

文章编号: 1001-3806(2016)06-0892-05

## NSST 域模糊逻辑的红外与可见光图像融合

葛 雯, 姬鹏冲, 赵天臣

(沈阳航空航天大学 电子信息工程学院 电子与通信工程系, 沈阳 110136)

**摘要:** 为了在红外与可见光图像融合时保留各自更多的细节信息,同时降低算法复杂度,采用了非下采样剪切波变换(NSST)和改进模糊逻辑的红外与可见光图像融合方法,利用NSST算法对红外图像和可见光图像分别进行多尺度、多方向稀疏分解,分别得到低频子带系数和高频子带系数。然后对低频子带系数采用基于改进的模糊柯西隶属函数的权重平均融合规则;对高频子带系数采用能量匹配度和视觉敏感度系数相结合的融合规则。最后对低频子带融合系数和高频子带融合系数执行NSST逆变换得到最终的融合图像,并进行了理论分析和实验验证。结果表明,此融合方法不仅可以保证融合清晰度,对缩短算法的运行时间也是有帮助的。

**关键词:** 图像处理; 模糊逻辑; 能量匹配度; 视觉敏感度

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.024

### Infrared and visible light images fusion of fuzzy logic on NSST domain

*GE Wen, JI Pengchong, ZHAO Tianchen*

(Department of Electronic Engineering, School of Electronics and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In order to retain more detail information and reduce the algorithm complexity when fusing the infrared and visible light images, a fusion algorithm based on non-subsampled shearlet transform (NSST) and improved fuzzy logic was proposed to decompose source images sparsely on multi-direction and multi-scale. Low-frequency subband coefficients and high-frequency subband coefficients were obtained. The improved average fusion method of fuzzy Cauchy membership function was adopted in low-frequency subband coefficients. The fusion rule of the combination of energy compatibility and visual sensitivity coefficient was used in high-frequency subband coefficients. Finally, fusion image was obtained after NSST inverse transformation. Experimental results show that the fusion method can not only guarantee the definition of fused image, but also shorten the running time of algorithm.

**Key words:** image processing; fuzzy logic; energy compatibility; visual sensitivity

## 引 言

图像融合旨在对单一的传感器受环境影响造成成像不完全、不准确等方面,通过对来自不同传感器的同一场景的图像进行优势互补融合,以此消除单一传感器取得的图像信息的缺点<sup>[1]</sup>。此种技术被应用在很多技术领域,比如红外与可见光图像的融合、高光谱图像的融合、多聚焦图像的融合等。本文中重点研究红外与可见光图像的融合,由于红外图像和可见光图像各自的特点,对它们进行融合可以获得丰富的细节信

息和良好的视觉效果。

由图像信息提取的特征层次的不同,可以把图像融合分为像素级图像融合、特征级图像融合、决策级图像融合这3个层次。目前主要的图像融合算法有色调饱和度强度(hve saturation intenrity, HSI)变换、小波变换、曲线波变换、轮廓波变换等<sup>[2]</sup>。传统的图像融合算法只针对特定的背景,算法复杂度高、边缘细节信息提取的不全,只能在有限的方向上分解,为此GUO和EASLEY等人提出了基于非下采样剪切波变换(non-subsampled shearlet transform, NSST)。NSST理论中让标准的剪切波滤波器从伪极向坐标系统映射到Cartesian坐标系统,通过快速逆傅里叶变换,进行2维卷积完成,从而避免了下采样操作,使其具有平移不变性,克服了伪Gibbs现象<sup>[3]</sup>。

图像融合质量的好坏取决于采取的融合算法,为了精确地再现场景信息,必须尽最大可能保留源图像的全部图像信息,这就要求对进行NSST分解后的高

基金项目: 辽宁省科技厅工业攻关基金资助项目(2012216027); 沈阳市科技计划资助项目(F13-096-2-00)

作者简介: 葛 雯(1972-), 女, 博士, 副教授, 现主要从事图像处理、航空电子信息的研究。

E-mail: gewenbox72@sina.com

收稿日期: 2015-08-17; 收到修改稿日期: 2015-11-03

低频子带图像分别采用合适的方法进行融合<sup>[4]</sup>。红外图像的低频子带部分的信息分为背景信息和红外目标信息,而可见光图像的低频子带部分主要是丰富的背景信息;以往的低频子带加权融合算法往往没有考虑到红外图像的这两部分图像信息,只对红外图像的低频部分取平均,这样就会使图像信息丢失严重。作者采用模糊逻辑选择出红外图像的特征目标信息,再进行融合,以此来尽最大可能保留源图像的信息;对高频部分采用能量匹配度和视觉敏感度相结合的方法进行融合,对高亮丰富的细节信息进行捕捉从而丰富融合图像的细节信息。作者对两组红外与可见光图像采用不同的融合方法,并对融合后的图像采用主观和客观评价对比。

### 1 图像的 NSST 变换理论

现在研究的各种多尺度几何分析方法,比如小波变换及其延伸出的离散小波变换、正交小波变换等,虽然对图像融合有一定的贡献,但大都有它们自身的一些缺点。在此理论基础上,GUO 和 EASLEY 等人利用合成小波理论,通过把几何和多尺度分析结合起来,提出了 shearlet 变换理论。以前的小波框架只能构造水平、垂直和对角 3 个方向元素,合成小波通过将小波中 1 维尺度变换因子变换成膨胀因子和剪切因子得到 2 维空间,通过变换得到的合成小波系统就可以构造任意方向的基元素,但是 shearlet 变换理论不具有平移不变性<sup>[4,5]</sup>。随后在此基础上提出了 NSST 变换,此变换由基于非下采样金字塔(non-subsampled pyramid, NSP)滤波组的多尺度分解和基于改进的剪切波滤波器组(shearlet filter, SF)的多方向分解这两部分组成<sup>[6]</sup>。

当图像空间维数  $n=2$  时,合成膨胀的仿射系统表达式如下式所示:

$$M_{HR}(\Psi) = \{ \Psi_{jk}(x) \} =$$

$$\{ |\det H|^{j/2} \Psi(R^l H^j x - k) \}, (j, l \in \mathbf{R}, k \in \mathbf{R}^2) \quad (1)$$

式中,  $\Psi \in H^2(\mathbf{R}^2)$ ;  $H$  和  $R$  是  $2 \times 2$  的可逆矩阵,  $H$  称为各向异性膨胀矩阵,  $R$  称为剪切矩阵,且  $|\det R| = 1$ ;  $j$  表示图像的分解层数,  $j \in \mathbf{R}^+$ ;  $l$  表示图像的剪切方向,  $l \in \mathbf{R}$ ;  $k$  表示图像的平移量参数,  $k \in \mathbf{R}^2$ ;  $H = \begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & \sqrt{d} \end{bmatrix}$ ,  $R = \begin{bmatrix} 1 & s & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 通常  $d=4, s=1$  时的合成小波变换称为剪切波。NSST 的多尺度分解结构示意图如图 1 所示。NSST 的梯形支撑区间如图 2 所示。图 3 所示为 NSST 的方向滤波器 5 层分解示意图。

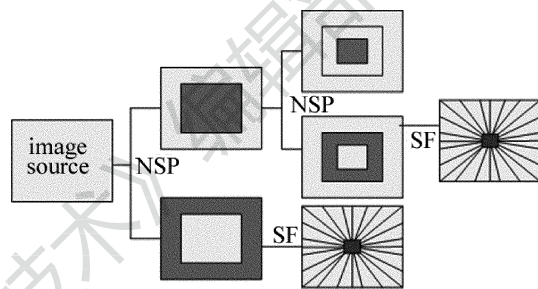


Fig. 1 NSST decomposition

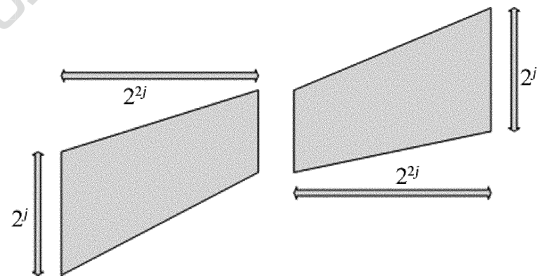


Fig. 2 Trapezoidal range of NSST

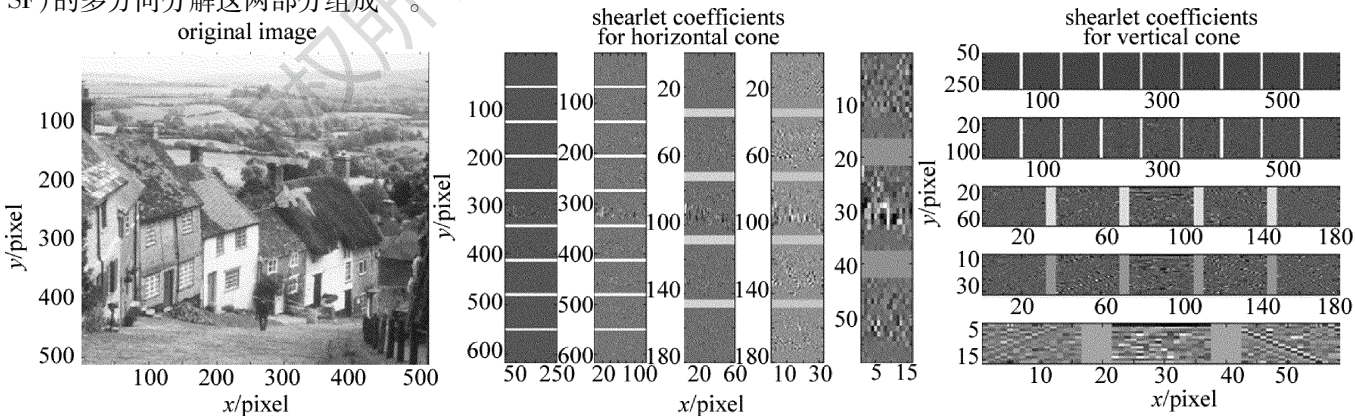


Fig. 3 5 level of NSST decomposition filter

### 2 基于 NSST 的图像融合

对红外图像和可见光图像分别进行 NSST 算法分解后,得到各自的低频子带分量和高频子带分量。图像的低频分量包含了图像的大部分背景能量和光谱信

息;高频子带分量包含图像的纹理、亮暗梯度变化、区域边界等的细节信息。

#### 2.1 图像融合的步骤

(1) 对经过严格配准的红外图像和可见光图像用 NSST 算法分别进行分解,得到各自的 NSST 分解系数

$\{C_{I,0}(m,n), C_{I,jk}(m,n)\}$  和  $\{C_{V,0}(m,n), C_{V,jk}(m,n)\}$ , 其中,  $C_0(m,n)$  为低频子带系数,  $C_{jk}(m,n)$  为  $j$  层下  $k$  方向的高频子带系数,  $I$  为红外图像,  $V$  为可见光图像。

(2) 对红外与可见光图像的低频子带系数  $C_{I,0}(m,n)$  和  $C_{V,0}(m,n)$  用基于改进的加权负矩阵分解 (negative matrix factorization, NMF) 方法进行融合, 得

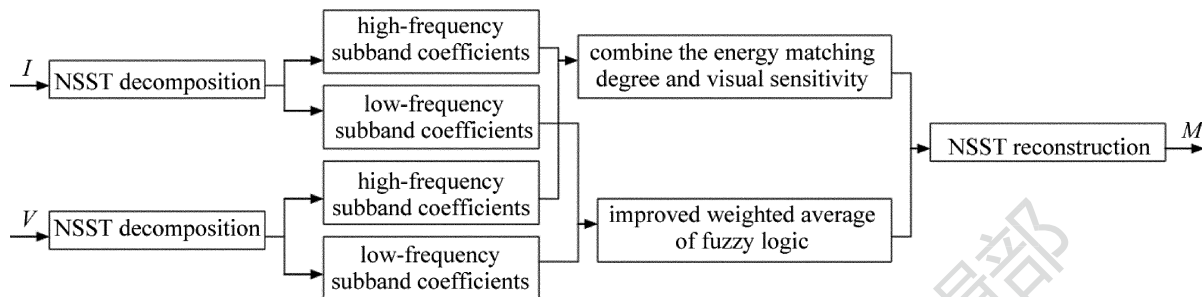


Fig. 4 Flow chart of image fusion based on NSST

### 2.2 低频子带图像融合规则

红外图像的低频子带系数包含了图像的红外目标信息和背景信息; 而可见光图像的低频子带系数包含了图像背景信息<sup>[7-10]</sup>, 引入柯西变体隶属模糊逻辑函数选择出红外图像的特征目标信息, 和可见光的背景信息进行优势互补; 因此采用基于模糊逻辑的改进加权平均方法对源图像的低频子带系数进行融合。得到的低频融合系数使图像的主要信息和轮廓信息最大程度地保留了下来。低频子带系数的改进加权平均为:

$$C_{M,0}(m,n) = \alpha [C_{I,0}(m,n) + C_{V,0}(m,n)] + \beta |C_{I,0}(m,n) - C_{V,0}(m,n)| \quad (2)$$

式中,  $\alpha [C_{I,0}(m,n) + C_{V,0}(m,n)]$  反映了图像的主要低频能量,  $\beta |C_{I,0}(m,n) - C_{V,0}(m,n)|$  反映了图像间的细节差异。

柯西变体隶属函数为:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{1 + a(x - \mu)^b} \\ \beta = 1 - \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha, \beta$  表示红外低频图像中每一个像素是背景还是目标信息的权值系数;  $a, b$  为自适应调整因子, 一般在 1~3 之间取值, 本文中取  $a=1, b=2$ ;  $\mu$  为红外图像的低频区域均值, 通过自适应调整找出红外图像的目标特征信息。

### 2.3 高频子带图像融合规则

图像的高频子带部分代表图像的边缘、纹理等细节信息, 图像的像素值越大, 表示图像的细节信息越多, 像素点为目标点时, 此时包含的局部离散性大, 信息熵也大; 当像素点为背景点时, 此时的局部离散性适中信息熵较小, 但是在高频子带中背景点在各个方向子带上仍有残留, 表现出信息熵较大的现象, 此时能量

到低频子带融合系数  $C_{M,0}(m,n)$ 。

(3) 采用能量匹配度和视觉敏感度系数相结合的方法, 对高频子带系数  $C_{I,jk}(m,n)$  和  $C_{V,jk}(m,n)$  进行融合, 得到 NSST 域的高频子带融合系数  $C_{M,jk}(m,n)$ 。

(4) 对  $C_{M,0}(m,n)$  和  $C_{M,jk}(m,n)$  进行 NSST 逆变换, 得到最终的融合图像  $M$ 。流程图见图 4。

较大。利用人眼视觉对图像的局部变化比较敏感的特征, 使用视觉敏感度系数更好地搜索出背景点<sup>[10-13]</sup>, 而且目标点局部离散性比背景点大, 综合能量匹配度和视觉敏感度系数, 采用它们各自的优势进行互补, 可以使融合后的高频子带系数更好地保留原图像的细节信息, 增强视觉效果。能量匹配度  $H(m,n)$  和视觉敏感度系数  $S$  的表达式见下:

$$\begin{cases} H(m,n) = \frac{2C_{I,jk}(m,n) \times C_{V,jk}(m,n)}{[C_{I,jk}(m,n)]^2 + [C_{V,jk}(m,n)]^2} \\ S[C_{jk}(m,n)] = \frac{C_{jk}(m,n)}{C_0(m,n)} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\overline{C_0(m,n)} = \frac{1}{M \times N} \times$

$$\sum_{e=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{f=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} C_0(m+e, n+f) \quad (5)$$

设定一个能量匹配度阈值  $T$ , 当  $H(m,n) \geq T$  时, 对应两源图像高频部分的背景信息, 此时的融合规则如下式所示:

$$C_{M,jk}(m,n) = S_{I,jk} \max[C_{I,jk}(m,n), C_{V,jk}(m,n)] + S_{V,jk} \min[C_{I,jk}(m,n), C_{V,jk}(m,n)] \quad (6)$$

当  $H(m,n) < T$  时, 融合规则如下式所示:

$$C_{M,jk}(m,n) = \begin{cases} C_{I,jk}(m,n), (C_{I,jk}(m,n) > C_{V,jk}(m,n)) \\ C_{V,jk}(m,n), (other) \end{cases} \quad (7)$$

## 3 图像融合评价指标及实验结果分析

为验证本文中融合算法可行性, 选择两组不同的  $256 \times 256$  的红外与可见光源图像, 采用 contourlet 变换、NSCT 变换、一般 NSST 变换算法、NSST 域模糊逻辑变换, MATLAB R2015a 分别进行融合仿真实验。随



着图像分解层数增加,各子带系数之间的关联性增加,相互干扰,影响融合质量<sup>[14-16]</sup>。为保证良好的融合效果,本文中分解层数为 4 层。图 5c 采用 contourlet 变换进行分解,低频部分取平均,高频部分取子带系数绝对值最大;图 5d 用 NSCT 分解,低频部分采用改进的加权平均,高频部分的最高层采用方差选大,其余层采用能量选大;图 5e 用 NSST 算法分解,低频部分取平均,高频部分取绝对值最大;图 5f 采用本文中的 NSST 域模糊逻辑的融合算法。图 5 和图 6 的对应部分的融合算法相同。

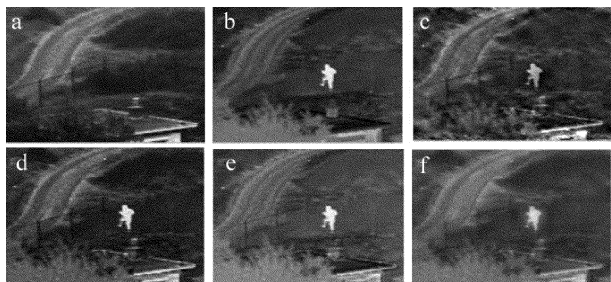


Fig. 5 Infrared image, visible light image and fusion images under various algorithms of group A  
a—visible light image b—infrared image c—contourlet fusion image d—NSCT fusion image e—general NSST fusion image f—NSST fusion image

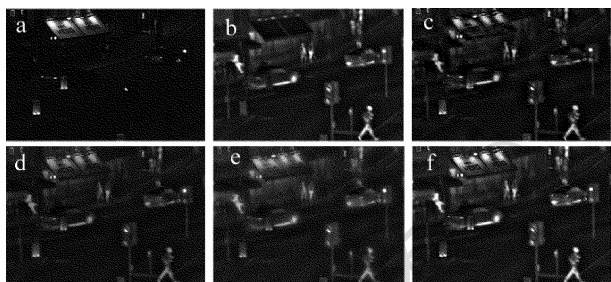


Fig. 6 Infrared image, visible light image and fusion images under various algorithms of group B  
a—visible light image b—infrared image c—contourlet fusion image d—NSCT fusion image e—general NSST fusion image f—NSST fusion image

从主观方面分析上面两组实验图像,可以直观得出每种算法下的融合图像都有各自的特点,对融合图像质量都有一定的提高。图 5c 中用 contourlet 方法得到的融合图像细节信息丢失的较多;图 5e 中用简单的加权平均方法对 NSST 分解后的高低频子带图像进行融合,得到的融合图像比较模糊。图 6c 中对图像的高度信息体现的不够;图 6e 中融合图像模糊视觉感下降,通过本文中的融合算法得到的融合图像细节信息更丰富。

从客观方面比较,如表 1 和表 2(表 1 和表 2 分别为图 5 和图 6 对应的评价指标)所示。融合图像评价指标:标准差(standard deviation,SD)、信息熵(information entropy,IE)、相关系数(correlation coefficient,CORR)

Table 1 Fusion quality evaluation index of Fig. 5

	SD	IE	CORR	t/s
Fig. 5c	33.9824	6.7833	0.5909	187.1574
Fig. 5d	35.5412	6.2403	0.6188	207.4867
Fig. 5e	31.5697	6.7857	0.6903	196.5238
Fig. 5f	38.4488	6.8349	0.6153	195.8769

Table 2 Fusion quality evaluation index of Fig. 6

	SD	IE	CORR	t/s
Fig. 6c	31.6718	6.3958	0.0482	190.2547
Fig. 6d	36.9430	6.4955	0.7785	205.4863
Fig. 6e	32.9755	6.2771	0.7499	192.4576
Fig. 6f	39.6333	6.5305	0.7378	191.4786

和运行时间  $t$  都得到一定的优化。综合这几个融合评价指标可以看出,NSCT 融合算法虽然细节信息丰富,但是算法运行时间长;一般的 NSST 融合算法对源图像的细节信息提取不够;本文中的方法融合图像较清晰,图像比较柔和具有良好的视觉感,同时缩短了算法运行的时间。

## 4 结论

利用红外图像与可见光图像的信息互补和冗余,提出了基于 NSST 变换和模糊逻辑相结合的图像融合规则,充分考虑红外图像的目标信息和背景信息,最大限度地保留图像的细节信息。通过大量实验表明,此融合算法可以很好地缩短算法运行时间,能够有效地提取边缘、纹理等细节信息,目标亮度适中,并且能够表现出较好的融合性能。

## 参 考 文 献

- [1] LI J Sh, YANG W, ZHANG X M. Infrared image processing, analysis and fusion [M]. Beijing: Science Press, 2009: 174-182 (in Chinese).
- [2] ZHENG W, SUN X Q, LI Zh. Image fusion based on shearlet transform and region characteristics [J]. Laser Technology, 2015, 39(1): 50-56 (in Chinese).
- [3] FENG X, WANG X M. Fusion of infrared and visible images based on Shearlet transform [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(2): 384-390 (in Chinese).
- [4] XING X X. Research the image fusion algorithm based on non-sampled shearlet transform [D]. Changchun: Jilin University, 2014: 69-77 (in Chinese).
- [5] SHI Zh, ZHANU Zh, YUE Y G. Adaptive image fusion algorithm based on Shearlet transform [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 115-120 (in Chinese).
- [6] XIE Y H. Multi-focus image fusion by improved shearlet transform [D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 37-43 (in Chinese).
- [7] KONG W W, LEI Y J. Technique for image fusion based on NSST domain and human visual characteristics [J]. Journal of Harbin Engineer University, 2013, 34(6): 777-782 (in Chinese).
- [8] ZHANG L, LUO Ch G, ZHANG Y Y, et al. Fusion algorithm of infrared and visible images based on support value transform [J]. Laser

- Technology, 2015, 39(3):428-431 (in Chinese) .
- [9] LI G, WANG L, ZHANG R B. Infrared and visible image fusion based on feature energy [J]. Opto-Electronic Engineering, 37(3): 83-87 (in Chinese) .
- [10] CHEN M Sh, CAI Zh Sh. Study on fusion of visual and infrared images based on NSCT [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 114-119 (in Chinese) .
- [11] HUANG X Q. Infrared and visible image fusion technology based on fuzzy logic [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 39-41 (in Chinese) .
- [12] ZHANG Y K. Research on shearlet-based SAR/IR image fusion [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 28-41 (in Chinese) .
- [13] WANG L Q, AN J W. Image fusion based on nonsubsampling Contourlet transform [J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(12): 189-191 (in Chinese) .
- [14] DO M N, VETTERLI M. Contourlets: a directional multiresolution image representation [C] // International Conference on Image Processing. New York, USA: IEEE, 2002: 357-360 (in Chinese) .
- [15] EASLEYG R, LABAT E D, LIM W Q. Optimally sparse image representations using shearlets [C] // Fortieth Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers. New York, USA: IEEE, 2006: 974-978.
- [16] YUAN Y H, ZHANG J J, CHANG B K, *et al.* Objective quality evaluation of visible and infrared color fusion image [J]. Optical Engineering, 2011, 50(3): 33-45.

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©