值。评价指标越大，说明融合图像与源图像的相似度越高，融合效果越好。对 3 组多波段图像融合结果根据上述指标进行评价^[20]，将评价指标归一化，结果如图 3 所示。

从融合图像的各项客观评价指标来看，Yogita 方法的均值最大，表示亮度最高，但是其余指标均不理想。5 种方法均获得较高的信息熵，表示融合图像包含的信息越多，融合性能越好，其中 Bala 方法最高。但是在图像的对比度方面，其他 4 种方法均不理想，没有达到直觉模糊化处理增强图像对比度的效果。Bala 方法在信息量、清晰度和人眼视觉方面明显高于其他方法，说明融合图像中包含的纹理和信息更多，融合效果更好，有效提取了多波段图像中突出的细节信息，更方便于目标识别。

4 结论

直觉模糊集理论用于多波段探测图像融合中可以消除图像的不确定性，提高融合结果的质量。本文将直觉模糊集应用到多波段图像融合中，结合同一融合规则，对多种直觉模糊集方法得到的融合结果进行主观分析和客观评价。通过对比得到了较好的直觉模糊集的优势性能，Bala 直觉模糊集方法可以提取丰富的图像细节信息，保持完整的图像边缘轮廓和纹理信息，提高融合图像的信息量，融合结果有较好的对比度和清晰度，有较好的人眼视觉效果。

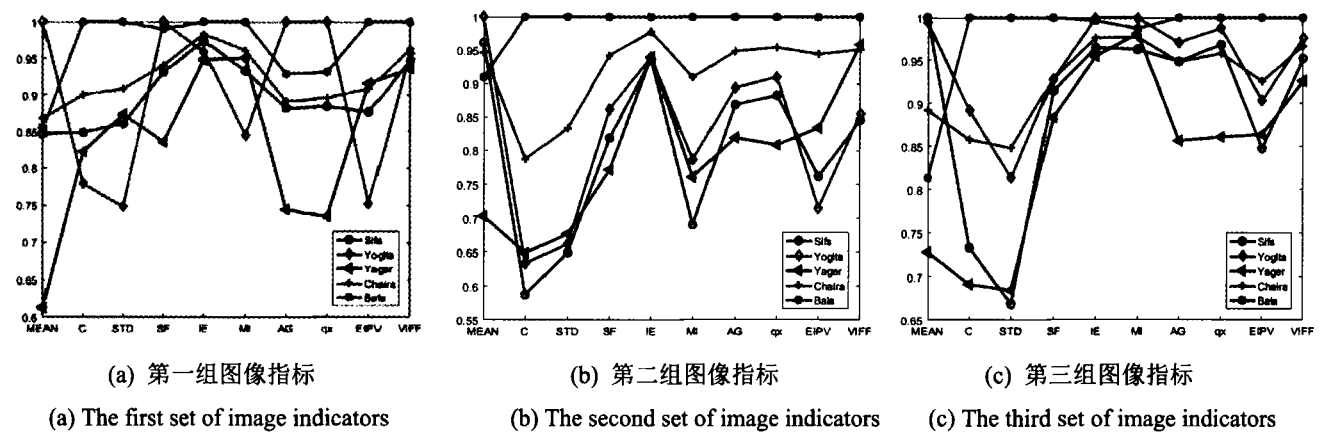


图 3 3 组图像融合结果评价指标折线图

Fig.3 Three sets of image fusion results evaluation index polygon map

参考文献:

[1] 藺素珍, 朱小红, 王栋娟, 等. 基于嵌入式多尺度变换的多波段图像融合[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(4): 952-959.

LIN Suzhen, ZHU Xiaohong, WANG Dongjuan, et al. Multi-Band Image Fusion Based on Embedded Multi-Scale Transform[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(4): 952-959.

[2] 蔺素珍, 韩泽. 基于深度堆叠卷积神经网络的图像融合[J]. 计算机学报, 2017, 40(11): 2506-2518.
LIN Suzhen, HAN Ze. Images Fusion Based on Deep Stack Convolutional Neural Network[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(11):1-13.

[3] 蔺素珍, 王栋娟, 王肖霞, 等. 基于嵌入式多尺度分解和可能性理论的多波段纹理图像融合 (英文) [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(7): 2337-2343.
LIN Suzhen, WANG Dongjuan, WANG Xiaoxia, et al. Multi-band texture image fusion based on the embedded multi-scale decomposition and possibility theory[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2016, 36(7): 2337-2343.

[4] 雷英杰. 直觉模糊集理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LEI Yingjie. *Intuitionistic fuzzy set theory and application*[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[5] Balasubramaniam P, Ananthi V P. Image fusion using intuitionistic fuzzy sets[J]. *Information Fusion*, 2014, 20(1):21-30.

[6] Chaira T. A rank ordered filter for medical image edge enhancement and detection using intuitionistic fuzzy set[J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2012, 12(4):1259-1266.

[7] Tirupal T, Mohan B C, Kumar S S. Multimodal medical image fusion based on Sugeno's intuitionistic fuzzy sets[J]. *Etri Journal*, 2017, 39(2): 173-180.

[8] Soundrapandiyan R, Karuppiiah M, Kumari S, et al. An efficient DWT and intuitionistic fuzzy based multimodality medical image fusion[J]. *International Journal of Imaging Systems & Technology*, 2017, 27(2): 118-132.

[9] DENG H, SUN X, LIU M, et al. Image enhancement based on intuitionistic fuzzy sets theory[J]. *Iet Image Processing*, 2016, 10(10):701-709.

[10] Yager R R. Some aspects of intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Optimization & Decision Making*, 2009, 8(1): 67-90.

[11] Dubey Y K, Mushrif M M, Mitra K. Segmentation of brain MR images using rough set based intuitionistic fuzzy clustering[J]. *Biocybernetics & Biomedical Engineering*, 2016, 36(2): 413-426.

[12] Vlachos I K, Sergiadis G D. The Role of Entropy in Intuitionistic Fuzzy Contrast Enhancement[C]// *International Fuzzy Systems Association World Congress on Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing*. Springer-Verlag, 2007: 104-113.

[13] 杨桃, 张筱晗, 张俭峰, 等. 基于区域特征的高光谱与全色图像 NSCT 域融合方法[J]. 红外技术, 2017, 39(6): 505-511.
YANG Guang, ZHANG Xiaohan, ZHANG Jianfeng, et al. A fusion method for hyperspectral imagery based on area feature detection using NSCT[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(6): 505-511.

[14] LI S, KANG X, FANG L, et al. Pixel-level image fusion: a survey of the state of the art[J]. *Information Fusion*, 2017, 33: 100-112.

[15] 陈清江, 张彦博, 柴昱洲, 等. 有限离散剪切波域的红外可见光图像融合[J]. 中国光学, 2016, 9(5): 523-531.
CHEN Qingjiang, ZHANG Yanbo, CHAI Yuzhou, et al. Fusion of infrared and visible images based on finite discrete shearlet domain[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(5): 523-531.

[16] MA J, MA Y, LI C. Infrared and visible image fusion methods and applications: A survey[J]. *Information Fusion*, 2018, 45: 153-178.

[17] Toet A. The TNO multiband image data collection[J]. *Data in Brief*, 2017, 15: 249-251.

[18] 韩泽, 蔺素珍, 赵竞超, 等. 基于直觉模糊集的多波段图像融合[J]. 红外技术, 2018, 40(3): 253-258.
HAN Ze, LIN Suzhen, ZHAO Jingchao, et al. Multiband image fusion based intuitionistic fuzzy set[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(3): 253-258.

[19] 李雪, 江旻珊. 光学显微成像系统图像清晰度评价函数的对比[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 28-38.
LI Xue, JIANG Minshan. A comparison of sharpness functions based on microscopes[J]. *Optical Instruments*, 2018, 40(1): 28-38.

[20] 韩泽, 蔺素珍. 基于主客观评价相关性的多波段融合图像评价方法[J]. 光电工程, 2017, 44(9): 895-902.
HAN Ze, LIN Suzhen. Multiband fusion image evaluation method based on correlation between subject and object evaluation[J]. *Opto Electronic Engineering*, 2017, 44 (9): 895-902.