

# 基于混合 $l_0l_1$ 层分解的红外光强与偏振图像融合算法

包达尔罕, 高文炜, 杨金颖

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 红外光强与偏振图像融合能够更全面地描述探测场景的特征, 有利于后续的处理工作。本文提出基于混合  $l_0l_1$  层分解的红外光强与偏振图像融合算法, 首先, 利用混合  $l_0l_1$  层分解对红外偏振与光强图像进行多尺度几何变换; 接着, 对于低频特征子带图像采用指数局部高斯分布相似度作为红外偏振低频图像融合权重, 并将其注入红外光强低频图像中; 然后, 对于高频子带图像利用局部空间频率和局部能量进行融合, 并用主成分分析将两类特征融合图像进行合成, 获得高频融合图像; 最后, 通过重构获得最终融合图像。通过实验对比, 本文算法融合结果能够较好地融合两类图像间的互补特征, 显著提升融合图像质量。

**关键词:** 混合  $l_0l_1$  层分解; 图像融合; 红外光强与偏振图像; 多尺度分解

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2020)07-0676-08

## Fusion Algorithm for Infrared Intensity and Polarization Images Using Hybrid $l_0l_1$ Layer Decomposition

BAO Daerhan, GAO Wenwei, YANG Jinying

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A combination of infrared intensity and polarization images can more fully describe the characteristics of a detected scene and facilitate subsequent processing. An algorithm for fusing infrared intensity and polarization images using hybrid  $l_0l_1$  layer decomposition is proposed. The algorithm consists of the following steps. First, multi-scale geometric transformations are applied to the infrared polarization and intensity images using hybrid  $l_0l_1$  layer decomposition. Then, in the low-frequency characteristic subband image, the index local Gaussian distribution similarity is adopted as the low-frequency image fusion weight of the infrared polarization image, and the fused infrared polarization image is injected into the low-frequency infrared intensity image. Next, the local spatial frequency and local energy are used to fuse the high-frequency subband image, and the two fused images are combined by principal component analysis to obtain a high-frequency fused image. The final fused image is obtained by reconstruction. An experimental comparison reveals that the algorithm can be used to fuse images of different types with complementary features, and the quality of the fused image is clearly improved.

**Key words:** hybrid  $l_0l_1$  layer decomposition, image fusion, infrared intensity and polarization image, multi-scale transformation

### 0 引言

红外光强图像利用景物的热辐射差异成像, 反应景物的辐射特征, 图像主要反应景物的亮度和轮廓特征<sup>[1-2]</sup>。红外偏振图像利用红外线的偏振特性成像, 主要反应景物的边缘、细节特征<sup>[3-4]</sup>。两类图像融合能够更全面地描述景物的特征, 更有利于后续图像处理,

在安全监测、雾霾天气目标探测、战场态势感知等领域有重要应用。

目前, 红外光强与偏振图像融合算法主要分为基于空间域和基于多尺度变换两类。空间域融合算法直接对源图像进行融合, 主要有加权平均、基于分块和主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 等<sup>[5-6]</sup>, 空间域融合算法操作简单、运算速度

收稿日期: 2019-12-18; 修订日期: 2020-07-02.

作者简介: 包达尔罕 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉。E-mail: deh2014@163.com.

快,但是容易损失图像的细节和对比度特征。多尺度变换能够将不同尺度下的特征有效地分离,对低频特征和高频特征采用不同的融合规则,基于多尺度变换的融合算法有利于图像细节特征的融合,减少图像信息损失,常见的多尺度变换融合算法有离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT),但是其不具备平移不变性和缺乏各向异性,针对这一问题,研究人员提出了其它多种不同多尺度变换,如非下采样轮廓波(Non-subsampled Contourlet Transform, NSCT)和非下采样剪切(Non-subsampled Shearlet Transform, NSST)<sup>[7-10]</sup>,能够具有平移不变性和分解的多方向性,能够更好提取图像的细节特征,但是运算速度较慢。区别于小波类多尺度变换,基于边缘保持滤波器多尺度变换在滤除图像的高频特征同时有效地保留图像的边缘特征,运算速度快,因此,基于边缘滤波的多尺度几何变换融合算法受到越来越多的关注,如基于双边滤波、基于引导滤波及基于最小二乘边缘保持滤波等的融合算法<sup>[11-12]</sup>,都取得了较好的融合效果。混合  $l_0l_1$  层分解是一种新的图像分解模式<sup>[13]</sup>,可以有效地将图像分解为基层和细节层,较好地保持图像的边缘特征,而且相对于基于边缘保持滤波的层分解,能够有效地克服光晕现象和过度增强。

综上所述,多尺度变换融合算法能够较好地分离图像的不同特征,有利于特征的融合,减少融合图像信息的损失,结合混合  $l_0l_1$  图像分解的优势,本文提出基于混合  $l_0l_1$  层分解的多尺度变换的红外光强与偏振图像融合算法,利用混合  $l_0l_1$  层分解的优势,对两类图像进行的混合  $l_0l_1$  层分解多尺度变换,提取图像的不同特征,对低频特征图像采用指数局部高斯分布相似度融合,对高频特征图像采用 PCA 合成多特征图像融合的方法进行融合,有效地融合两类图像间多种互补性特征。图1为本文融合算法流程图。

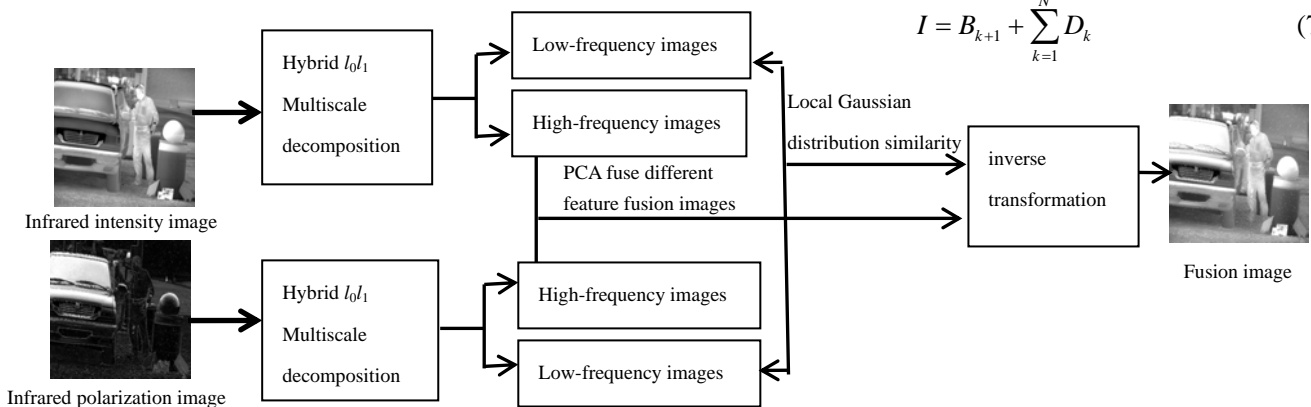


图1 融合算法流程图 Fig.1 Flow chart of fusion algorithm

### 1 基于混合 $l_0l_1$ 层分解的多尺度变换

混合  $l_0l_1$  层分解模型结合  $l_0$  和  $l_1$  两类范数的优势,能够将图像分解为基层和细节层,同时较好地保留图像的结构特征,其公式如下<sup>[13]</sup>:

$$\min_B = \sum_p^N \left\{ (S_p - B_p)^2 + \lambda_1 \sum_{i=\{x,y\}} |\partial_i B_p| + \lambda_2 \sum_{i=\{x,y\}} F(\partial_i (S_p - B_p)) \right\} \quad (1)$$

式中:  $p$  为像素坐标;  $N$  为图像像素个数, 第一项  $(S_p - B_p)^2$  是为了强制接近原图像, 基层的空间特性被定为  $l_1$  梯度稀疏项  $|\partial_i B_p|$ ,  $i=\{x,y\}$ ,  $\partial_i$  是沿  $x$  和  $y$  方向的偏导数运算。细节的空间特性被定为  $l_0$  梯度稀疏项的表示函数  $F(x)$ :

$$F(x) = \begin{cases} 1 & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases} \quad (2)$$

通过求解式(1)可以得到一幅图像的基层和细节层。其分解模式如下:

$$B_1 = \text{mod}_{l_0l_1}(S) \quad (3)$$

$$D_1 = S_1 - B_1 \quad (4)$$

式中:  $B_1$  为图像基层;  $D_1$  为图像的细节层。

图像的多尺度分解能够将不同尺度的特征分离,因此,结合多尺度分解和  $l_0l_1$  层分解模式,实现基于混合  $l_0l_1$  层分解的多尺度变换,有效地提取图像的细节特征并保留图像的结构特征,如下式:

$$B_{k+1} = \text{mod}_{l_0l_1}(B_k) \quad (5)$$

$$D_{k+1} = B_k - B_{k+1} \quad (6)$$

式中:  $B_{k+1}$  和  $D_{k+1}$  分别为图像低频子带图像和高频子带图像,  $k=0, 1, \dots, N$ ,  $k=0$  时  $B_0$  为原图像  $I$ , 重构公式为:

$$I = B_{k+1} + \sum_{k=1}^N D_k \quad (7)$$

## 2 融合规则

利用第1章多尺度变换方法对红外光强与偏振图像进行分解,获得低频和高频特征子带图像,对于不同特征图像采用不同的融合规则。

### 2.1 低频特征融合规则

对于红外光强图像来讲,图像整体较亮,灰度值变化成正态分布,而红外偏振图像(偏振度图像)反映的是图像的对比度特征,图像整体亮度较低,偏振特性强的部分在图像中较亮,图像灰度值成偏态分布,因此,本文采用局部高斯分布提取图像的结构特征,如下式:

$$\mu_m(i, j) = e^{-\frac{(u_m(i, j) - u)^2}{\sigma^2}} \quad (8)$$

$$u_m(i, j) = \frac{1}{3 \times 3} \sum_{x=-1}^1 \sum_{y=-1}^1 (B_m(i+x, j+y)) \quad (9)$$

式中:  $\mu_m(i, j)$  为高斯分布隶属度;  $u_m$  为基层图像的局部均值;  $B_m$  为低频图像;  $u$  为图像灰度均值;  $\sigma$  为图像标准差,  $m$  为 IR 时,  $B_{IR}$  为红外光强低频图像,  $m$  为 RP,  $B_{RP}$  为红外偏振低频图像。从式(8)中可以看到,对于红外图像来讲由于其整体变化比较平稳,因此,其隶属度值较大,而对于红外偏振图像来讲偏振态较强的部分与图像的均值差异较大,其隶属度值较小,如果直接采用分布值作为权重容易损失图像偏振信息,因此,本文首先计算两类图像的高斯分布相似度公式如下:

$$S(i, j) = \frac{2 * \mu_{IR}(i, j) * \mu_{RP}(i, j)}{\mu_{IR}(i, j)^2 + \mu_{RP}(i, j)^2} \quad (10)$$

从式(10)中可以看到,当相似度较高的时候,由于红外光强图像的灰度值应该远大于红外偏振图像,也就是说该处具有较强的红外辐射特性,应该保留红外光强图像特征,红外光强图像具有较大权重,同时红外光强图像体现场景的整体结构特征,决定着融合图像的视觉效果。因此,本文完整保留红外光强图像的基层,将红外偏振图像注入其中,当相似度较小的时候说明该处具有明显的偏振特性,红外偏振图像具有较大权重,本文采用指数高斯相似度确定权重,如式(11),表1为低频特征融合规则伪代码,最终低频特征融合图像如下:

$$w_{B_{RP}}(i, j) = e^{-S(i, j)} \quad (11)$$

$$F_1 = B_{IR} + w_{B_{RP}} * B_{RP} \quad (12)$$

式中:  $F_1$  为低频特征融合图像。

表1 低频特征融合规则伪代码

Table 1 The pseudo code of the low-frequency feature fusion rule

In put: $B_{IR}$ and $B_{IF}$ ; Out put : $F_1$
For $i \leftarrow 1$ to $m$
For $j \leftarrow 1$ to $n$
$u_{IR}(i, j) \leftarrow$ Local meam( $B_{IR}$ )
$u_{IF}(i, j) \leftarrow$ Local meam( $B_{IF}$ )
$\mu_{IR}(i, j) \leftarrow$ Gaussian membership function( $u_{IR}(i, j), u_{IR}$ )
$\mu_{IF}(i, j) \leftarrow$ Gaussian membership function( $u_{IF}(i, j), u_{IF}$ )
$S(i, j) = \frac{2 * \mu_{IR}(i, j) * \mu_{IF}(i, j)}{\mu_{IR}(i, j)^2 + \mu_{IF}(i, j)^2}$
$F_1(i, j) = B_{IR}(i, j) + B_{IF}(i, j) * e^{-S(i, j)}$
End
End

### 2.2 高频特征融合规则

高频子带图像主要包含图像的纹理、边缘及局部区域等特征,空间频率(Spatial Frequency, SF)能够较好的描述图像的细节特征,局部能量可以描述图像局部的绝对强度,局部区域越亮能量越高,因此,本文采用局部空间频率(Local Spatial Frequency, LSF)描述纹理和细小边缘特征,如式(13)采用局部能量(Local Energy, LEG)描述局部区域特征,如式(16):

$$LSF_m^k = \sqrt{(LRF_m^k)^2 + (LCF_m^k)^2} \quad (13)$$

式中: LRF 为局部行频率; LCF 为局部列频率,其公式如下:

$$LBF_m^k(i, j) = \sqrt{\frac{1}{3 \times 3} \sum_{x=-1}^1 \sum_{y=-1}^1 D_m^k(i+x, j+y) - D_m^k(i+x, j+y+1)} \quad (14)$$

$$LCF_m^k(i, j) = \sqrt{\frac{1}{3 \times 3} \sum_{x=-1}^1 \sum_{y=-1}^1 D_m^k(i+x, j+y) - D_m^k(i+x+1, j+y)} \quad (15)$$

式中:  $D_m^k$  为高频子带图像。

$$LEG_m^k(i, j) = \sqrt{\frac{1}{3 \times 3} \sum_{x=-1}^1 \sum_{y=-1}^1 (D_m^k(i+x, j+y))^2} \quad (16)$$

利用加权比例作为融合权重,如式:

$$H_1^k = (LSF_{IR}^k / (LSF_{IR}^k + LSF_{RP}^k)) * D_{IR}^k + (LSF_{RP}^k / (LSF_{IR}^k + LSF_{RP}^k)) * D_{RP}^k \quad (17)$$

$$H_2^k = (\text{LEG}_{\text{IR}}^k / (\text{LEG}_{\text{IR}}^k + \text{LEG}_{\text{RP}}^k)) * D_{\text{IR}}^k + (\text{LEG}_{\text{RP}}^k / (\text{LEG}_{\text{IR}}^k + \text{LEG}_{\text{RP}}^k)) * D_{\text{RP}}^k \quad (18)$$

式中:  $H_1^k$  为高频子带图像局部空间频率加权融合图像,  $H_2^k$  为高频子带图像局部能量加权融合图像。

通过式(17)和式(18)每层高频子带图像可以获得两个不同的特征融合图像, 为了将不同特征融合图像合成一副图像, 本文采用 PCA 对两类图像进行融合, PCA 能够有效地将两类图像的主要信息集合在一起, 最终高频子带图像融合结果如式(19), 表 2 为高频特征融合规则伪代码。

$$M = [H_1^k(\cdot) \quad H_2^k(\cdot)]$$

$$[E \quad \lambda] = \text{eig}(C)$$

$$H^k = (\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2)) * H_1^k + (\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)) * H_2^k \quad (19)$$

式中:  $M$  为不同特征融合图像组成的列向量构成的矢量矩阵,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为  $M$  的协方差矩阵  $C$  的最大特征值对应特征矢量的第一个矢量值和第二个矢量值。

### 3 实验结果与分析

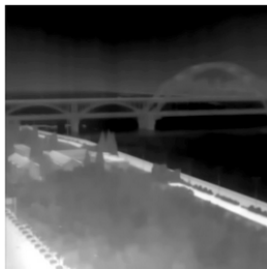
图 2 为红外光强与偏振图像, 其中(a1)与(b1)来源于文献[14], (a2)与(b2)来源于文献[15], (a3)与(b3)来源于文献[16], (a4)与(b4)来源于文献[17], (a5)与(b5)、

(a6)与(b6)为实际拍摄图像。本文采用 5 种融合算法与本文算法相对比, 分别为拉普拉斯变换 (Laplace Transform, LP)、稳态小波 (Steady Wavelet Transform, SWT)、非下采样剪切波与脉冲神经耦合网络 (Pulse Coupled Neural Network) 结合 (NSST-PCNN)、支持度变换 (Support Value Transform, SVT)<sup>[18]</sup> 和引导滤波 (Guide Filter, GFF)<sup>[19]</sup>。图 3 为融合结果。

表 2 高频特征融合规则伪代码

Table 2 The pseudo code of the high-frequency feature fusion rule

In put: $D_k^m$ ; Out put: $F_2$
For $i \leftarrow 1$ to $m$
For $j \leftarrow 1$ to $n$
$\text{LSF}_k^m(i, j) \leftarrow$ Local spatial frequency( $D_k^m$ )
$\text{LEG}_k^m \leftarrow$ Local energy( $D_k^m$ )
$H_1^k = (\text{LSF}_{\text{IR}}^k / (\text{LSF}_{\text{IR}}^k + \text{LSF}_{\text{RP}}^k)) * D_{\text{IR}}^k + (\text{LSF}_{\text{RP}}^k / (\text{LSF}_{\text{IR}}^k + \text{LSF}_{\text{RP}}^k)) * D_{\text{RP}}^k$
$H_2^k = (\text{LEG}_{\text{IR}}^k / (\text{LEG}_{\text{IR}}^k + \text{LEG}_{\text{RP}}^k)) * D_{\text{IR}}^k + (\text{LEG}_{\text{RP}}^k / (\text{LEG}_{\text{IR}}^k + \text{LEG}_{\text{RP}}^k)) * D_{\text{RP}}^k$
End
End
$F_2 = \sum(\text{PCA}(H_1^k, H_2^k))$



(a1) 红外光强图像

(a1) Infrared intensity image



(a2) 红外光强图像

(a2) Infrared intensity image



(a3) 红外光强图像

(a3) Infrared intensity image



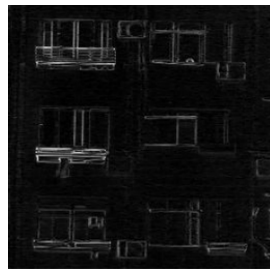
(a4) 红外光强图像

(a4) Infrared intensity image



(b1) 红外偏振图像

(b1) Infrared polarization image



(b2) 红外偏振图像

(b2) Infrared polarization image



(b3) 红外偏振图像

(b3) Infrared polarization image



(b4) 红外偏振图像

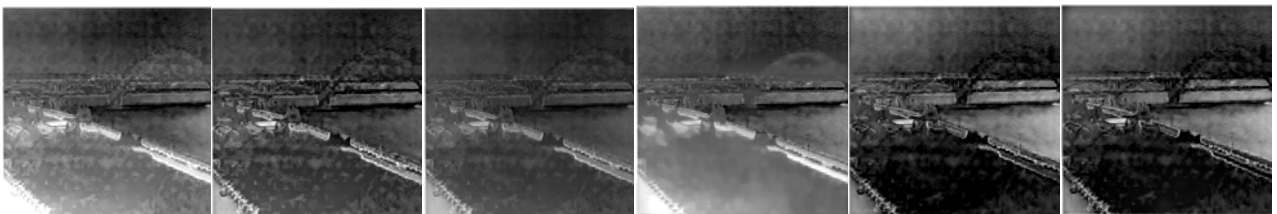
(b4) Infrared polarization image



(a5) 红外光强图像 (b5) 红外偏振图像 (a6) 红外光强图像 (b6) 红外偏振图像  
(a5) Infrared intensity image (b5) Infrared polarization image (a6) Infrared intensity image (b6) Infrared polarization image

图2 红外光强与偏振图像

Fig.2 Infrared intensity and polarization images, (a1)-(a4) Infrared intensity images, (b1)-(b4) Infrared polarization images



(a1) This paper fusion algorithm (a2) LP (a3) SWT (a4) SVT (a5) NSST-PCNN (a6) GFF



(b1) This paper fusion algorithm (b2) LP (b3) SWT (b4) SVT (b5) NSST-PCNN (b6) GFF



(c1) This paper fusion algorithm (c2) LP (c3) SWT (c4) SVT (c5) NSST-PCNN (c6) GFF



(d1) This paper fusion algorithm (d2) LP (d3) SWT (d4) SVT (d5) NSST-PCNN (d6) GFF



(e1) This paper fusion algorithm (e2) LP (e3) SWT (e4) SVT (e5) NSST-PCNN (e6) GFF



(f1) This paper fusion algorithm (f2) LP (f3) SWT (f4) SVT (f5) NSST-PCNN (f6) GFF

图3 不同融合算法融合图像 Fig.3 The fusion images of different fusion algorithms

从图3中可以看到, 不管是文献中图像还是实际拍摄的图像, 本文算法融合图像都具有较好的亮度、细节、边缘及区域对比度特征, 比如图3中本文算法融合图像较好地保留了水面、建筑物边缘、车前窗等偏振较强的区域, 同时融合图像整体视觉效果最好, 而其他融合算法没有很好地保留红外光强图像的亮度特征和红外偏振图像的细节等特征, 视觉效果相对较差, 因此, 本文融合算法能够较好地将红外光强与偏振间多种互补特征较好地融合到图像中。

为了进一步说明本文融合算法的有效性, 采用灰度均值 ( $u$ )、标准差 ( $\sigma$ )、信息熵 ( $M$ )、差异相关性和 ( $R_{ab/F}$ ) 等指标对融合图像进行评价<sup>[20]</sup>,  $R_{ab/F}$  越大表明融合图像与源图像越相似, 如式(20):

$$r(D_k, S_k) = \frac{\sum_i \sum_j [D_k(i, j) - \bar{D}] [S_k(i, j) - \bar{S}]}{\sqrt{\left[ \sum_i \sum_j (D_k(i, j) - \bar{D})^2 \right] \left[ \sum_i \sum_j (S_k(i, j) - \bar{S})^2 \right]}} \quad (20)$$

$$R_{ab/F} = r(D_1, I) + r(D_2, P) \quad (21)$$

式中:  $k=1, 2$ ,  $D_k$  和  $S_k$  分别为融合图像与原图差异图和原图像;  $\bar{D}$  和  $\bar{S}$  分别为  $D_k$  和  $S_k$  均值;  $R_{ab/F}$  是相关性差异和。表3~8为不同融合图像指标值。

表3 第一组红外光强与偏振融合图像指标值

Table 3 The fusion image index values of the first group of infrared light intensity and polarization

Fusion algorithm	$u$	$\sigma$	$M$	$R_{ab/F}$
LP	69.2570	40.9351	6.5054	1.7354
SWT	69.3868	33.0127	6.4634	1.6119
SVT	100.8366	46.0371	7.1467	1.6150
NSST-PCNN	62.5136	50.2934	6.7009	1.0370
GFF	61.8414	46.5714	0.4357	1.1895
This paper	105.222	56.6130	7.0013	1.8525

表4 第二组红外光强与偏振融合图像指标值

Table 4 The fusion image index values of the second group of infrared light intensity and polarization

Fusion algorithm	$u$	$\sigma$	$M$	$R_{ab/F}$
LP	86.5847	31.7298	6.3105	1.7455
SWT	85.7013	24.1091	6.5331	1.5205
SVT	143.2785	40.1977	7.3049	1.7285
NSST-PCNN	152.8770	42.1666	6.8373	1.7628
GFF	20.2391	25.3966	0.0903	1.1317
This paper	162.2015	43.5204	7.0401	1.9417

表5 第三组红外光强与偏振融合图像指标值

Table 5 The fusion image index values of the third group of infrared light intensity and polarization

Fusion algorithm	$u$	$\sigma$	$M$	$R_{ab/F}$
LP	52.8460	35.2304	6.9802	1.5248
SWT	52.1438	27.6834	7.2951	1.4431
SVT	80.9704	50.7916	7.4339	1.7525
NSST-PCNN	79.6781	55.2514	7.2702	1.3561
GFF	76.3510	51.4638	0.7928	1.6702
This paper	91.8233	56.1465	7.6166	1.9172

表6 第四组红外光强与偏振融合图像指标值

Table 6 The fusion image index values of the fourth group of infrared light intensity and polarization

Fusion algorithm	$u$	$\sigma$	$M$	$R_{ab/F}$
LP	91.3913	54.9466	7.1236	1.4654
SWT	91.7140	46.1083	7.1120	1.3186
SVT	139.9660	57.7209	7.3606	1.4924
NSST-PCNN	128.3984	55.1791	6.9647	0.8634
GFF	56.0699	68.6447	0.5719	1.2224
This paper	154.7707	65.9553	7.3829	1.7698

表7 第五组红外光强与偏振融合图像指标值

Table 7 The fusion image index values of the fifth group of infrared light intensity and polarization

Fusion algorithm	$u$	$\sigma$	$M$	$R_{ab/F}$
LP	71.2694	35.6526	6.6839	1.5393
SWT	70.3316	28.6528	7.1316	1.2902
SVT	110.2721	43.5733	7.1932	1.5652
NSST-PCNN	113.2356	45.8973	7.0927	1.3705
GFF	27.4692	28.7692	0.1593	0.8713
This paper	137.9017	52.8827	7.3272	1.9312

表8 第六组红外光强与偏振融合图像指标值

Table 8 The fusion image index values of the sixth group of infrared light intensity and polarization

Fusion algorithm	$u$	$\sigma$	$M$	$R_{ab/F}$
LP	104.2824	33.1386	6.2707	1.8210
SWT	103.8353	25.1304	6.4982	1.7632
SVT	143.2043	35.9252	6.7713	1.7107
NSST-PCNN	128.7341	45.5877	6.4071	1.1292
GFF	104.0915	39.5347	0.6532	1.6724
This paper	198.5984	47.8040	6.7772	1.8904

从表 3~8 中可以看到, 本文融合算法整体上具有较高的灰度均值、标准差、信息熵, 说明本文算法融合图像较好地保留了红外图像的亮度特征, 红外光强与偏振图像的对比度和细节特征。标准差越大图像对比度越高, 红外偏振图像具有较强的对比度特征, 其标准差值较大, 第四组 GFF 的标准差较高, 主要是由于 GFF 只融合了红外偏振图像; 本文算法差异相关性差异和值最高, 说明本文算法融合图像与源图像相似性最高, 表明本文算法能够较好的将两类图像特征迁移到融合图像中, 较好地保留图像信息。对于实际拍摄的图像本文融合算法的指标值同样较高, 具有较好的融合效果, 表明本文融合算法具有较强的适应性。

表 9 和表 10 为融合算法融合实际拍摄图像的运算时间, 混合  $l_0l_1$  层分解采用变分方法获得细节图像和基层图像, 相对 LP、SWT、SVT 和 GFF 运算时间长, 同 NSST-PCNN 相比运算时间短, 虽然整体上时间相对较长, 但其融合算法效果较好, 且从实验结果来看运算时间还是较快的, 具有实际应用的能力。

表 9 图 2 中(a5)和(b5)融合时间

Table 9 The fusion operation time of the figure 2 (a5) and (b5)

This paper	LP	SWT	SVT	NSST-PCNN	GFF
10.689555	0.573178	0.98399	9.394178	18.390709	0.805302

表 10 图 2 中(a6)和(b6)融合时间

Table 10 The fusion operation time of the figure 2 (a6) and (b6)

This paper	LP	SWT	SVT	NSST-PCNN	GFF
10.828798	0.399810	0.926649	8.187327	18.27237	0.893792

总之本文融合算法能够较好地融合红外光强与偏振图像间互补信息, 获得较好的融合图像, 运算时间也较短, 具有较好的融合效果。

## 4 结论

本文提出基于混合  $l_0l_1$  层分解的红外光强与偏振图像融合算法, 利用混合  $l_0l_1$  层分解的优势, 对红外光强与偏振图像进行多尺度分解; 采用指数局部高斯分布作为红外偏振图像的低频特征图像融合权重, 将其注入红外光强图像的低频图像中, 较好地融合红外光强与偏振图像中结构特征; 对高频子带图像采用主成分分析和基于空间频率和能量的两类特征融合图像, 有效地保留了高频子带图像的细节、局部区域等特征; 通过实验对比, 表明本文融合算法较好地保留了红外光强与偏振图像间多种互补性特征, 明显提高了融合图像质量。

## 参考文献:

- [1] BAI X Z. Infrared and visual image fusion through feature extraction by morphological sequential toggle operator[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **71**(2): 77-86.
- [2] 段兴旺, 陈震, 张聪炫, 等. 基于RPCA模型的红外与可见光图像融合[J]. *中国科技论文*, 2018, **13**(8): 64-70.  
DUAN Xingwang, CHEN Zhen, ZHANG Congxuan, et al. Infrared and visible image fusion based on RPCA model[J]. *China Science Paper*, 2018, **13**(8): 64-70.
- [3] YUE Zhen, LI Fangming. An infrared polarization image fusion algorithm based on oriented Laplacian pyramid[C]//*Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014: 9142-1-10.
- [4] ZHANG Lei, YANG Fengbao, JI Linna. Infrared Polarization and Intensity Image Fusion Algorithm Based on the Feature Transfer[J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, **52**(2): 135-145.
- [5] 甄媚, 王书朋. 可见光与红外图像自适应加权平均融合方法[J]. *红外技术*, 2019, **41**(4): 49-54.  
ZHEN Mei, WANG Shupeng. An Adaptive Weighted Average Fusion Method for Visible and Infrared Images[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(4): 49-54.
- [6] 赵婷, 康海林, 张正平. 结合区域分块的快速BRISK图像拼接算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, **55**(3): 031005.  
ZHAO Ting, KANG Hailin, ZHANG Zhengping. Fast Image Mosaic Algorithm Based on Area Blocking and BRISK[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, **55**(3): 031005.
- [7] Amit Vishwakarma, M K Bhuyan. Image Fusion Using Adjustable Non-subsampled Shearlet Transform[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018(99): 1-12.
- [8] 钱伟, 常霞, 虎玲. 基于改进颜色传递策略与 NSCT 的红外与可见光图像伪彩色融合[J]. *红外技术*, 2019, **41**(6): 555-560.  
QIAN Wei, CHANG Xia, HU Lin. Infrared and Visible Image Pseudo Color Fusion Algorithm Based on Improved Color Transfer Strategy and NSCT[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(6): 555-560.
- [9] 刘智嘉, 贾鹏, 夏寅辉, 等. 基于红外与可见光图像融合技术发展及性能评价[J]. *激光与红外*, 2019, **49**(5): 123-130.  
LIU Zhijia, JIA Peng, XIA Yanhui, et al. Development and performance evaluation of infrared and visual image fusion technology[J]. *Laser & Infrared*, 2019, **49**(5): 123-130.
- [10] LIU Fu, LI Jin, HUANG Caiyun. Image Fusion Algorithm Based on Simplified PCNN in Nonsubsampled Contourlet Transform Domain[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **29**(2): 1434-1438.
- [11] 王建, 吴锡生. 基于改进的引导滤波和双通道脉冲耦合神经网络的医学图像融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, **56**(15): 151004.  
WANG Jian, WU Xisheng. Medical Image Fusion Based on Improved Guided Filtering and Dual-Channel Pulse Coupled Neural Networks[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, **56**(15): 151004.

(下转第 701 页)

- ZHANG Zhifu. Development and Analysis of Thermal Imaging Technology[J]. *Infrared Technology*, 1987, **9**(2): 1-22.
- [2] 张坤杰. 美国军用红外通用组件技术的发展[J]. *云光技术*, 2019, **51**(1): 6-13.
- ZHANG Kunjie. Military Development of Infrared Common Module in the United States[J]. *Yunguang Jishu*, 2019, **51**(1): 6-13.
- [3] Glenn M Cuthbertson. TICM II Stretch the UK Thermal Imaging Common Module Class II Enhancement Programme[C]//*SPIE: Optical Systems for Space and Defense*, 1989, **1191**: 509-521.
- [4] Glenn M Cuthbertson. Stretch TICM – The UK Thermal Imaging Common Module Class II Enhancement Programme[C]//*SPIE: Infrared Technology XV*, 1989, **1157**: 185-199.
- [5] Garin S. Tate. Linear-Drive Cryocoolers for the Department of Defense Standard Advanced Dewar Assembly[C]//*SPIE*, 2005, **5783**: 138-144.
- [6] Raytheon Network Centric Systems, DRS Technologies Inc., Reconnaissance, Surveillance and Target Acquisition (RSTA) group. *Standard Advanced Dewar Assembly (SADA)*[M]. Jane's Electro-Optic Systems, 2013-2014.
- [7] Leonardo DRS Company. ARROWHEAD[M/OL]. [2018-8-13]. [https://www.leonardodrs.com/media/3298/arrowhead\\_datasheet.pdf](https://www.leonardodrs.com/media/3298/arrowhead_datasheet.pdf)
- [8] Leonardo DRS Company. IBAS[M/OL]. [2018-9-19]. [https://www.leonardodrs.com/media/3295/ibas\\_datasheet.pdf](https://www.leonardodrs.com/media/3295/ibas_datasheet.pdf)
- [9] Leonardo DRS Company. IBAS BLOCK2[M/OL]. [2018-10-19]. [https://www.leonardodrs.com/media/4476/ibas\\_block2\\_datasheet.pdf](https://www.leonardodrs.com/media/4476/ibas_block2_datasheet.pdf)
- [10] Leonardo DRS Company. Phalanx Thermal Imager[M/OL]. [2018-11-20]. <https://www.leonardodrs.com/products-and-services/phalanx-thermal-imager-pti/>
- [11] LTC.(P) Joseph P. Mackin, Douglas K. Wiltsie. The U.S. Army Development of the Second Generation Horizontal Technology Integration Forward Looking Infrared (FLIR)[C]//*SPIE*, 1996, **2764**: 188-194.
- [12] Raytheon Missile Systems (formerly Raytheon Network Centric Systems), DRS Technologies Inc, Reconnaissance, Surveillance and Target Acquisition (RSTA) segment. *AN/VAS-5 Driver's Vision Enhancer (DVE)* [M]. Jane's Electro-Optic Systems, 2013-2014.
- [13] Army Technology. Leonardo DRS to deliver SG-FLIR kits for US Army combat vehicles [EB/OL]. [2019-4-1]. <https://www.army-technology.com/news/leonardo-sg-flir-kits-us-vehicles/>.
- [14] Jeroen Mullié, Willem vd Groep, Peter Bruins, et al. Improvement of Cooldown time of LSF9599 Flexure Bearing SADA cooler[C]//*SPIE*, 2006, **6206**: 620632-1-620623-7.
- [15] 许红. 美国战术用线性斯特林制冷机进展[J]. *红外技术*, 2009, **31**(7): 420-423.
- XU Hong. Development of the Tactical Linear Stirling Cryocooler in USA[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(7): 420-423.

(上接第 682 页)

- [12] 齐海生, 荣传振, 肖力铭, 等. 基于双树复小波变换与引导滤波的红外与可见光图像融合算法[J]. *通信技术*, 2019, **52**(2): 78-84.
- QI Haisheng, RONG Chuanzhen, XIAO Liming, et al. Development and performance evaluation of infrared and visual image fusion technology[J]. *Communication Technology*, 2019, **52**(2): 78-84.
- [13] LIANG Z T, XU J, ZHANG D, et al. A Hybrid 11-10 Layer Decomposition Model for Tone Mapping[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, **7**: 1-9.
- [14] 周强, 赵巨峰, 冯华君, 等. 非下采样剪切波的红外偏振图像融合[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2014, **48**(8): 1508-1516.
- ZHOU Qiang, ZHAO Jufeng, FENG Huajun, et al. Infrared polarization image fusion with non-sampling Shearlets[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2014, **48**(8): 1508-1516.
- [15] ZHANG Lei, YANG Fengbao, JI Linna, et al. Infrared polarization and intensity image fusion algorithm based on transfer of image feature[J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, **52**(2): 135-145.
- [16] 安富, 杨风暴, 蔺素珍, 等. 基于局部能量与模糊逻辑的红外偏振图像融合[J]. *红外技术*, 2012, **34**(10): 573-583.
- AN Fu, YANG Fengbao, LIN Suzhen, et al. Infrared Polarization Images Fusion Based on Local Energy and Fuzzy Logic[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(10): 573-583.
- [17] Ratliff B M, Tyo J S, Boger J K, et al. Dead pixel replacement in LWIR microgrid polarimeters[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(12): 7596-7609.
- [18] LIN S Z, WANG D J, ZHU X H, et al. Fusion of infrared intensity and polarization images using embedded multi-scale transform[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, **126**(24): 5127-5133.
- [19] LI S, KANG X, HU J. Image Fusion With Guided Filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(7): 2864-2875.
- [20] Aslantas V, Bendes E. A new image quality metric for image fusion: The sum of the correlations of differences[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2015, **69**(3): 1890-1896.