

一种新颖的红外与可见光图像融合方法

李婵飞¹, 刘文晶²

(1. 汉口学院, 湖北 武汉 430212; 2. 重庆邮电大学 移通学院, 重庆 401520)

摘要: 为了提升红外和可见光图像融合效果, 提出了一种新颖的融合方法。对可见光图像利用支持向量机和腐蚀膨胀算法在图像分块的基础上进行分割获取含有重要场景信息的特征子图像和灰度场景子图像; 对红外图像进行热目标边缘提取并增强, 结合前述特征子图像和最大类间方差法获取边缘增强的目标子图像, 特征子图像和灰度场景子图像。利用小波包分别对两特征子图像, 两场景子图像进行融合。融合过程中, 根据子图像特点择取不同融合准则, 并对高频融合系数进行系数修正使其更为准确可靠。将红外热目标注入到前述融合结果中获取最终融合图像。实验结果表明, 提出算法从主、客观评价上都要优于对比算法。

关键词: 支持向量机; 腐蚀膨胀; 小波包; 图像融合; 边缘增强

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2020)04-0370-08

Novel Fusion Method for Infrared and Visible Light Images

LI Chanfei¹, LIU Wenjing²

(1. Hankou University, Wuhan 430212, China;

2. College of Mobile Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 401520, China)

Abstract: To improve the fusion effect of infrared and visible light images, a novel fusion method is proposed. The visible light image is segmented into feature subimages with important scene information and grayscale scene subimages using a support vector machine and corrosion expansion algorithm based on the image block. The hot target edge of the infrared image is extracted and enhanced. Target, feature, and gray background subimages are obtained by combining the information of the former feature subimage with the maximum interclass variance method. Two feature subimages (grayscale scene and gray background) are fused by wavelet packet transform. During fusion, different fusion rules are implemented according to the characteristics of the subimages. Additionally, high frequency fusion coefficients are modified to render them more accurate and reliable. The infrared thermal target is injected into the previous fusion result to obtain the final fusion image. Experimental results show that the proposed algorithm is superior to other algorithms both in subjective and objective evaluations.

Key words: support vector machine, corrosion expansion, wavelet packet transform, image fusion, edge enhancement

0 引言

多传感器图像融合是指对同一场景的多幅图像信息进行融合生成单幅图像的过程, 使得融合后的图像更加符合人类对视觉的感知。近些年来, 图像融合被广泛应用于生物识别、无损检测、军事监视、临床医学、遥感信息等领域^[1-7]。

红外和可见光图像融合是多传感器图像融合研究的重要组成部分。红外图像主要是利用红外传感器来记录不同物体的热辐射信息, 能较好地探测隐蔽的热目标, 受环境变化影响较小。可见光图像是用来记录物体光谱信息的反射特性, 主要包含的是图像的场景细节和边缘信息^[8]。将红外与可见光图像进行融合, 能够有效地将红外图像中的目标信息和可见光图像

收稿日期: 2019-04-17; 修订日期: 2019-05-20.

作者简介: 李婵飞 (1987-), 女, 湖北人, 讲师, 硕士, 研究方向: 图像处理。E-mail: lichanfei1987@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (61841111), 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目 (B2017311)。

中的目标场景、细节边缘信息相结合，增强对场景的理解，突出热目标。

根据应用场合的不同，红外与可见光图像融合可以分为3个层次：像素级，特征级和符号级^[9]。在红外与可见光图像融合过程中，基于像素级的多分辨率分析融合是一类应用广泛的融合方法。文献[10-11]将金字塔变换（Laplacian pyramid transform, LPT）应用于图像融合，但是LPT会产生大量的冗余信息，对图像的方向特性不能有效表达；文献[12]将小波变换（discrete wavelet transform, DWT）应用于图像融合，小波变换可以克服LPT的缺点，但是捕捉到图像方向信息有限（仅水平，垂直和对角方向），且会在图像局部区域产生振铃效应；文献[13]将平稳小波变换（stationary wavelet transform, SWT）应用于图像融合，SWT能克服DWT产生的振铃效应问题，但其分解策略和小波一样，仅对每层的低频成分重新分解，图像时频分辨率不高；文献[14]将轮廓波变换（contourlet transform, CT）应用于图像融合，但是由于缺乏平移不变性，导致Gibbs效应的产生；文献[15]将非下采样轮廓波变换（nonsampled contourlet transform, NSCT）应用于图像融合，NSCT能克服CT的缺陷，但是计算效率偏低，比较耗时。文献[16-17]将多分辨率分析工具和图像分割结合应用于图像融合，尽管该类算法融合图像可以较好地保持红外目标信息，但是对于红外图像的重要特征信息和可见光图像中特定的重要场景细节信息不能有效保持。因此，将红外图像的重要特征信息和可见光图像中特定的场景细节信息从源图像中提取出来引入图像融合过程是非常必要的。

鉴于上述考虑，提出了一种新颖的红外与可见光图像融合方法。利用支持向量机（support vector machine, SVM）^[18]和图像腐蚀膨胀算法在图像分块的基础上将可见光图像分割为场景细节特征丰富的区域特征子图像和灰度场景子图像，在Canny检测算子和最大内间方差方法基础上结合可见光特征子图像信息引入Laplacian图像锐化算法将红外图像分割为边缘增强的目标子图像，特征子图像和灰度场景子图像。然后分别将两特征子图像，两场景子图像利用小波包^[19]分解并择取不同的融合规则融合获得融合背景图像，将红外目标子图像融入到融合背景图像中获取最终融合图像。

1 小波包变换原理

多分辨率分析可以对信号进行有效的时频分解，但是其每层的分解都是在低频成分进行，因此它对高

频段的成分分辨率影响较低。小波包分解（wavelet packet）是在多分辨率分析基础上发展起来的一种精细的信号分析方法，它能够为信号提供一种更为精细的分解方法，不仅对信号进行多频带划分，而且对多分辨率分析没有分解的高频成分进行再分解，提高了信号的时频分辨率，是一种更有价值的信号分析工具。

小波包变换主要分为分解和重构两个步骤，其分解和重构公式分别如(1)、(2)所示：

$$\begin{cases} d_k^{j+1,2n} = \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{j,n} \\ d_k^{j+1,2n+1} = \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{j,n} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d_l^{j,n} &= \sum_k [h_{0(2l-k)} d_k^{j+1,2n} + h_{1(2l-k)} d_k^{j+1,2n+1}] \\ &= \sum_k [g_{0(2l-k)} d_k^{j+1,2n} + g_{1(2l-k)} d_k^{j+1,2n+1}] \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $h_{0(2l-k)}$ 和 $h_{1(2l-k)}$ 是多分辨率分析滤波器系数； $g_{0(2l-k)}$ 和 $g_{1(2l-k)}$ 分别为小波包重构过程中的低通和高通滤波器组。

2 新颖的红外与可见光图像融合方法

一种新颖的红外与可见光图像融合方法主要利用支持向量机和图像腐蚀膨胀算法在图像分块的基础上将可见光图像分割为具有重要特征场景的特征子图像和灰度场景子图像，在Canny检测算子和最大内间方差方法基础上结合Laplacian算子图像锐化算法和可见光特征子图像将红外图像分割为边缘增强的目标子图像，特征子图像和灰度场景子图像。然后分别将两特征子图像，两场景子图像利用小波包分解并择取不同的融合规则融合获得融合背景图像，将红外目标子图像融入到融合背景图像中获取最终融合图像。该算法流程图如图1所示。

2.1 可见光图像分割

在可见光图像中，有价值的除了场景边缘细节和光谱信息之外，还应包含一些特定的重要场景特征信息。在红外和可见光图像融合过程中，如果将可见光图像作为一个整体和红外图像融合难以有效表达其特定场景特征信息，因此有必要根据可见光图像特点和图像融合目的对其进行分割。

由图2(a)可见光源图像可知，烟囱和屋顶等特征信息应该是图像融合过程中感兴趣的重要场景特征信息，如果利用简单的像素级融合不能有效地保持其丰富的场景细节边缘特征。因此提出利用SVM和图像腐蚀膨胀算法在图像分块的基础上对可见光图像进行特征子图像的划分。首先利用图像分块获取含有

烟冲、屋顶的子图像块，再利用支持向量机将该子图像像素点进行分类以剔除烟囱、屋顶之外的场景信息，从而得到图像(b)。由图(b)可知，该子图像虽然包含烟囱、屋顶信息，还包含一些小零星场景点。

为了得到尽可能准确的烟囱、屋顶子特征图像，在(b)的基础上结合图像分块(c) ((c)为(b)图像分块之后的图像)和腐蚀膨胀算法可以得到比较准确的含有烟囱、屋顶的特征子图像(d)。

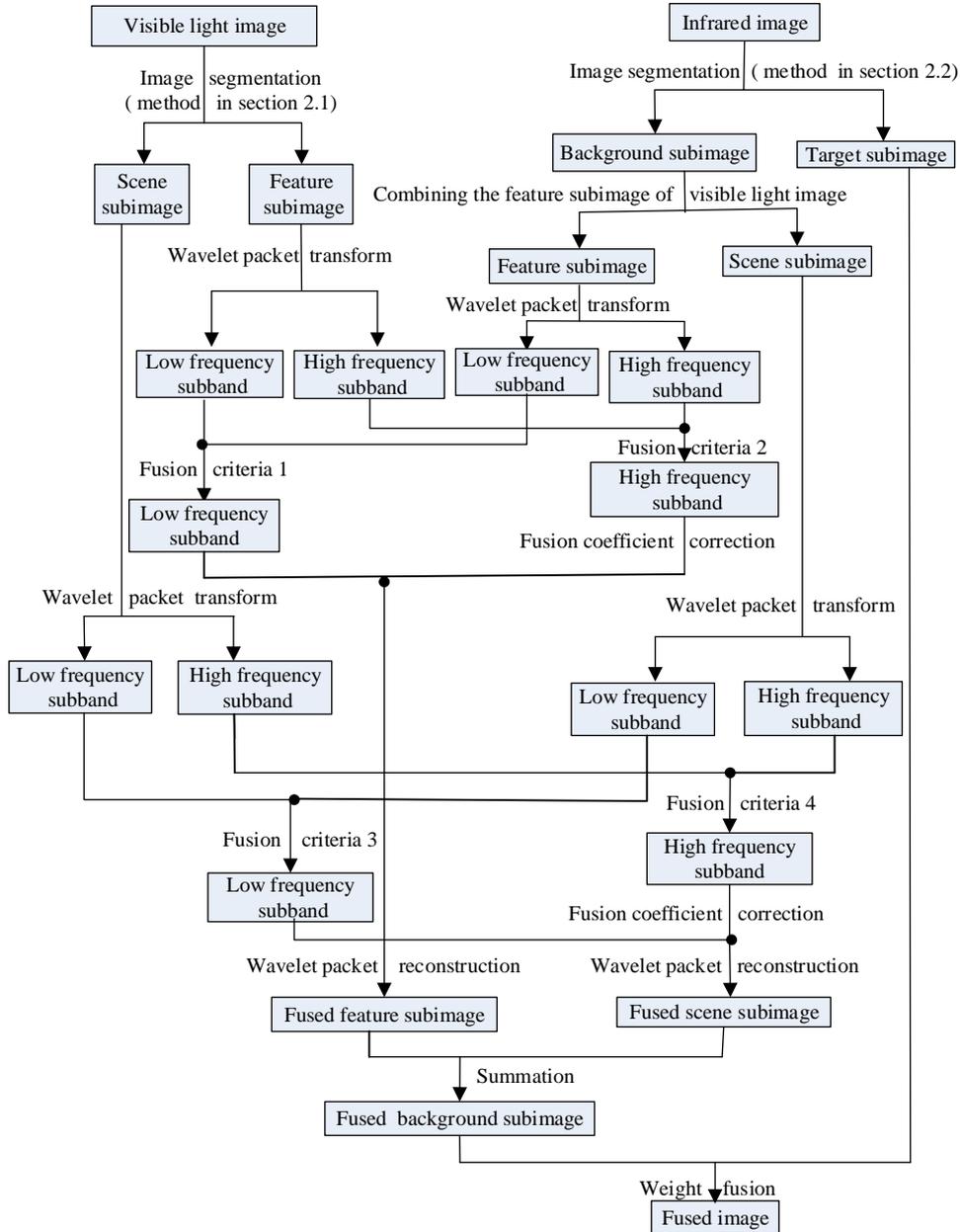
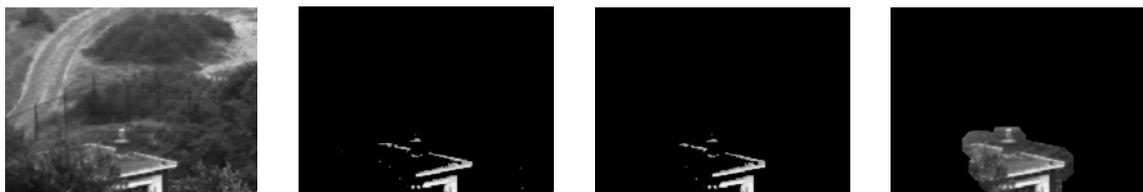


图1 图像融合算法流程图

Fig.1 Image fusion method flow



(a) 源可见光图像 (b) 支持向量机分类之后子图像 (c) 分块之后子图像 (d) 腐蚀膨胀之后特征子图像

(a) Original visible light image (b) Subimage of SVM classification (c) Subimage of blocking (d) Feature subimage of corrosion and expansion

图2 可见光源图像及其分割图像 Fig.2 Original visible light image and segmentation images

2.2 红外目标提取增强

隐藏的红外热目标是红外图像中最为重要的信息，为了在红外和可见光图像融合过程中较好地保持该热目标信息，文献[17]提出了一种 Canny 边缘检测和最大类间方差的目标分割算法。在此基础上，提出了一种红外目标提取增强法，首先利用 Canny 检测算子获取目标边缘轮廓，利用 Laplacian 图像锐化算子对该目标轮廓进行增强，并计算边缘内部区域均值 Mean；然后利用最大内间方差法获取源红外图像分割阈值 T^* ；如果 $Mean > T^*$ ，则对应区域为目标图像，否则为红外背景子图像；最后根据节 2.1 中的可见光特征子图像信息将红外背景子图像分割为红外特征子图像和灰度场景子图像。经过前述步骤得到增强的红外目标图像，特征子图像和灰度场景子图像。由图 3 可知，经过边缘增强的目标人物比原始目标图像更为清晰明亮，边缘轮廓更清晰突出。

2.3 低频融合准则

图像经小波包分解之后，低频部分主要包含的是源图像的概貌纹理近似信息，体现的是图像的大尺度特征，因此低频融合准则的好坏对图像融合质量起着重要作用。在图 1 中，根据特征子图像特点，融合准则 1 择取系数取大法，该融合准则计算简单且可以较好地保持可见光子图像中丰富的烟囱、屋顶等重要场景细节信息。对于场景子图像融合来说，它们都可以看作一般的背景区域，为了更好地保持红外图像的近似纹理轮廓信息和可见光图像丰富的光谱细节信息，其低频子带融合准则 3 择取能量梯度相结合的融合准则。假设 E 和 AV 分别表示区域能量和平均梯度，则其具体融合准则如公式(3)所示：

$$C(i, j) = \begin{cases} C_1(i, j) & E_1(i, j) \geq E_2(i, j) \\ C_1(i, j) & AV_1(i, j) \geq AV_2(i, j) \\ C_2(i, j) & AV_1(i, j) < AV_2(i, j) \end{cases} \quad (3)$$

2.4 高频融合准则

图像经过小波包分解之后，高频部分主要包含的是图像的边缘轮廓细节信息，体现的是图像的小尺度特征，且其数据量较大。为了更好地提取图像的细节信息，融合准则 2 和 4 均是模值择大法。但是为了使得融合系数的选取更为准确可靠，在进行模值择大法之后，对融合系数进行系数修正。具体修正方法：如果某像素点融合系数来源于红外图像系数，但其 3×3 邻域内像素点融合系数均来自于可见光图像系数，则该像素点融合系数取自于可见光图像融合系数更为合

理，因此有必要对其进行系数修正；反之，做相反的处理。经过系数修正的融合高频系数更为精确连贯。

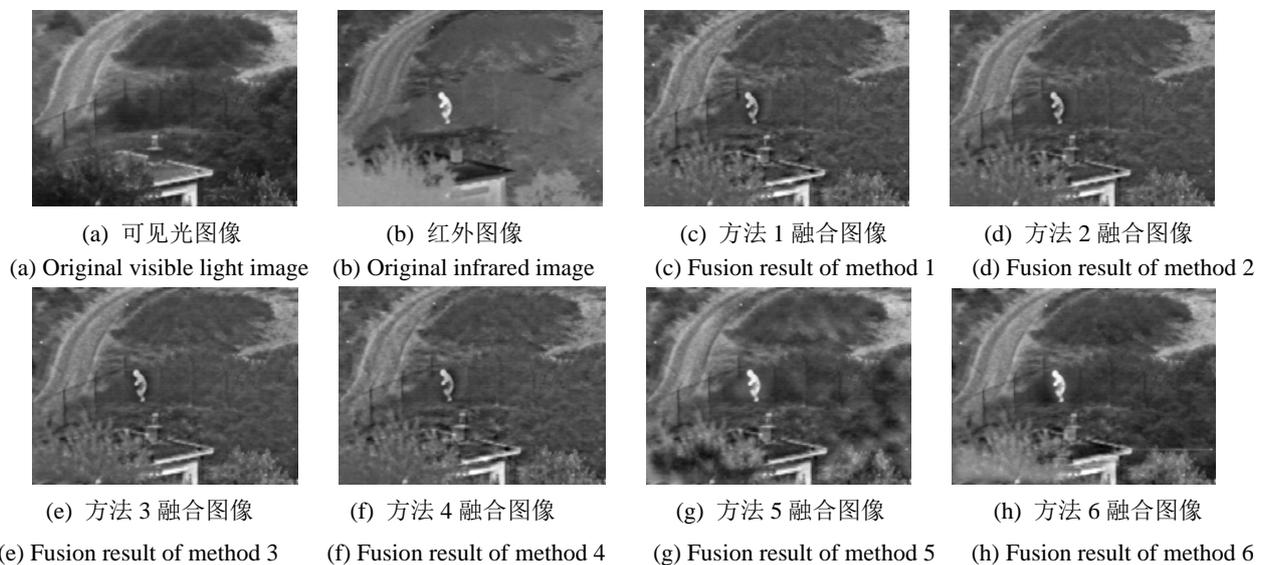
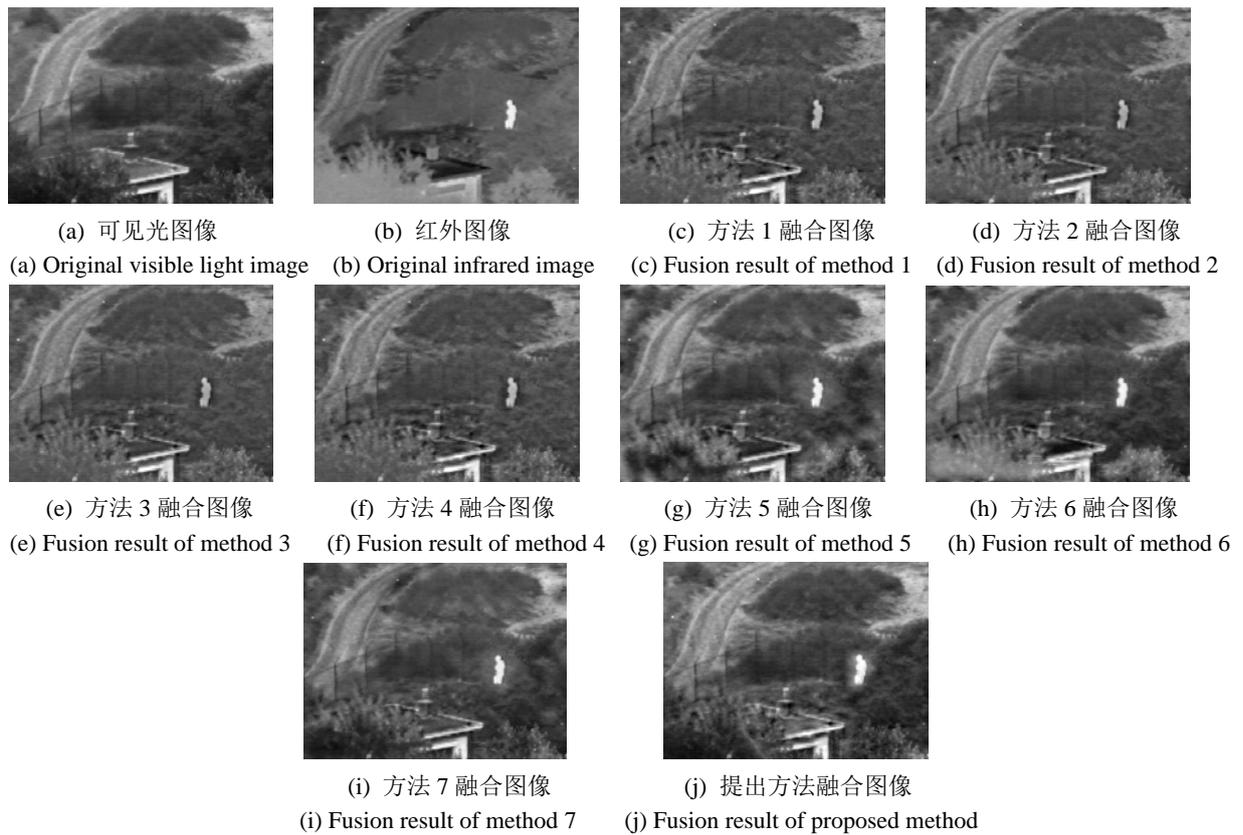
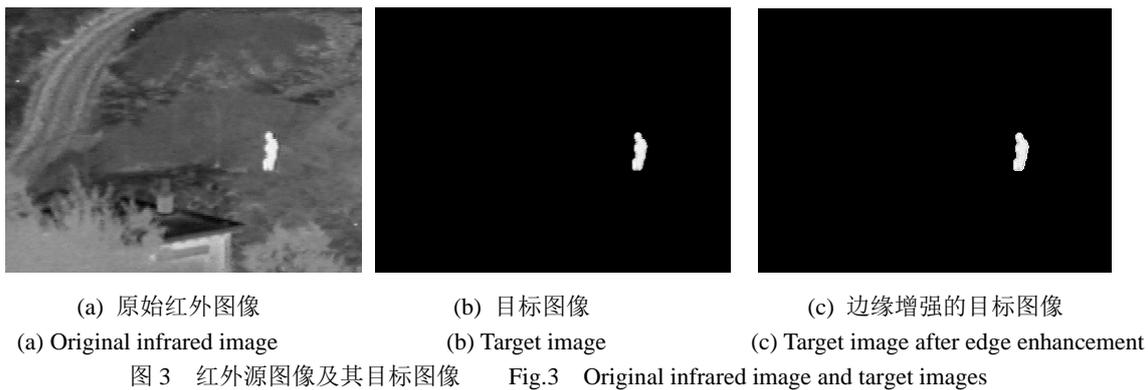
3 实验结果与性能评价

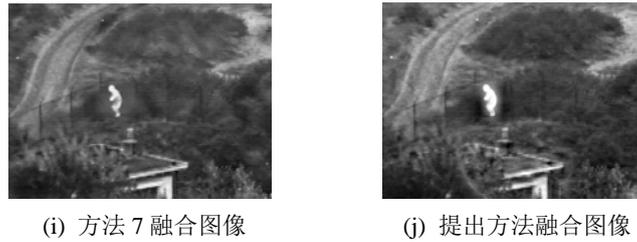
为了验证本文提出方法的有效性，选取荷兰 TNO Human Factors Research Institute 在不同时刻拍摄的“UN Camp”红外和可见光序列图利用 Matlab 软件进行实验验证。对比方法为：小波变换融合算法（方法 1），平稳小波变换融合算法（方法 2），非下采样轮廓波融合算法（方法 3），基本小波包变换融合算法（方法 4），文献[17]融合算法（方法 5），文献[16]融合方法（方法 6），文献[20]融合方法（方法 7），提出方法。其中方法 1~方法 5 的低频融合准则均是均值法，高频融合准则是模值取大法。除了方法 3 和方法 7 是自适应分解层之外，其他方法均采用相同小波基函数 bior4.4 进行 4 层分解。

文章主要通过主观和客观两方面对不同方法融合性能进行对比评价，主观直接通过人眼观察对比各方法融合图像的视觉效果，客观上采用标准差、信息熵、互信息、空间频率^[21-22]4 种指标进行评价，同时对不同方法的运行时间进行对比分析。各方法融合结果如图 4~图 7 所示，客观评价指标如表 1 和表 2 所示。

观察图 4、5、6、7 可知，方法 1~方法 4 能综合可见光和红外图像信息，对红外图像目标人物和可见光图像屋顶、烟囱等信息有一定程度体现，但其融合图像亮度不高；方法 5、6、7 所得融合图像整体效果相对于前述 4 种方法有较大程度提升，但是在融合图像中，可见光图像的屋顶、烟囱等重要特征信息存在一定程度的昏暗模糊现象。对比而言，本文方法的融合图像整体对比度更高，反差更大，红外图像热目标及其边缘更为清晰明亮突出，可见光图像的烟囱、屋顶等重要特征信息得到了最大程度的清晰体现，且较好地保持了可见光图像的背景光谱信息。因此，本文融合方法在主观评价上融合效果最好。

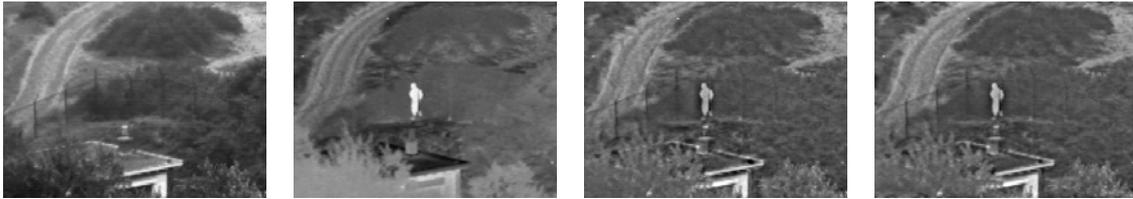
比较表 1、表 2 中不同客观评价指标可知，本文算法的标准差、信息熵、互信息、空间频率不仅是所有融合方法中的最大值，且相对于其他融合算法都有较大幅度提高。由此可知，本文方法融合图像有最高的对比度，包含更为丰富的图像信息且从源图像获取的信息最多，而且融合图像包含更为丰富的纹理细节特征，在空间域上最为活跃。另外，在运行时间方面本文方法的运行时间适中，满足实时性要求，从客观上评价上最为有效。



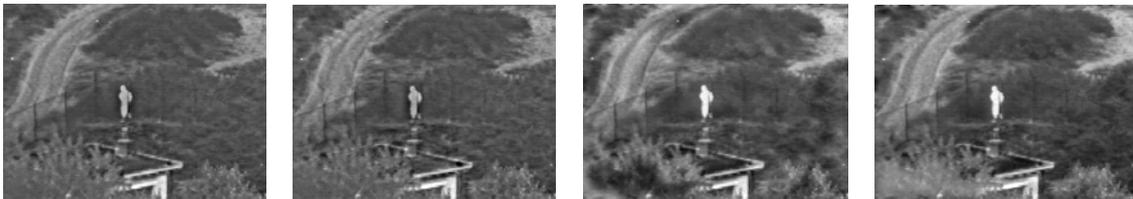


(i) Fusion result of method 7 (j) Fusion result of proposed method

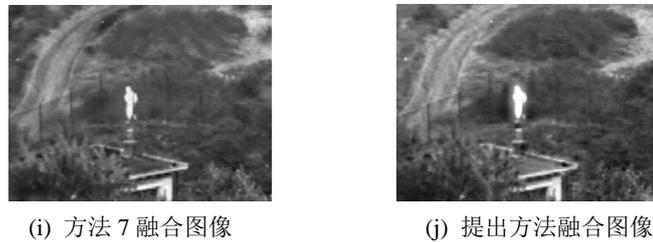
图5 源图像和不同方法融合图像 (1830) Fig.5 Original images and fusion result of different methods (1830)



(a) Original visible light image (b) Original infrared image (c) Fusion result of method 1 (d) Fusion result of method 2

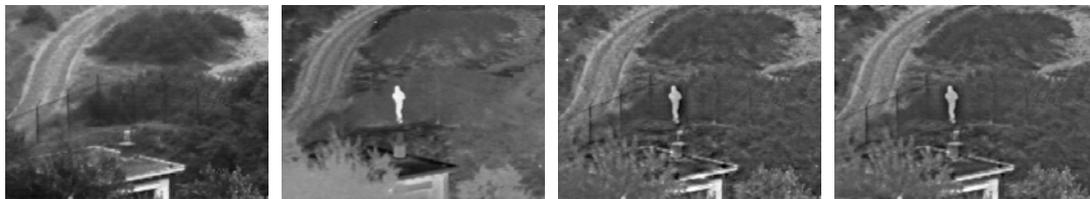


(e) Fusion result of method 3 (f) Fusion result of method 4 (g) Fusion result of method 5 (h) Fusion result of method 6



(i) Fusion result of method 7 (j) Fusion result of proposed method

图6 源图像和不同方法融合图像 (1819) Fig.6 Original images and fusion result of different methods (1819)



(a) Original visible light image (b) Original infrared image (c) Fusion result of method 1 (d) Fusion result of method 2



(e) Fusion result of method 3 (f) Fusion result of method 4 (g) Fusion result of method 5 (h) Fusion result of method 6



(i) 方法7融合图像
(i) Fusion result of method 7



(j) 提出方法融合图像
(j) Fusion result of proposed method

图7 源图像和不同方法融合图像(1824) Fig.7 Original images and fusion result of different methods (1824)

表1 不同方法融合结果客观评价指标 Table 1 Original images and evaluation result of different methods

Fusion method	Original images 1814					Original images 1830				
	Variance	Entropy	Mutual information	Spatial frequency	Time/s	Variance	Entropy	Mutual information	Spatial frequency	Time/s
Method 1	28.4961	6.6358	1.4016	13.6033	1.4184	27.4942	6.5822	1.3933	13.2265	1.4979
Method 2	28.1855	6.6027	1.4130	11.1875	3.0822	27.3354	6.5576	1.3966	11.0409	3.2400
Method 3	27.6539	6.5798	1.4658	12.8191	289.0161	26.8354	6.5336	1.4585	12.5106	286.0095
Method 4	28.5103	6.6394	1.3886	13.5414	4.8464	27.5086	6.5864	1.3715	13.1759	4.8647
Method 5	36.4245	7.0708	1.6144	11.4964	15.2090	34.9024	7.0183	1.5557	11.3629	14.7684
Method 6	38.7058	7.1275	1.9228	11.3512	4.45773	37.7087	7.0867	1.9728	11.2713	4.5622
Method 7	34.7133	6.9944	1.9216	12.4670	769.8757	33.7422	6.9721	1.9373	12.1627	762.7120
Proposed method	41.9278	7.2564	2.4999	13.5737	12.1641	40.6025	7.1905	2.4478	13.2752	12.8558

表2 不同方法融合结果客观评价指标 Table 2 Original images and evaluation result of different methods

Fusion method	Original images 1819					Original images 1824				
	Variance	Entropy	Mutual information	Spatial frequency	Time/s	Variance	Entropy	Mutual information	Spatial frequency	Time/s
Method 1	27.4579	6.5916	1.4040	13.3174	1.4494	28.3801	6.6339	1.4100	13.4800	1.4215
Method 2	27.4682	6.5795	1.4186	11.0705	3.1929	28.0915	6.6051	1.4120	11.1929	3.0029
Method 3	26.9848	6.5532	1.4740	12.6448	288.5730	27.5755	6.5807	1.4732	12.7180	286.2214
Method 4	27.4843	6.5916	1.3938	13.2938	5.0777	28.3802	6.6371	1.3912	13.4103	4.9163
Method 5	35.4093	6.9949	1.6272	11.3896	14.7301	35.8746	7.0289	1.5872	11.5071	13.921413
Method 6	36.8929	7.0666	1.9428	11.2554	4.5397	38.3376	7.1085	1.9329	11.2750	4.3534
Method 7	33.0098	6.8833	1.8384	12.3023	770.0615	33.9537	6.9448	1.8802	12.3775	765.4237
Proposed method	40.6409	7.1877	2.5030	13.3916	12.7770	41.4259	7.2179	2.4674	13.5591	12.9840

综合主、客观评价可知,本文方法是对比方法中性能最优的方法。

4 结论

为了提升红外与可见光图像融合效果,在融合图像中更好地突出红外热目标信息,更高效地体现可见光图像重要的场景特征细节信息并最大程度地保持可见光图像丰富的光谱信息,提出了一种新颖的图像融合算法。对于红外图像,不仅提取了红外热目标,且对该目标边缘利用 Laplacian 图像锐化算法进行边缘增强;

对于可见光图像,结合支持向量机和腐蚀膨胀算法在图像分块的基础上提取包含重要场景信息特征子图像。结合小波包变换对不同的红外、可见光子图像运用不同的融合规则融合,并对高频融合系数进行系数修正使其更为精确可靠。实验结果表明,本文的融合方法无论是从主观视觉效果还是客观评价指标上都要优于对比方法。

参考文献:

- [1] Phamila Y A V, Amutha R. Discrete cosine transform based fusion of multifocus images for visual sensor networks[J]. *Signal Process*, 2014, **95**: 161-170.

- [2] Gangapure V N, Banerjee S, Chowdhury A S. Steerable local frequency based multispectral multifocus image fusion[J]. *Inf. Fusion*, 2015, **23**: 99-115.
- [3] Stathaki T. *Image Fusion: Algorithms and Applications*[M]. New York: Academic Press, 2008.
- [4] KONG W W, LEI Y, ZHAO H X. Adaptive fusion method of visible light and infrared images based on non-subsampled shearlet transform and fast non-negative matrix factorization[J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2014, **67**: 161-172.
- [5] Fernando Mendozaa, LU Renfu, CEN Haiyan. Comparison and fusion of four nondestructive sensors for predicting apple fruit firmness and soluble solids content[J]. *Postharvest Biol. Technol.*, 2012, **73**: 89-98.
- [6] Eslami M, Mohammadzadeh A. Developing a spectral-based strategy for urban object detection from airborne hyperspectral TIR and visible data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, **9**(5): 1808-1816.
- [7] HAN Lei, Buzha Wulie, YANG Yiling, et al. Direct fusion of geostationary meteorological satellite visible and infrared images based on thermal physical properties[J]. *Sensors*, 2015, **15**(1): 703-714.
- [8] SCHMIDT R. Benefits of IR/visible fusion[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, **6541**: 654105-1-654105-6.
- [9] Gemma Piella. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions[J]. *Inform. Fusion*, 2003(4): 259-280.
- [10] ZHOU Z Q, LI S, WANG B. Multi-scale weighted gradient-based fusion for multi-focus images[J]. *Inf. Fusion*, 2014, **20**(1): 60-72.
- [11] YU X, REN J, CHEN Q. A false color image fusion method based on multi-resolution color transfer in normalization YCBCR space[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(20): 6010-6016.
- [12] LIU Y, LIU S, WANG Z. A general framework for image fusion based on multi-scale transform and sparse representation[J]. *Information Fusion*, 2015, **24**: 147-164.
- [13] 李婵飞, 邓奕. 平稳小波变换和模糊数学的红外与可见光图像融合[J]. *计算机与数字工程*, 2017, **45**(5): 39-42.
- LI Chanfei, DENG Yi. Infrared and visible light image fusion based on stationary wavelet transform and fuzzy mathematics[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2017, **45** (5): 39-42.
- [14] LI He, LIU Lei, HUANG Wei, et al. An improved fusion algorithm for infrared and visible images based on multi-scale transform[J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2016, **74**: 28-37.
- [15] LI Huafeng, QIU Hongmei, YU Zhengtao, et al. Infrared and visible image fusion scheme based on NSCT and low-level visual features[J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2016, **76**: 174-184.
- [16] HAN Liang, LI Chanfei, PU Xiujuan. Image fusion method for infrared and visible images utilizing entropy of the histogram and stationary wavelet transform[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, **9**(10): 3883-3892.
- [17] 韩亮, 李婵飞, 蒲秀娟. 图像分割与平稳小波变换法融合红外与可见光图像[J]. *重庆大学学报*, 2013, **36**(6): 112-118.
- HAN Liang, LI Chanfei, PU Xiujuan. Image fusion method for infrared and visible light images based on image segmentation and stationary wavelet transform[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, **36**(6): 112-118.
- [18] Vapnik V. An overview of statistical learning theory[J]. *IEEE Transaction on Neural Networks*, 1999, **10**(5): 988-999.
- [19] 崔景泰. *小波导论*[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- CUI Jingtai. *Introduction to Wavelet*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995.
- [20] 杨丹, 何建农. 基于 NSCT 变换的红外与可见光图像融合新算法[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 2017, **45**(5): 635-640.
- YANG Dan, HE Jiannong. New algorithm for infrared and visible light image fusion based on NSCT transformation[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2017, **45** (5): 635-640.
- [21] YAN X, QIN H, LI J, et al. Infrared and visible image fusion with spectral graph wavelet transform[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2015, **32**(9): 1643-52.
- [22] JIN X, JIANG Q, YAO S, et al. A survey of infrared and visual image fusion methods[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**: 478-501.