

# 基于 Shearlet 变换域改进的 IR 与灰度 VIS 图像融合算法

王峰<sup>†</sup>, 程咏梅

(西北工业大学自动化学院, 西安 710129)

**摘要:** 针对多尺度变换域内红外(IR)与灰度可见光(VIS)图像融合后图像清晰度差、纹理信息不丰富等问题,提出一种基于剪切波变换(ST)域改进的 IR 与灰度 VIS 图像融合算法. 首先,采用形态学顶帽变换(MTH)增强 IR 与 VIS 图像;然后,对增强后的 IR 与 VIS 图像采用 ST 变换,将其分解成高、低频图像,针对高频图像提出局部标准差(LSTD)与系数绝对值的融合策略;针对低频图像提出一种改进的权值融合策略;最后,通过逆剪切波变换(IST)获得最终融合图像. 仿真实验结果表明,所推荐的方法具有优越的性能.

**关键词:** 图像融合; 剪切波变换; 形态学顶帽变换; 局部区域方差; 融合策略

中图分类号: TP391

文献标志码: A

## Improved infrared and gray visible light image fusion algorithm based on Shearlet transform

WANG Feng<sup>†</sup>, CHENG Yong-mei

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** For the problems of definition difference and poor texture information of image after infrared (IR) and visible (VIS) light image fusion within multiscale transform domain, an improved fusion algorithm for IR and VIS images based on shearlet transform(ST) is proposed. Firstly, Morphology-Hat transform is used for an IR and a VIS light image separately. Then the enhanced IR and VIS light image are decomposed into high-frequency and low-frequency images by shearlet transform(ST). For the high frequency image, the fusion strategy of a local variance and the absolute value of the coefficient is proposed. For the low frequency image, a new weighted fusion strategy is proposed. Finally, the fused image is obtained by using the inverse shearlet transform(IST). The simulation experimental results show that the proposed method has superior performance.

**Keywords:** image fusion; shearlet transform; Morphology-Hat transform; local area variance; fusion strategy

## 0 引言

图像融合是将两幅或多幅具有同一模式或不同模式的源图像融合成一幅具有准确、可靠和全面描述场景信息的过程<sup>[1]</sup>,其中 IR 和 VIS 图像的融合已得到了广泛、深入的研究. VIS 图像反映景物的光谱反射特性,并能提供更高的对比度和更丰富的细节信息,但是在夜间或低光条件下,会遭受严重的质量问题.与 VIS 图像相比,IR 图像可以识别目标场景不受天气条件限制的热辐射或隐藏目标,但是对亮度变化不敏感,这通常会导致对比度差和细节信息的缺乏<sup>[2]</sup>.因此,融合 IR 与 VIS 图像能显著提高人们对目标场景的理解和分析,已广泛应用于军事防御、目标

探测、人类视觉辅助系统和视频监控等领域.

近年来,基于多尺度变换(MST)的图像融合方法成为图像融合领域的研究热点.首先,采用确定的 MST 将源图像分解成不同尺度和方向的高频图像序列和一幅低频图像;然后,采用一定的融合策略分别对图像序列进行融合;最后,对融合后的图像序列进行逆 MST 获得融合图像.因此,有两种因素(即 MST 和融合策略)影响这类方法的融合性能.常用的 MST 包括离散小波变换(DWT)<sup>[3-5]</sup>、曲线波变换(CVT)<sup>[6]</sup>、轮廓波变换(CT)<sup>[7]</sup>和 ST<sup>[8-10]</sup>.其中 ST 是 2005 年提出的一种新的 MST 方法,与 DWT 相比,它不但具有 DWT 的时、频局部特性,而且配有与 DWT 相似的丰

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-08-12.

基金项目: 西安市科技计划项目(CXY1436(9), CXY1350(2)); 国家自然科学基金重点项目(61135001).

作者简介: 王峰(1981—),男,博士生,从事智能信息处理、机器学习的研究;程咏梅(1960—),女,教授,博士生导师,从事智能信息处理、目标跟踪与识别、信息融合等研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: wangfeng81113@163.com

富数学结构和相关联的多分辨率分析.除了具有与CVT和CT相似的分解过程之外,ST还具有以下两个方面的优点:1)由于剪切波不受方向的限制,可以获得更多方向上的信息,实现对图像结构更精确的分析;2)IST只需要剪切波滤波器(STF)的简单合成,不需要STF进行逆变换,这样有利于ST离散化的快速实现.因为ST具有以上优势,所以更适合用于图像融合.

除MST以外,不同子带的融合策略也是影响融合性能的另一个重要因素.为了得到满意的融合效果,必须严密地设计融合策略.最近,在不同的MST域,研究者们提出了多种有效的融合策略融合IR与VIS图像,这些融合策略主要包括:加权平均<sup>[11]</sup>、迭代优化<sup>[12-13]</sup>、根据IR与VIS图像不同物理特征选择融合权重的方法<sup>[14]</sup>.权值平均法简单,易于实现,但获得的融合图像对比度较低.文献[12-13]提出的基于迭代优化的方法选择权值,可以获得良好的融合效果,但最优权值的选择要通过构造目标函数和设置迭代次数来实现,这种方法得到的权重复杂度较高,且鲁棒性较差.文献[14]提出的基于IR与VIS图像物理特征为权重的融合方法,在主观视觉效果和客观质量评价两个方面得到了一定的提高,但是融合图像却丢失了部分重要信息,导致图像的清晰度较差,纹理信息不丰富.

鉴于此,本文提出一种ST变换域结合新融合策略的IR与VIS图像融合方法.运用MTH对IR与VIS进行增强,目的是提高后续融合图像的对对比度,对增强后的IR和VIS图像分别执行ST分解.在ST域中,低频系数采用新设计的基于LSTD和根据IR与VIS图像物理特征为权值的融合策略融合,以提高融合图像的清晰度;高频系数采用LSTD与系数绝对值相结合的融合策略进行融合,能够得到丰富的纹理信息.采用两组IR与VIS图像进行实验并与现存的融合方法进行对比,实验结果表明,所提出方法能够提高图像融合的性能,同时突出显著目标信息,提高图像的清晰度,并保留丰富的细节信息.

## 1 背景知识

### 1.1 形态学顶帽变换

形态学顶帽变换(MTH)也称为高帽变换(THT)和低帽(BHT)变换.THT和BHT变换的重要部分是开和闭运算<sup>[15]</sup>.开和闭运算的基本原理表示为:假设输入图像为 $f(x, y)$ ,结构元素为 $S(i, j)$ , $D_f$ 为 $f$ 的定义域, $D_s$ 为 $S$ 的定义域,膨胀运算定义为 $f \oplus S$ ,有

$$(f \oplus S)(i, j) = \max[f(i-x, j-y) - S(x, y) \mid (i-x, j-y) \in D_f, (x, y) \in D_s]. \quad (1)$$

腐蚀运算定义为 $f \ominus S$ ,有

$$(f \ominus S)(i, j) = \min[f(i+x, j+y) - S(x, y) \mid (i+x, j+y) \in D_f, (x, y) \in D_s]. \quad (2)$$

开运算通过先腐蚀后膨胀处理图像,其运算公式为

$$\psi_S = f \circ S = (f \ominus S) \oplus S. \quad (3)$$

闭运算通过先膨胀后腐蚀处理图像,其运算公式为

$$\psi_D = f \cdot S = (f \oplus S) \ominus S. \quad (4)$$

高低顶帽变换(TBHT)的第1步是THT:开运算用来消除图像的亮细节信息(BI),因此,原始图像与经过开运算处理后的图像相减可以突出图像BI.THT的数学公式表示为

$$TH(f) = f - \psi_S. \quad (5)$$

TBHT的第2步是BHT:闭运算用来消除图像暗细节信息(DI),原始图像与通过闭运算处理后的图像进行相减能够突出图像的DI.BHT的数学公式表示为

$$BH(f) = f - \psi_D. \quad (6)$$

最后,通过TBHT增强的图像可以表示为

$$TB(f) = f + 0.5 \times TH(f) - 0.5 \times BH(f), \quad (7)$$

其中 $TB(f)$ 为增强后的图像.

### 1.2 剪切波变换

ST变换<sup>[8-10]</sup>的基本理论是复合小波理论,它提供了一种有效的利用仿射系统的多尺度分析方法.当维数 $n=2$ 时,具有合成膨胀仿射系统的数学定义式表示为

$$M_{AB}(\psi) = \{|\det A|^{\frac{1}{2}} \psi(B^l A^j x - k) : j, l \in Z, k \in Z^2\}. \quad (8)$$

其中: $\psi \in L^2(R^2)$ , $A$ 和 $B$ 为可逆矩阵, $|\det B| = 1$ .如果满足如下Parseval框架(紧框架):

$$\sum_{j,l,k} |\langle f, \psi_{j,l,k} \rangle|^2 = \|f\|^2, \forall f \in L^2(R^2), \quad (9)$$

且

$$A = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{bmatrix}, a > 0;$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, s \in R.$$

则称  $M_{AB}(\psi)$  为小波集合. 其中  $A$  为与尺度变换相关联的各向异性膨胀矩阵, 剪切波矩阵  $B$  为几何变换,  $a = 4, s = 1$ .

离散ST变换的分解过程可以概括如下: 利用拉普拉斯金字塔算法将图像  $f_a^{j-1}$  分解为低频图像  $f_a^j$  和 高频图像  $f_d^j$ ; 分解后估计图像  $f_d^j$  的傅里叶变换  $\hat{f}_d^j$ , 并将其转换到伪极化格上, 得到矩阵  $Pf_d^j$ ; 对矩阵  $Pf_d^j$  进行带通滤波, 直接得到重构的笛卡尔样本值, 并运用快速二维傅里叶逆变换获得ST系数.

## 2 推荐的融合算法

### 2.1 一般融合过程

本文所提出的融合算法的示意图如图1所示. 融合过程实现的主要步骤如下.

Step 1: 采用MTH分别对VIS和IR图像进行增强.

Step 2: 对增强后的VIS和IR图像分别进行  $J$  层ST分解, 获得ST的系数表示为

$\{C_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n), C_{\text{VIS}}^{j,l}(m, n)\}, \{C_{\text{IR}}^{j_0}(m, n), C_{\text{IR}}^{j,l}(m, n)\}$ . 其中:  $j \geq 0 (X = \text{VIS}, \text{IR}), C_X^{j_0}(m, n)$  为低频子带系数,  $C_X^{j,l}(m, n)$  为  $j$  尺度  $l$  方向上的高频子带系数.

Step 3: 对低高频子带系数分别采用新设计的融合策略, 并获得新的进行IST变换的ST系数, 融合系数为  $\{C_F^{j_0}(m, n), C_F^{j,l}(m, n) (j \geq j_0)\}$ .

Step 4: 将IST变换应用于新的低频和高频系数, 重构出融合图像  $F$ .

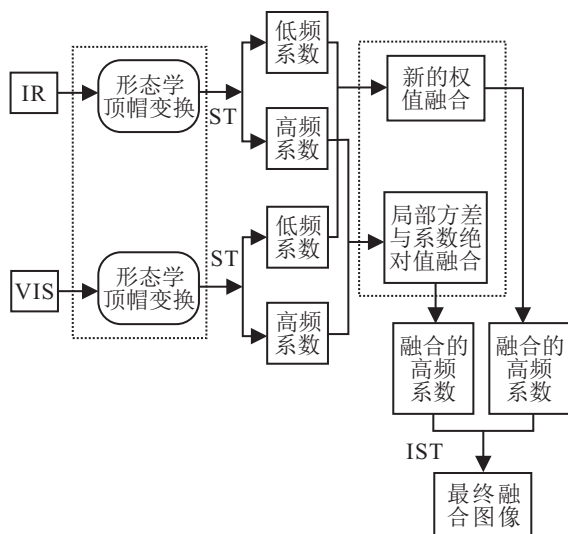


图1 推荐算法的流程

### 2.2 低频系数的融合策略

ST的低频系数包含了VIS与IR图像近似分量, 文献[14]从VIS与IR图像的物理特性出发, 给出了基

于物理特征的权值计算方法, 但是采用该权系数得到的融合图像对比度和清晰度改善的并不是特别明显. 为了得到更显著的目标区域, 提高图像的清晰度, 提出一种以局部区域标准差和根据VIS与IR图像物理特性为权值的计算方法, 并将推荐方法的步骤给出如下.

Step 1: 计算局部区域STD, 有

$$\delta(m, n) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} t^2}, \quad (10)$$

$$t = p(i + m, j + n) - \mu. \quad (11)$$

其中:  $p(i, j)$  为图像像素;  $\delta(m, n)$  为局部区域STD;  $\mu$  为像素  $p(i, j)$  在局部区域的均值, 表示局部区域窗口的大小  $M \times N$ , 一般取  $3 \times 3$ .

Step 2: 计算以IR与VIS图像物理特征为权值的系数, 有

$$\begin{cases} w_1(m, n) = \frac{\bar{m}_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n) \times (1 + \delta_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n))}{\max_{(m,n)} (\bar{m}_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n) \times (1 + \delta_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n)))}, \\ w_2(m, n) = \frac{|\bar{m}_{\text{IR}}^{j_0}(m, n) - \bar{m}_{\text{IR}}(m, n)|}{1 + \delta_{\text{IR}}^{j_0}(m, n)} \\ \max_{(m,n)} \left( \frac{|\bar{m}_{\text{IR}}^{j_0}(m, n) - \bar{m}_{\text{IR}}(m, n)|}{1 + \delta_{\text{IR}}^{j_0}(m, n)} \right). \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $\bar{m}_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n)$ 、 $\bar{m}_{\text{IR}}^{j_0}(m, n)$  分别为VIS与IR图像的局部均值,  $\bar{m}_{\text{IR}}(m, n)$  为IR低频图像的整体均值.

Step 3: 计算新权值

$$\begin{cases} w_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n) = \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n)}{\delta_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n) + \delta_{\text{IR}}^{j_0}(m, n)} + \frac{w_1(m, n)}{w_1(m, n) + w_2(m, n)} \right), \\ w_{\text{IR}}^{j_0}(m, n) = \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_{\text{IR}}^{j_0}(m, n)}{\delta_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n) + \delta_{\text{IR}}^{j_0}(m, n)} + \frac{w_2(m, n)}{w_1(m, n) + w_2(m, n)} \right), \end{cases} \quad (13)$$

其中  $w_1(m, n)$  和  $w_2(m, n)$  为基于VIS与IR图像物理特征的权值系数.

Step 4: 低频融合系数可以表示为

$$C_F^{j_0}(m, n) = w_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n) C_{\text{VIS}}^{j_0}(m, n) + w_{\text{IR}}^{j_0}(m, n) C_{\text{IR}}^{j_0}(m, n), \quad (14)$$

其中  $C_F^{j_0}(m, n)$  为融合后的低频系数.

### 2.3 高频系数的融合策略

高频ST系数融合的主要目的是得到清晰的边缘区域,提高图像的清晰度.目前常用的系数绝对值取大的融合方法虽然可以获得丰富的纹理信息,但是容易在融合图像的边缘上引起不连续性. LSTD取大的融合方法虽然能提高图像的清晰度和对比度,减少噪声对融合效果的影响,但是不能有效区分图像轮廓与非轮廓区域.考虑到这两种融合方式的优点,提出一种基于LSTD与系数绝对值相结合的高频系数选择策略,具体实现过程如下.

**Step 1:** 根据式(10)和(11)分别计算VIS与IR图像高频子带系数在 $j$ 尺度1方向的局部区域标准差 $\delta_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n)$ 和 $\delta_{\text{IR}}^{j,l}(m,n)$ .

**Step 2:** 利用式(15)给出的融合策略选取高频融合系数

$$C_F^{j,l}(m,n) = \begin{cases} C_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n), & \delta_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n) \geq \delta_{\text{IR}}^{j,l}(m,n), \\ & |C_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n)| \geq |C_{\text{IR}}^{j,l}(m,n)|; \\ C_{\text{IR}}^{j,l}(m,n), & \delta_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n) < \delta_{\text{IR}}^{j,l}(m,n), \\ & |C_{\text{IR}}^{j,l}(m,n)| < |C_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n)|; \\ C_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n) + C_{\text{IR}}^{j,l}(m,n), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

其中: $C_{\text{VIS}}^{j,l}(m,n)$ 、 $C_{\text{IR}}^{j,l}(m,n)$ 分别为VIS与IR图像在 $j$ 尺度1方向上的高频系数.

## 3 实验与分析

### 3.1 源图像

为了验证所提出算法,选用2组VIS与IR图像进行实验,2组测试图像经过准确配准,图像大小为 $256 \times 256$ ,如图2所示.

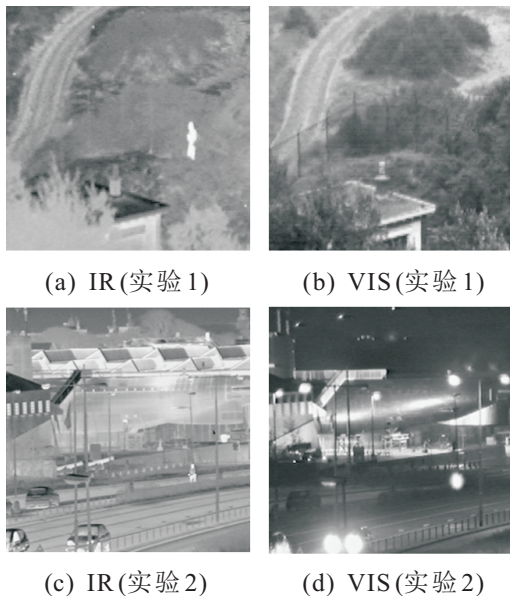


图2 源图像

### 3.2 增强后的图像

形态学顶帽变换分别用于增强IR与VIS图像的对比度,增强后的效果如图3所示.

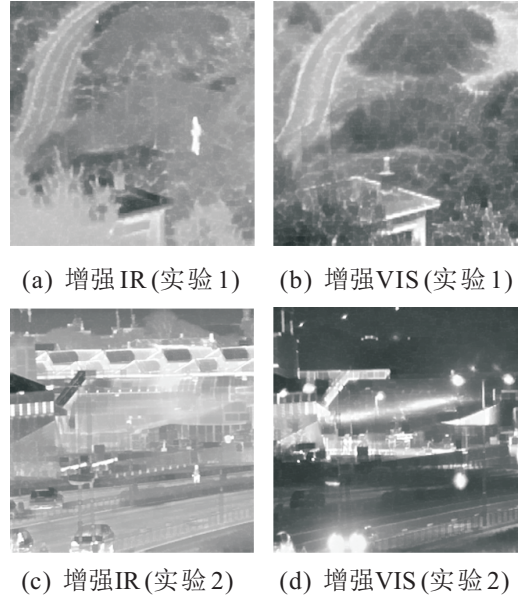


图3 增强实验

### 3.3 实验结果分析

为了将所提出算法( $M_6$ )与其他算法进行对比,列出了几种现有的融合算法,主要包括:文献[16]的方法( $M_1$ )、LP方法( $M_2$ )<sup>[17]</sup>、CT方法( $M_3$ )、NSCT方法( $M_4$ )、文献[14]的方法( $M_5$ ).将方法 $M_3$ 和 $M_4$ 的分解层数设置为3层,低频系数选用加权平均,高频系数选用系数绝对值取大法.方法 $M_1$ 、 $M_2$ 和 $M_5$ 的融合策略分别与其对应的参考文献相一致.实验结果评价包括主观和客观评价两个方面.

#### 3.3.1 主观评价

图4和图5给出6种融合方法融合IR与VIS图像的主要信息.如图4所示,方法 $M_1$ 的视觉效果最差,融合图像的对比度较低,融合图像所显示的细节信息并不是特别清楚.方法 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 和 $M_5$ 的融合效果基本相似.由图4可见, $M_2 \sim M_5$ 与 $M_1$ 相比,在目标区域的周围信息丢失并不是特别严重,因而 $M_6$ 能够提供最好的视觉效果.融合图像和原始图像中人的亮度基本一致,融合图像提供的细节很明显,对比度比较强,边缘轮廓显示的比较清晰.综上,推荐的融合算法 $M_6$ 在实验中是最好的.

如图5所示,与 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 和 $M_5$ 相比, $M_6$ 有最好的性能.汽车灯光的纹理细节显示的清晰,路面的边缘轮廓较为明显,对比度较高,信息量比较充足,在IR图像中的亮和暗区域保留的较好.整体视觉效果最好.

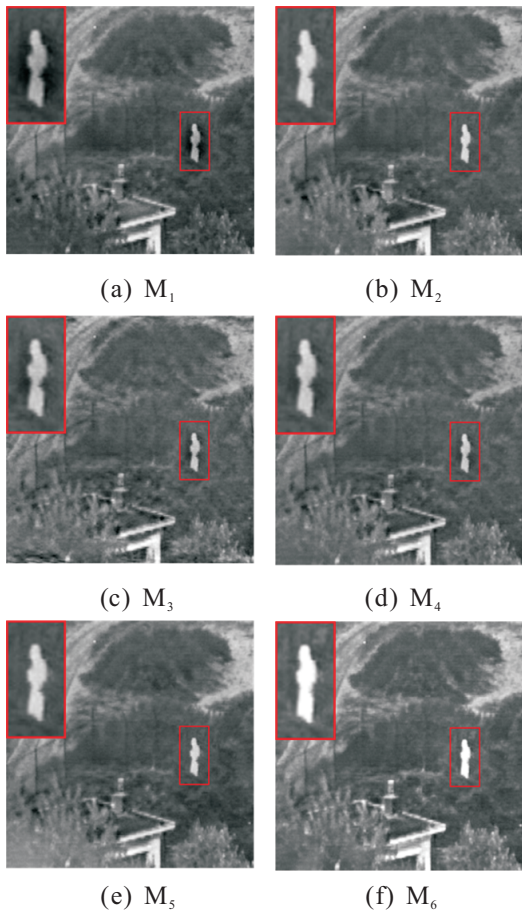


图4 第1组实验的融合结果

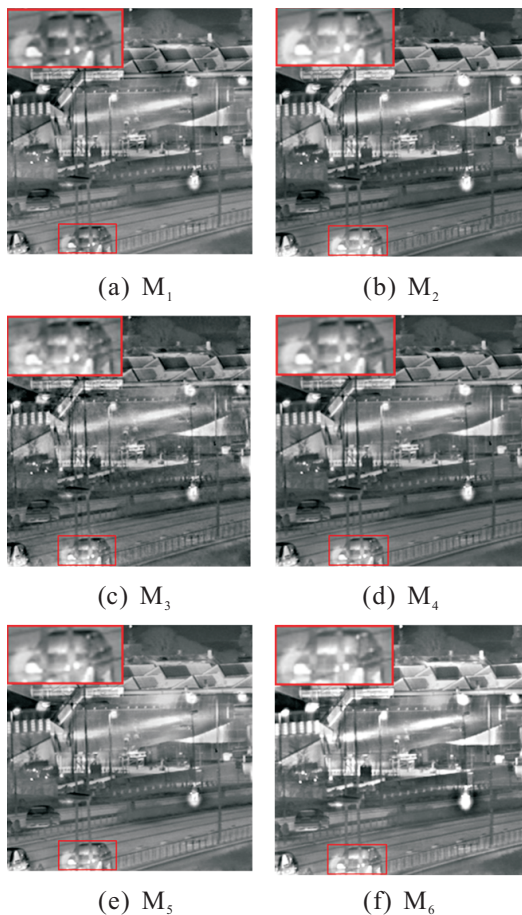


图5 第2组实验的融合结果

### 3.3.2 客观评价

融合图像的客观评价采用以下评价标准:

1) 信息熵(IE)<sup>[18]</sup>是测量信息丰富程度的重要标准,其大小表示融合图像中包含信息量的多少.

2) 标准差(SD)<sup>[19]</sup>表明了融合图像的统计分布,并描述了融合图像的对比度. SD值越大,在图像中的灰度离散分布越大,图像的对比度越大,融合图像的视觉效果也越好.

3) 平均梯度(AG)<sup>[20]</sup>能够反映图像细节和图像纹理的变化. AG越大,图像的细节信息越清晰,融合图像的质量越好.

4) 空间频率(SF)<sup>[21]</sup>描述的是图像值在空域的变化,它代表细节的清晰程度. SF越大,纹理越丰富,融合图像的边缘越好.

评估标准值如表1和表2所示,表1给出了图4的评估结果和对比算法的运行时间,表2给出了图5的客观评价结果和相应算法的运行时间.

表1 实验1的融合结果比较

Method	Metrics				Run-Time / s
	IE	SD	AG	SF	
M <sub>1</sub>	6.809 7	32.871 3	5.627 1	10.812 0	68.270 8
M <sub>2</sub>	6.663 5	29.112 9	5.479 2	10.722 0	0.006 5
M <sub>3</sub>	6.682 1	28.846 6	6.573 9	12.347 8	0.692 4
M <sub>4</sub>	6.550 2	27.097 9	5.598 2	10.785 0	69.769 7
M <sub>5</sub>	6.810 3	33.721 5	5.473 0	10.622 7	96.211 0
M <sub>6</sub>	6.829 6	35.296 1	6.469 7	13.058 3	48.550 5

表2 实验2的融合结果比较

Method	Metrics				Run-Time / s
	IE	SD	AG	SF	
M <sub>1</sub>	7.246 7	39.427 4	10.529 0	22.029 2	68.223 9
M <sub>2</sub>	7.342 8	47.400 3	10.514 1	22.233 5	0.005 9
M <sub>3</sub>	7.321 4	43.920 2	11.423 3	22.980 3	0.575 0
M <sub>4</sub>	7.267 1	42.957 2	10.449 2	22.048 0	68.345 0
M <sub>5</sub>	7.388 3	44.616 7	10.029 7	21.098 5	96.345 9
M <sub>6</sub>	7.392 2	52.116 6	11.703 9	25.787 2	47.362 1

由表1和表2可见,M<sub>6</sub>在IE、SD、AG、SF四种图像质量评价中实现了最好的融合性能,特别是在IE、SD和SF上有了最大的提高.但是,从算法的运行效率上看,M<sub>6</sub>的运行时间低于M<sub>1</sub>、M<sub>4</sub>和M<sub>5</sub>,高于M<sub>2</sub>和M<sub>3</sub>.

可见,M<sub>6</sub>的AG质量评估标准有一点低,但是,IE、SD和SF的质量评价标准高于其他对比的融合算法,这说明,M<sub>6</sub>与其他融合算法相比在总体性能上是最优的.

## 4 结 论

本文提出了一种基于ST变换域改进的IR与VIS图像融合算法,与几种现存的融合算法相比,可以得出,所提出的算法具有以下3个方面的优势:

1)采用MTH算法对源图像进行增强,能够有效改善图像的对比度,因此,最终的融合图像对比度提升非常明显。

2)针对低频系数的特性,提出了一种新权值融合方法,采用该方法能够使源图像的有效成份得到更好地保留,达到最好的融合效果。

3)针对高频系数的特性,提出了基于LSTD与高频系数绝对值相结合的方法以融合高频系数,使高频信息显示得更明显,融合图像的纹理信息更丰富。

实验结果表明,本文推荐的融合方法能够提供丰富的图像信息、清晰的纹理和更好的视觉效果,推荐的算法有效,且优于现存的图像融合算法。

### 参考文献(References)

- [1] Miao Q, Shi C, Xu P, et al. A novel algorithm of image fusion using shearlets[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(6): 1540-1547.
- [2] Zheng H, Zheng C, Yan X S, et al. Visible and infrared image fusion algorithm based on shearlet transform[J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1613-1619.
- [3] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform[J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1995, 57(3): 235-245.
- [4] Lu H, Zhang L, Serikawa S. Maximum local energy: An effective approach for multisensor image fusion in beyond wavelet transform domain[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, 64(5): 996-1003.
- [5] Ellmauthaler A, Pagliari C L, da Silva E A B. Multiscale image fusion using the undecimated wavelet transform with spectral factorization and nonorthogonal filter banks[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2013, 22(3): 1005-1017.
- [6] Li S, Yang B. Multifocus image fusion by combining curvelet and wavelet transform[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(9): 1295-1301.
- [7] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [8] Easley G, Labate D, Lim W Q. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, 25(1): 25-46.
- [9] Kutyniok G, Labate D. Resolution of the wavefront set using continuous shearlets[J]. *Trans of the American Mathematical Society*, 2009, 361(5): 2719-2754.
- [10] Kutyniok G, Sauer T. Adaptive directional subdivision schemes and shearlet multiresolution analysis[J]. *SIAM J on Mathematical Analysis*, 2009, 41(4): 1436-1471.
- [11] Zhao N, Zhang J, Zhu J. An image fusion method based on high frequency variance contrast processing of wavelet coefficient[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(4): 253-255.
- [12] Chang X, Jiao L C, Jia J H. Multisensor image adaptive fusion based on nonsubsampling contourlet[J]. *China J of Computer*, 2009, 32(11): 2229-2237.
- [13] Chen H, Zhu J, Liu Y Y. Image fusion based on pulse neural network[J]. *Options Precision Engineering*, 2010, 18(4): 995-1001.
- [14] 张强, 郭宝龙. 一种基于非采样Contourlet变换红外图像与可见光图像融合算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(6): 476-480.  
(Zhang Q, Guo B L. Fusion of infrared and visible light images based on nonsubsampling contourlet transform[J]. *J of infrared and millimeter waves*, 2007, 26(6): 476-480.)
- [15] 曹晓琳. 基于数学形态的边缘检测方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学理学院, 2012.  
(Cao X L. Image edge detection method based on mathematical morphology[D]. Harbin: Department of Mathematics, Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [16] Yin S, Cao L, Tan Q, et al. Infrared and visible image fusion based on NSCT and fuzzy logic[C]. *IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation(ICMA)*. Xi'an, 2010: 671-675.
- [17] Oliver R. Image fusion toolbox[EB/OL]. (1999)[2015]. <http://www.imagefusion.org/>.
- [18] Hoffmann H J. Entropy and entropy of mixing[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2014, 45(3): 137-168.
- [19] Garg P K, Mohanty D. Mean (standard deviation) or mean (standard error of mean): Time to ponder[J]. *World J of Surgery*, 2013, 37(4): 932-932.
- [20] 张强, 郭宝龙. 一种基于Curvelet变换多传感器图像融合算法[J]. *光电子激光*, 2006, 17(9): 1123-1127.  
(Zhang Q, Guo B L. Fusion of multi-sensor images based on the Curvelet transform[J]. *J of Optoelectronics Laser*, 2006, 17(9): 1123-1127.)
- [21] Sun X, Hou W, Yu Q, et al. Small infrared target detection using frequency-spatial cues in a single image[J]. *J of Electronic Imaging*, 2014, 23(4): 043003.

(责任编辑: 郑晓蕾)