

doi:10.3788/gzxb20184706.0610002

基于非下采样轮廓波变换和直觉模糊集的 红外与可见光图像融合

蔡怀宇,卓励然,朱攀,黄战华,武晓宇

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院,光电信息技术教育部重点实验室,天津 300072)

摘 要:针对传统图像融合方法造成的边缘模糊、细节损失、图像对比度与清晰度容易降低等问题,利用非下采样轮廓波变换,提出一种基于直觉模糊集和区域对比度的红外与可见光图像融合算法.首先,使用非下采样轮廓波变换将源图像分解,分别得到源图像的高频和低频成分.其次,利用直觉模糊集灵活准确描述模糊概念的特性,构建双高斯隶属函数对低频成分进行融合;利用区域对比度详细描述图像纹理信息的特点,采用多区域特征对比度结合距离分析的融合规则,对高频成分进行融合.最后使用非下采样轮廓波逆变换得到融合图像.实验结果表明,与其它融合算法相比,该算法提高了图像对比度,保留了源图像中的边缘和细节信息,且得到的融合结果具有更优的客观评价价值.

关键词:图像融合;红外与可见光图像;非下采样轮廓波变换;直觉模糊集;区域对比度

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0610002-10

Fusion of Infrared and Visible Images Based on Non-subsampled Contourlet Transform and Intuitionistic Fuzzy Set

CAI Huai-yu, ZHUO Li-ran, ZHU Pan, HUANG Zhan-hua, WU Xiao-yu

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Considering the traditional image fusion methods easily reduce the contrast and sharpness of image, blur edge and loss details, a fusion method of infrared and visible images is proposed based on intuitionistic fuzzy set and regional contrast in the fusion framework of non-subsampled contourlet transform. Firstly, the high and low frequency components of source images are obtained by using non-subsampled contourlet transform. Then the low frequency components are combined by intuitionistic fuzzy set including double-Gaussian function due to the characteristic that intuitionistic fuzzy set can describe the fuzzy concept flexibly and accurately. The high frequency components are combined by regional features contrast and Euclidean distance method because of the feature that the method can describe the image texture information in detail. Finally the fusion image is obtained by performing inverse non-subsampled contourlet transform. The experimental results show that the proposed fusion method outperforms traditional methods which deepens the contrast of images, retains the edge and detail information in the source image, and has a better evaluation value.

Key words: Image fusion; Infrared and visible image; Non-subsampled contourlet transform; Intuitionistic fuzzy set; Regional contrast

OCIS Codes: 100.2000; 100.7410; 350.2660; 110.3080

0 引言

图像融合技术是利用图像之间的互补性和冗余性^[1],将其通过特定的融合规则进行融合,得到具有更优

基金项目:天津市科技计划项目(No.17ZXRGX00140)资助

第一作者:蔡怀宇(1965—),女,教授,博士,主要研究方向为信息光学、光电技术及仪器和图像处理等.Email:hycail@tju.edu.cn

通讯作者:卓励然(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为红外与可见光图像融合算法.Email:18200152528@163.com

收稿日期:2018-01-26;录用日期:2018-03-28

<http://www.photon.ac.cn>

视觉效果图像的一种图像处理技术^[2].其融合图像既可以突出目标信息,又可以保留周围环境的纹理细节.在无人机侦查中,航空图像的成像环境十分复杂,红外与可见光图像融合技术可以使监测的准确性和耐久性大幅提高,实现精确长时间的监控.在无人驾驶研发领域,黑夜、雨雪和雾霾等天气类型都会大幅降低可见光传感器的探测能力,而红外与可见光图像融合技术的应用可以实现无人驾驶汽车全天候的环境准确感知,提高无人驾驶技术的安全性.此外,红外与可见光图像融合技术在安防、医疗成像、电力检修等工作中都有广泛应用.

红外与可见光图像融合算法的效果主要受到融合框架和融合规则的影响.融合框架一般包括空间域和变换域融合两类^[3-6].早期采用空间域融合框架的算法主要包括主成分分析、梯度能量法、拉普拉斯能量和等.此类算法复杂度低,但是容易产生块状效应,丢失细节.基于变换域的融合算法一直处于快速发展之中,20世纪80年代中期,基于塔形分解的融合算法出现,主要包括拉普拉斯金字塔^[7],梯度金字塔等,但是塔形分解是一种冗余分解,并且不具有方向性.90年代后,基于小波变换的融合算法面世,离散小波变换^[8]、曲率波变换、双树复小波变换^[9]等融合框架被相继提出.小波变换解决了塔形分解的缺点,但离散小波变换等因为缺少平移不变性^[10],容易引起振铃现象.双树复小波变换弥补了平移不变性的问题,同时可得到6个方向的子带信息.为获得更强的尺度方向性,DO M和VETTERLI M提出了一种表示二维信号的轮廓波变换^[11],通过拉普拉斯金字塔和方向滤波器组将源图像进行多方向、多尺度的分解.但是轮廓波变换缺少平移不变性,容易导致伪Gibbs效应的产生.针对这个问题,CUNHA A L D等提出了非下采样轮廓波变换^[12-18](Non-Subsampled Contourlet Transform, NSCT),在轮廓波变换的基础上加入了平移不变性,使得NSCT可以更好地表征图像的边缘和纹理信息,有效表示图像中具有方向性的奇异性特征.

融合规则的选取,同样会对融合结果产生影响,通过分析图像特征选择适合的融合规则可以有效提高融合结果的质量.传统融合规则包括加权平均法^[15]、绝对值取大^[20]、区域能量和^[21]、区域梯度^[22]等.此类规则的分析较为片面,易丢失特征,并且传统基于邻域特征的融合规则,很少考虑邻域中距离因素产生的影响,导致计算值与实际存在一定的差异.模糊集^[23-25]善于表示无法定量表达的模糊概念,通过选择不同的隶属度函数,可以用数字语言来解释模糊概念,但是存在无法描述犹豫性概念的问题.直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Set, IFS)^[26]是模糊集的拓展,通过增加犹豫度的概念进一步扩展了模糊集对模糊概念的表述能力,具有灵活、包容性强等优点.图像的高频信息变化较大,这种变化量可以由区域能量、梯度和标准差较好地描述,图像中的距离信息可以用欧氏距离合理表达,进而可以构建距离影响因子辅助区域特征的分析,使得计算结果更接近真实值.

本文针对传统融合规则存在的问题,对融合规则的选取及使用进行改进.在NSCT融合框架下,选择直觉模糊集并构建双高斯隶属函数求取犹豫度作为低频成分的融合规则;使用区域对比度结合欧氏距离分析作为高频成分的融合规则,并对算法进行了实验验证.

1 NSCT

NSCT通过非下采样金字塔和非下采样方向滤波器组实现对图像多尺度、多方向的分解.这个过程包含两个步骤,首先通过非下采样金字塔对源图像进行多尺度分解,得到源图像的高频成分和低频成分,再通过非下采样方向滤波器组对高频成分进行多方向分解,得到高频成分各方向子带.NSCT总分解过程如图1.经过 N 次重复迭代,最终可以得到一个低频子带,第 l 层可以得到 2^l 个高频子带,总计可以得到 $1 + \sum_{l=1}^N 2^l$ 个子带图像.非下采样金字塔和非下采样方向滤波器组均去除了下采样和上采样的操作,减少了采样在滤波器中的失真,使得变换后得到的每个子图像与源图像大小相同,并且具有平移不变性的特点.

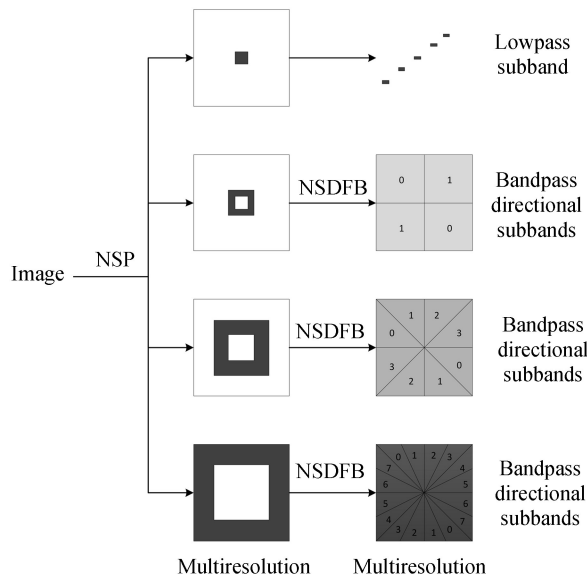


图1 NSCT 分解过程

Fig.1 Decomposing process of NSCT

2 基于 NSCT 的融合算法

2.1 融合步骤

本文融合算法步骤为:

- 1)通过 NSCT 将红外与可见光图像分别分解为对应的低频和高频子带.
- 2)采用直觉模糊集作为融合规则对低频子带进行融合;采用区域对比度结合欧氏距离分析作为融合规则对高频子带进行融合.

3)通过 NSCT 逆变换作用于低频和高频子带融合结果,得到最终的红外与可见光融合图像.

融合算法流程如图 2.

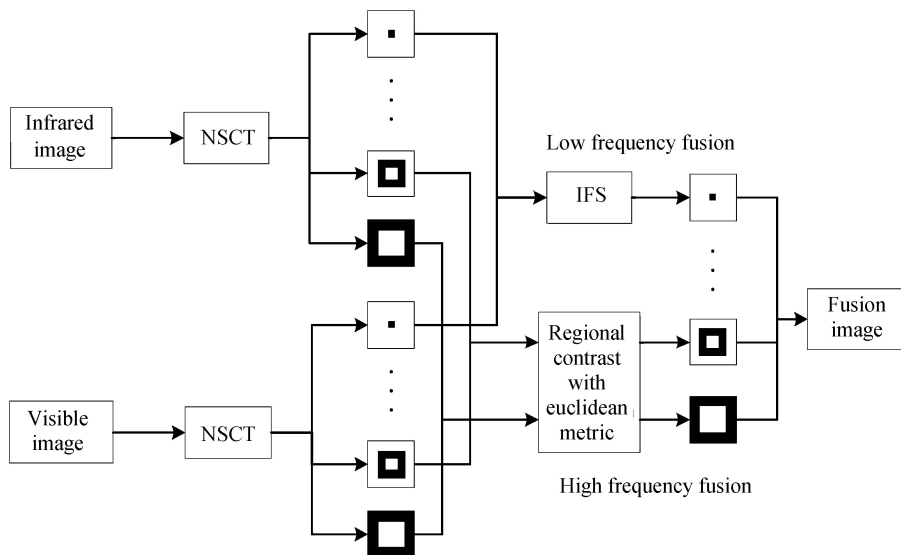


图2 融合算法流程

Fig.2 Flow of the proposed fusion algorithm

2.2 低频融合规则

在图像融合中,图像信息的传递过程是由多到一的一种映射^[27],这个过程存在着很强的不确定性关系,此外由于图像中往往存在着一些噪声,容易与图像自身的轮廓信息相混淆,导致图像的模糊性被放大.这种

不确定性存在于图像信息的多个方面,主要体现在图像灰度值的传递关系上.源图像经过 NSCT 分解后,轮廓、背景等主要能量信息被保留在低频子带中,映射的不确定关系同时也被保留下来,需要采用合理的低频融合规则对映射的不确定关系进行处理.直觉模糊集采用隶属函数 $u_A(x)$ 和非隶属函数 $\nu_A(x)$ 对模糊概念进行描述,从而引入了犹豫度的导出参数^[28-29],合理地描述了图像系统中可能存在的不确定性.源图像可能因为不确定因素使得融合图像的像素灰度值存在犹豫性,选择合适的隶属函数对图像的灰度分布规律进行描述可以有效提高图像的融合效率.高斯隶属函数可以较好地到低频子带中的信息进行描述^[30],对红外图像中感兴趣的目标区域以及不重要的背景区域赋予合理的保留权重,因此设红外图像 f_{IR} 的隶属函数为

$$u_{IR}(i, j) = \exp \left[\frac{-(f_{IR}(i, j) - \epsilon)}{2(k_1\sigma)^2} \right] \quad (1)$$

非隶属函数为

$$\nu_{IR}(i, j) = 1 - \exp \left[\frac{-(f_{IR}(i, j) - \epsilon)}{2(k_2\sigma)^2} \right] \quad (2)$$

犹豫度为

$$\pi(i, j) = 1 - u_{IR}(i, j) - \nu_{IR}(i, j) \quad (3)$$

式中, (i, j) 为像素坐标, ϵ 为低频子带系数平均值, σ 为低频子带系数标准差, k_1, k_2 为高斯函数调整参数,用由控制变量法得到的极值作为经验值,取值为 $k_1 = 0.8, k_2 = 1.2$.隶属度和非隶属度分别代表了对红外图像权重保留的肯定和否定意见,而对于犹豫度的分配则采用加权平均的方式,公式为

$$u(i, j) = u_{IR}(i, j) + \frac{u_{IR}(i, j)}{u_{IR}(i, j) + \nu_{IR}(i, j)} \pi(i, j) \quad (4)$$

同理可得到 $\nu(i, j)$. $u(i, j)$ 代表红外图像权重,即对红外图像部分保留意见的最终肯定, $\nu(i, j)$ 代表可见光图像权重,即对红外图像该部分保留的最终否定,根据红外图像与可见光图像融合过程中的互补关系,红外图像的否定部分由可见光图像进行填充,故最终融合公式为

$$I(i, j) = u(i, j)f_{IR}(i, j) + \nu(i, j)f_{VI}(i, j) \quad (5)$$

2.3 高频融合规则

经过 NSCT 分解后,图像的纹理、边缘等细节信息被存储在高频子带中,表现为相邻像素之间较大的强度变化,该区域应当考虑给予较大的权重进行保留.区域的能量、梯度和标准差均可以较好地反映这种信息的变化量,而单一的区域特征难以对高频信息进行充分地表述,为了能够完整地保留高频信息特征,选择三个基于邻域特征的区域对比度综合分析作为高频成分融合权重的判断依据.在数字图像中,中心像素与邻域内不同方向上各像素点距离代表含义不同,所以在分析邻域特征时,各邻域像素点对中心像素的影响是不同的,使用同样的计算公式对所有邻域像素点进行区域特征计算并不恰当,与实际的区域信息相比会有偏移.

欧氏距离可以直观地反映各像素点间的距离比例,通过采用欧氏距离辅助分析,对邻域像素点的计算过程赋予对应的距离影响因子,可以使计算值进一步逼近图像的真实情况,使区域对比度分析更为准确,一般情况下欧氏距离越大,对中心像素的影响越小,设距离影响因子 S 与欧氏距离的变换公式为

$$S(i+m, j+n) = \frac{b}{a(\sqrt{m^2+n^2})+c} \quad |m| \leq (M-1)/2, |n| \leq (N-1)/2 \quad (6)$$

式中, (i, j) 为中心像素坐标, m, n 为窗口内位移量, M, N 为窗口尺寸, b/a 代表变换比例系数, c 为常数,本文使用由控制变量法得到的极值作为经验值 $a = 1.25, b = 0.75, c = 0.7$.

区域能量对比度、区域梯度对比度以及区域标准差对比度的求取方式为:

1) 区域能量对比度

$$C_1(i, j) = \frac{E_{VI}(i, j)/E_{VI}}{E_{IR}(i, j)/E_{IR}} \quad (7)$$

其中

$$E(i, j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} S(i+m, j+n) f(i+m, j+n)^2 \quad (8)$$

$$E = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H E(i, j) \quad (9)$$

式中, W 、 H 为子带图像尺寸, $f(i+m, j+n)$ 为像素点灰度值, $E_{VI}(i, j)$ 和 $E_{IR}(i, j)$ 由式(8)计算得到, 代表区域内的能量值, E_{VI} 和 E_{IR} 由式(9)计算得到, 代表子带图像总能量值, 从而构成区域能量对比度 $C_1(i, j)$.

2) 区域梯度对比度

$$C_2(i, j) = \frac{G_{VI}(i, j)/G_{VI}}{G_{IR}(i, j)/G_{IR}} \quad (10)$$

其中

$$G(i, j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} S(i+m, j+n) \text{gra}(i+m, j+n) \quad (11)$$

$$G = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H G(i, j) \quad (12)$$

$$\text{gra}(i+m, j+n) = \sqrt{[f(i+m, j+n) - f(i+m+1, j+n)]^2 + [f(i+m, j+n) - f(i+m, j+n-1)]^2} \quad (13)$$

$G_{VI}(i, j)$ 和 $G_{IR}(i, j)$ 由式(11)计算得到, 代表区域内的梯度值, G_{VI} 和 G_{IR} 由式(12)计算得到, 代表子带图像总梯度值, 从而构成区域梯度对比度 $C_2(i, j)$.

3) 区域标准差对比度

$$C_3(i, j) = \frac{D_{VI}(i, j)/D_{VI}}{D_{IR}(i, j)/D_{IR}} \quad (14)$$

其中

$$D(i, j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} S(i+m, j+n) \text{dev}(i+m, j+n) \quad (15)$$

$$D = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H D(i, j) \quad (16)$$

$$\text{dev}(i+m, j+n) = \sqrt{\frac{\sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} [f(i+m, j+n) - \mu]^2}{M \times N}} \quad (17)$$

$D_{VI}(i, j)$ 和 $D_{IR}(i, j)$ 由式(15)计算得到, 代表区域内的标准差, D_{VI} 和 D_{IR} 由式(16)计算得到, 代表子带图像总标准差, μ 为区域内的均值, 从而构成区域标准差对比度 $C_3(i, j)$.

当可见光区域能量、梯度和标准差对比度分别强于红外区域时, $C_1(i, j)$ 、 $C_2(i, j)$ 、 $C_3(i, j)$ 分别大于 1, 此时应考虑保留可见光高频子带系数作为融合结果, 反之考虑保留红外高频子带系数作为融合结果. 具体选取规则为当三个对比度中有两个或两个以上的对比度大于 1 时, 选择可见光高频子带系数, 反之选择红外高频子带系数作为最终的高频融合子带系数.

3 实验与分析

3.1 实验设置

为了验证所提算法的有效性, 选择三组具有不同特征的红外与可见光图像进行对比实验, 对比算法为基于非下采样轮廓波变换和模糊逻辑的融合方法(NSCT_FS)^[30]、基于双树复小波变换的融合方法(DTCWT)^[31]、基于非下采样轮廓波变换的融合方法(NSCT)^[32]、基于离散小波变换的融合方法(DWT)^[33]、基于拉普拉斯能量和的融合方法(Laplacian)^[34]. 实验中的尺度分解层数均设定为 4 层, 使实验过程更具可信度. 为了使融合结果图像的评价更为准确, 从主观视觉效果和 5 项客观评价标准两方面进行验证. 5 项客观评价标准为平均梯度(Average Gradient, AG)、边缘强度(Edge Intensity, EI)、标准差(Standard Deviation, SD)、信息熵(Information Entropy, IE)、结构相似度(Structural Similarity Index, SSIM). AG、EI、SD 和 IE 结果值越高, 代表图像包含的轮廓信息越丰富, 细节、纹理和边缘等信息越完整清晰, 选择可见光图像与结果图像计算 SSIM 值, 其值代表两幅图像内容的相对变化程度.

3.2 实验结果及分析

如图 3, 第一组图像包含行人、树木、道路、栅栏和屋顶等特征. 6 种算法在各种程度上均将目标行人与树

木背景进行了融合,图 3(g)的背景颜色出现了加深,图 3(f)的结果图像出现了横向条纹,图 3(d)和图 3(e)的目标边缘颜色出现了偏差,图 3(c)和图 3(h)的效果较好,本文算法得到的图像结果在目标与背景的对比度上程度更高。

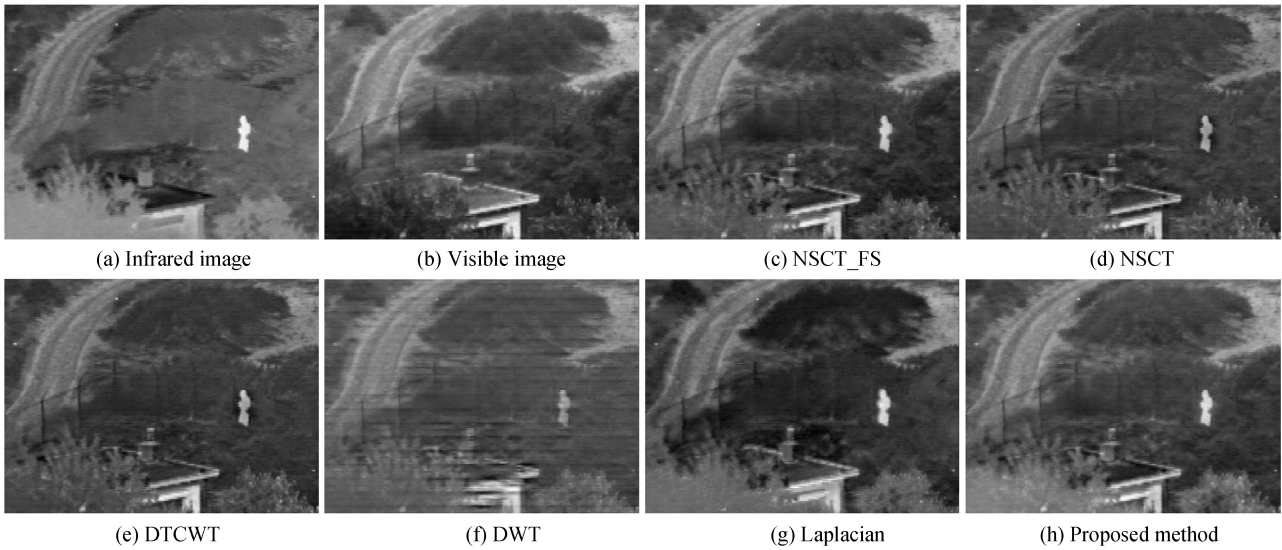


图 3 第一组红外与可见光图像融合对比实验

Fig.3 The first fusion experiment of infrared and visible image

如图 4,第二组图像包含车辆行人以及文字等特征.图 4(f)存在有明显的条纹干扰,图 4(d)和图 4(e)的动态目标颜色较暗,不够突出,图 4(h)比图 4(c)的文字更加清楚,指示灯的细节保留也更加完整,目标在图像中更加自然,有效提升了图像的融合质量。

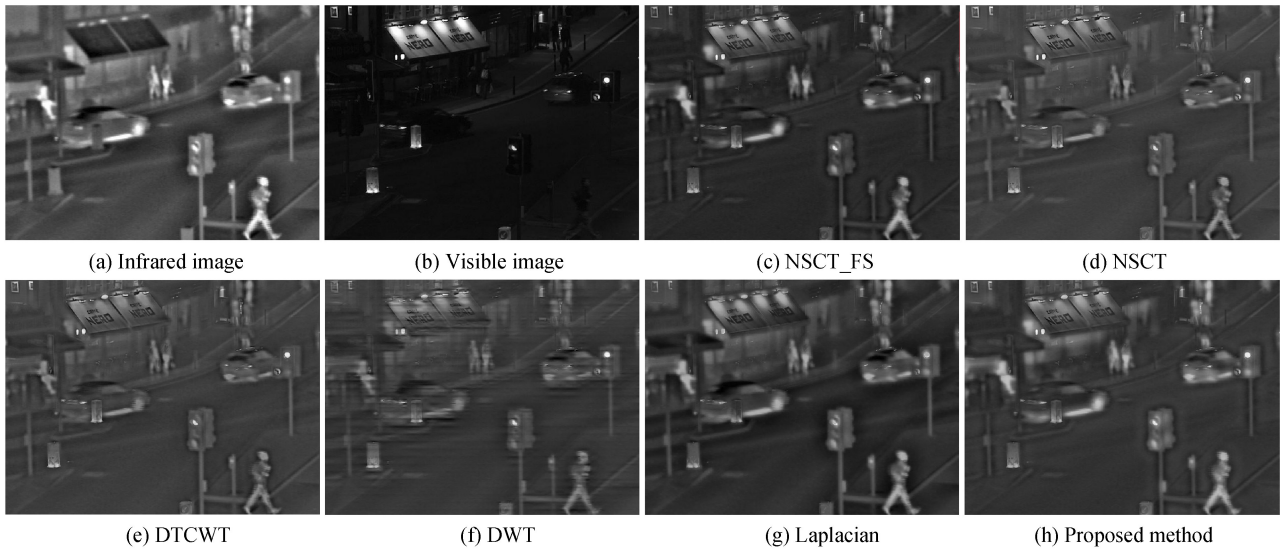


图 4 第二组红外与可见光图像融合对比实验

Fig.4 The second fusion experiment of infrared and visible image

如图 5,第三组图像包含海天云雾等背景轮廓以及轮船和乘客等目标特征.图 5(e)和图 5(f)基本上很难观察到轮船上的乘客细节,图 5(d)和图 5(g)的轮船区域产生了整体过暗和过亮的问题,降低了图像质量,本文算法得到的结果能够更加优秀地处理细小的目标信息,对目标区域的亮度变化也具有较好的调整能力,主观视觉上优于其他算法得到的融合结果。

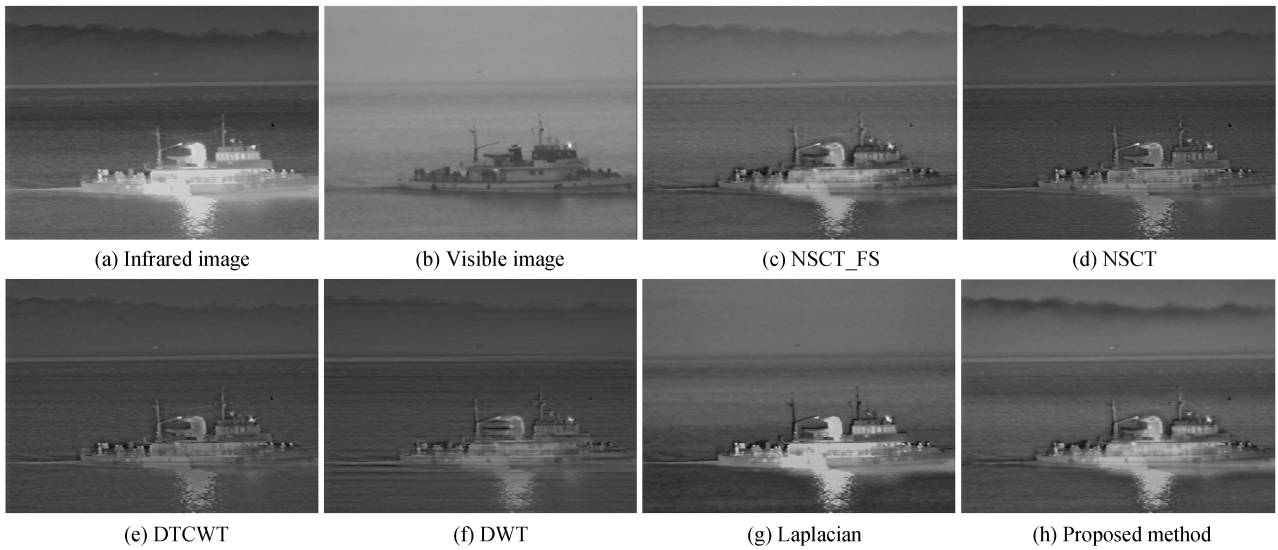


图5 第三组红外与可见光图像融合对比实验
Fig.5 The third fusion experiment of infrared and visible image

参考5项客观评价指标对各组融合结果图像进行验证,结果见表1~3.

表1 第一组对比实验结果客观评价指标

Table 1 Objective value comparison of the first fusion experimental results

Method	AG	EI	SD	IE	SSIM
NSCT_FS	4.527 7	47.628 4	36.501 8	7.047 2	0.688 9
DTCWT	4.167 2	43.629 1	26.282 4	6.484 5	0.664 3
NSCT	3.642 4	38.025 0	24.736 7	6.360 4	0.736 8
DWT	3.526 3	37.466 6	24.121 4	6.390 1	0.691 0
Laplacian	3.426 9	35.751 5	30.636 2	6.745 7	0.732 1
Proposed method	4.561 1	48.023 7	38.502 8	7.106 6	0.706 7

表2 第二组对比实验结果客观评价指标

Table 2 Objective value comparison of the second fusion experimental results

Method	AG	EI	SD	IE	SSIM
NSCT_FS	3.533 8	37.604 9	38.429 8	6.179 0	0.457 8
DTCWT	3.260 8	34.380 7	25.491 8	6.158 4	0.741 2
NSCT	3.053 2	32.149 4	25.054 1	6.119 7	0.751 5
DWT	2.499 2	26.813 1	21.821 6	6.004 7	0.706 1
Laplacian	2.921 2	31.433 1	36.630 4	6.779 2	0.917 6
Proposed method	3.670 3	39.188 2	42.363 7	6.384 1	0.505 1

表3 第三组对比实验结果客观评价指标

Table 3 Objective value comparison of the third fusion experimental results

Method	AG	EI	SD	IE	SSIM
NSCT_FS	1.934 0	20.106 2	18.141 1	5.971 1	0.788 0
DTCWT	1.957 7	20.125 0	12.318 7	5.137 6	0.896 7
NSCT	1.760 6	17.982 7	11.531 5	5.027 3	0.889 7
DWT	1.494 6	15.673 6	11.116 5	5.049 0	0.827 0
Laplacian	1.397 5	14.573 8	19.254 0	5.758 1	0.727 1
Proposed method	1.974 4	20.591 5	20.775 5	6.073 8	0.811 4

由表中各组融合图像结果的客观评价指标可以看出,DWT算法得到的图像边缘、细节等方面均比较模糊,适合在对目标形态清晰度要求低,需要保证一定运算速度的情况下进行使用.Laplacian能量和方法有利于得到较好的信息熵值,但是其融合图像的对比如较弱,且容易产生较为明显的亮度变化,当可见光图像背

景信息较少,变化较为缓慢且红外目标较为突出时,采用该方法会有较好的结果.NSCT和DTCWT算法得到的结果相对较好,可以在可见光图像背景较为复杂的情况下使用,能够一定程度上对目标和背景进行筛选保留,但是红外目标周围容易产生光晕和虚影,当红外图像中目标边缘信息较为丰富时,这两种方法产生的结果质量会下降.本文算法所使用的融合规则,更好地分析保留了融合过程中低频成分的能量信息,以及高频成分中图像的纹理、细节信息,并在融合图像中较好地体现出来,能够一定程度上消除目标周围的虚假轮廓,加深目标与背景的对比度,适用于可见光图像包含大量细节信息,红外图像目标信息丰富的情况,但是因为其融合规则对于边缘细节的针对性,导致对大面积的浅色区域,如天空、海洋等,处理能力不足,有待进一步改善.

4 结论

本文在NSCT变换域下,通过分析图像低频和高频成分不同的特点,分别采用直觉模糊集和区域对比度结合欧氏距离分析的方法对红外与可见光图像进行融合.与传统算法的融合结果相比,有效地提高了融合图像在对比度、纹理、轮廓等方面的效果,在考虑了图像不确定性映射的特点下,将可见光图像的背景和红外图像的目标信息进行了较为合理地抽取保留.通过5项客观评价指标验证,本文提出算法具有较好的可行性和有效性.值得改进的地方在于对大面积浅色区域的融合效果相对较差,根据算法特性,融合结果更倾向于保留对比度强和灰度值较大的图像内容,需要继续优化.

参考文献

- [1] WU Yi-quan, YIN Jun, CAO Zhao-qing. Fusion of infrared thermal wave image based on nonsubsampling shearlet transform and weighted non-negative matrix factorization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 108-116.
吴一全,殷俊,曹照清.基于非下采样Shearlet和WNMF的红外热波图像融合[J].光子学报,2014,**43**(10):108-116.
- [2] WU Dong-peng, BI Du-yan, HE Lin-yuan, et al. A fusion algorithm of infrared and visible image based on NSSCT[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(7): 98-106.
吴冬鹏,毕笃彦,何林远,等.基于NSSCT的红外与可见光图像融合[J].光学学报,2017,**37**(7):98-106.
- [3] BAI X. Morphological center operator based infrared and visible image fusion through correlation coefficient[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **76**: 546-554.
- [4] ZHU P, MA X, HUANG Z. Fusion of infrared-visible images using improved multi-scale top-hat transform and suitable fusion rules[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **81**: 282-295.
- [5] KONG W, LEI Y, REN M. Fusion method for infrared and visible images based on improved quantum theory model[J]. *Neurocomputing*, 2016, **212**(2): 1637-1640.
- [6] DING Wen-bin, BI Du-yan, HE Lin-yuan, et al. Fusion of infrared and visible images based on shearlet transform and neighborhood structure features[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(10): 1010002.
丁文彬,毕笃彦,何林远,等.基于剪切波变换和邻域结构特征的红外与可见光图像融合[J].光学学报,2017,**37**(10):1010002.
- [7] YU Mei-chen, SUN Yu-qiu, WANG Chao. Image fusion algorithm based on laplacian pyramid[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2016, **13**(34): 21-26+4.
余美晨,孙玉秋,王超.基于拉普拉斯金字塔的图像融合算法研究[J].长江大学学报(自科版),2016,**13**(34):21-26+4.
- [8] CHEN Zhen-yue, WANG Xia. Polarimetric and multi-spectral image fusion based on HIS color system and wavelet transform[C]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(s): 43-47.
陈振跃,王霞.基于HSI颜色空间和小波变换的多光谱图像和偏振图像融合实验研究[J].光子学报,2010,**39**(s):43-47.
- [9] ZHU Pan, LIU Ze-yang, HUANG Zhan-hua. Infrared polarization and intensity image fusion based on dual-tree complex wavelet transform and sparse representation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(12): 1210002.
朱攀,刘泽阳,黄战华.基于DTCWT和稀疏表示的红外偏振与光强图像融合[J].光子学报,2017,**46**(12):1210002.
- [10] LIU Wei, YIN Ming, LUAN Jing, et al. Image fusion algorithm based on shift-invariant shearlet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 496-503.
刘卫,殷明,栾静,等.基于平移不变剪切波变换域图像融合算法[J].光子学报,2013,**42**(4):496-503.
- [11] DO M, VETTERLI M. Contourlets; new directional multiresolution image representation[C]. Conference on Signals, Systems and Computers, ASILOMAR, 2002: 497-501.
- [12] CUNHA A L D, ZHOU J, DO M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089.
- [13] LIU Shao-peng, HAO Qun, SONG Yong, et al. Image fusion algorithm based on nonsubsampling contourlet transform and regional fractal dimension[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1388-1393.

- 刘少鹏,郝群,宋勇,等.基于区域分维和非采样 Contourlet 变换的图像融合算法[J].光子学报,2010,**39**(8):1388-1393.
- [14] YIN Ming, PANG Ji-yong, WEI Yuan-yuan, *et al.* Remote sensing image fusion based on non-subsampled dual-tree complex contourlet transform and sparse representation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0110002.
殷明,庞纪勇,魏远远,等.结合 NSDTCT 和稀疏表示的遥感图像融合[J].光子学报,2016,**45**(1):0110002.
- [15] LI H, QIU H, YU Z, *et al.* Infrared and visible image fusion scheme based on NSCT and low-level visual features[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **76**: 174-184.
- [16] ZHU P, HUANG Z, LEI H. Fusion of infrared and visible images based on BEMD and NSDFB[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **77**: 82-93.
- [17] CAI J, CHENG Q, PENG M, *et al.* Fusion of infrared and visible images based on nonsubsamped contourlet transform and sparse K-SVD dictionary learning[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **82**: 85-95.
- [18] ZHANG Q, MALDAGUE X. An adaptive fusion approach for infrared and visible images based on NSCT and compressed sensing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **74**: 11-20.
- [19] CHEN Mu-sheng, CAI Zhi-shan. Study on fusion of visual and infrared images based on NSCT [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*. 2015, **52**(6): 114-119.
陈木生,蔡植善.基于 NSCT 的红外与可见光图像融合方法研究[J].激光与光电子学进展,2015,**52**(6):114-119.
- [20] WANG Jun, PENG Jin-ye, HE Gui-qing, *et al.* Fusion method for visible and infrared images based on non-subsampled contourlet transform and sparse representation[J]. *Acta Armamentarii*. 2013, **34**(7): 815-820.
王珺,彭进业,何贵青,等.基于非下采样 Contourlet 变换和稀疏表示的红外与可见光图像融合方法[J].兵工学报,2013,**34**(7):815-820.
- [21] LIU Xian-hong, CHEN Zhi-bin. Fusion of infrared and visible images based on multi-scale directional guided filter and convolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(11): 103-112.
刘先红,陈志斌.基于多尺度方向引导滤波和卷积稀疏表示的红外与可见光图像融合[J].光学学报,2017,**37**(11): 103-112.
- [22] ZHU Pan, HUANG Zhan-hua. Fusion of infrared and visible images based on BEMD and GFL [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*. 2017(10): 1156-1162.
朱攀,黄战华.基于二维经验模态分解和高斯模糊逻辑的红外与可见光图像融合[J].光电子·激光,2017(10): 1156-1162.
- [23] PAN Yun, ZHAO Xi-ling. Fusion of gaussian fuzzy logic on NSST domain [J]. *Applied Laser*, 2016(3): 351-356.
潘贇,赵喜玲. NSST 域高斯模糊逻辑的图像融合[J].应用激光,2016(3):351-356.
- [24] GE Wen, JI Peng-chong, ZHAO Tian-chen, *et al.* Infrared and visible light images fusion of fuzzy logic on NSST domain [J]. *Laser Technology*, 2016, **40**(6): 892-896.
葛雯,姬鹏冲,赵天臣. NSST 域模糊逻辑的红外与可见光图像融合[J].激光技术,2016,**40**(6):892-896.
- [25] TAN Hai-pei, GONG Qing-ge, LIU Man, *et al.* Infrared image enhancement algorithm based on NSST and fuzzy membership [J]. *Laser Journal*, 2017, **38**(7): 88-93.
谭海佩,巩青歌,刘曼,等.基于 NSST 和模糊隶属度的红外图像增强算法[J].激光杂志,2017,**38**(7):88-93.
- [26] ANANTHI V P, BALASUBRAMANIAM P. Image fusion using interval-valued intuitionistic fuzzy sets [J]. *International Journal of Image & Data Fusion*, 2015, **6**(3): 249-269.
- [27] WU Zhen-hua. The digital image processing based on fuzzy theory [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010, 9: 2-3.
吴振华.基于模糊数学理论的数字图像处理[D].长沙:长沙理工大学,2010,9:2-3.
- [28] LI Deng-feng. Intuitionistic fuzzy set decision and countermeasure analysis [M]. National Defense Industry Press, 2012: 65-73.
李登峰.直觉模糊集决策与对策分析方法[M].国防工业出版社,2012: 65-73.
- [29] LEI Ying-jie. Intuitionistic fuzzy set theory and application [M]. Science Press, 2013: 1-18.
雷英杰.直觉模糊粗糙集理论及应用[M].科学出版社,2013:1-18.
- [30] ZHENG Yi-jun, REN Xian-yi, LIU Xiu-jian. A method of image fusion based on non-subsampled contourlet transform and fuzzy logic [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, **47**(11): 171-174.
郑义军,任仙怡,刘秀坚,等.基于 NSCT 与模糊逻辑的图像融合方法[J].计算机工程与应用,2011,**47**(11):171-174.
- [31] FENG Hong-chen. Image fusion of infrared and visible based the DTCWT [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 25-30.
冯宏臣.基于双树复小波域的红外和可见光图像融合[D].长春:长春理工大学,2013:25-30.
- [32] ZHANG Jing-lei, ZHAO E-ying. Fusion method for infrared and visible light images based on NSCT [J]. *Laser and Infrared*, 2013, **43**(3): 319-323.
张惊雷,赵俄英.基于 NSCT 的红外与可见光图像融合方法[J].激光与红外,2013,**43**(3):319-323.
- [33] YAN Jia-liang. Fusion of infrared and visible image based on wavelet transform [J]. *Electronic Technology*, 2017(16):

120-120.

颜家亮. 基于小波变换的红外与可见光图像的融合[J]. 电子技术与软件工程, 2017(16):120-120.

- [34] SUN Xiao-long, WANG Zheng-yong, FU Yao-qing, *et al.* Fast image fusion based on sum of modified laplacian[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, **51**(5): 193-197.

孙晓龙, 王正勇, 符耀庆, 等. 基于改进拉普拉斯能量和的快速图像融合[J]. 计算机工程与应用, 2015, **51**(5):193-197.

Foundation item: Tianjin Municipal Science and Technology Project (No. 17ZXGGX00140)

引用格式: CAI Huai-yu, ZHUO Li-ran, ZHU Pan, *et al.* Fusion of Infrared and Visible Images Based on Non-sampled Contourlet Transform and Intuitionistic Fuzzy Set[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0610002

蔡怀宇, 卓励然, 朱攀, 等. 基于非下采样轮廓波变换和直觉模糊集的红外与可见光图像融合[J]. 光子学报, 2018, **47**(6):0610002