

文章编号 1004-924X(2015)增-0623-08

多尺度域内改进模糊规则的红外与可见光图像融合

冯 鑫^{*}, 胡开群

(重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室
重庆市国际科技合作基地装备系统服役健康保障国际联合研究中心, 重庆 400067)

摘要:提出一种平移不变 Shearlet 域内改进模糊化规则的图像融合方法。首先分别对红外与可见光图像进行平移不变 Shearlet 变换获取高频和低频子带系数。然后,根据红外图像特性采用局部区域信息熵规则融合低频子带系数;针对 Shearlet 变换框架冗余特性,融合高频子带系数。为有效解决高频系数冗余信息,分别计算红外与可见光图像高频子带系数图模糊化后的隶属度、非隶属度和模糊度以及最优熵,将获取的模糊化系数图分块并分别根据黑白度获取混合图像,然后重构系数块图像并进行解模糊操作以获取融合后的高频子带系数。最后,通过平移不变 Shearlet 反变换得到最终的红外与可见光图像融合结果。实验结果表明,本方法融合结果边缘保持度超过 0.85,消除了吉布斯现象,有较好的融合效果。

关键词:红外图像;可见光图像;图像融合;平移不变 Shearlet 变换;模糊化系数图;局部区域信息熵

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0623

Fusion of infrared and visible images based on improved fuzzy rules in multi-scale domain

FENG Xin^{*}, HU Kai-qun

(Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control of Chongqing,
Chongqing International Technology Cooperation Base Equipment System Service
Health Care International Joint Research Center, Chongqing Technology and
Business University, Chongqing 400067, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: 149495263@qq.com

Abstract: On the basis of shift-invariant Shearlet domain fuzzy processing, an image fusion method with improved fuzzy rules was proposed. First of all, infrared and visible light images were processed by Shift Invariant Shearlet Transformation(SIST) to decomposed into low-pass and high-pass subbands. For low frequency subband coefficients, the rules of local area information entropy was used. For high frequency subband coefficients, the Shearlet transform frame redundancy was considered. To solve the redundant information of the high frequency subbands, the infrared and visible light image membership degree, non-belongingness degree, the hesitation degree of high-frequency sub-band fig-

收稿日期: 2015-05-28; **修订日期:** 2015-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51375517); 重庆高校创新团队资助项目(No. KJTD101313); 重庆市教委自然科学基金资助项目(No. KJ1400628); 重庆工商大学校内青年博士基金资助项目(No. 1352007); 重庆工商大学博士启动基金资助项目(No. 2014-56-07)

ure and the optimal entropy were calculated. The two coefficient images were decomposed, then the total count of blackness, whiteness of two corresponding blocks are computed. Finally, the block of the blended coefficient image was constructed and the infrared and visible light images were obtained by using the SIST. This method effectively eliminates the Gibbs phenomenon, and offers an edge keeping degree more than 0.85.

Key words: infrared image; visible light image; image fusion; shift-invariant Shearlet transform; fuzzification correlation chart; local area information Entropy

1 引 言

图像融合即是将来自于不同传感器的同一目标或同一场景的两幅甚至多幅图像进行综合,最大化利用多幅图像之间的互补信息,来提高图像的可用性、清晰度以及可识别性,从而获取更为准确、可靠、全面的同一场景目标图像描述,以便进一步利用计算机做技术处理。可见光与红外光图像的成像机理不同,前者主要根据物体的光谱反射达到成像目的,而后者是依靠物体的热辐射成像。因此,可见光通常具有丰富的背景信息,能较好地反映场景内的环境信息;相反,红外光能够较好地描述目标特性。红外与可见光图像的融合就是利用这两种图像所具有的互补信息,将可见光描述的背景信息与红外光反映的目标特征进行有机结合,以提高人机的目标识别能力以及环境释义能力^[1-4]。

红外与可见光图像具有不同的边缘特性。首先,可见光图像边缘要比红外光图像边缘陡得多,并且对应同一景物来说它们的边缘可能会存在一定程度的缺失和偏移现象;其次,红外光图像中低频成份较多,以致其相邻像素之间的相关度也相对较低,这些因素都将严重影响红外与可见光图像的融合精度。目前国内外对红外与可见光图像融合主要使用基于各种小波框架的融合方法。王珺等^[5]提出一种结合非下采样轮廓波(Non-sub-sampled Contourlet Transform, NSCT)与稀疏表示的红外与可见光图像融合方法,针对不同系数的稀疏度制定相应的融合规则,取得了比较好的融合效果;甘甜等^[6]提出一种基于分块离散余弦变换(Discrete Cosine Transformation, DCT)编码小波的图像融合方法;高颖等^[7]提出了结合区域分割和提升小波变换的红外与可见光图像融合方法,获取了较好的视觉效果和评价指标;杨杨

等^[8]提出一种基于非下采样离散 Curvelet 变换的红外与可见光图像融合方法;W Kong 等^[9]基于 NSCT 变换和色度-饱和度-强度(Intensity-Hue-Saturation, IHS)变换提出一种改进的红外与可见光融合方法;沈瑜等^[10]基于一种更为稀疏的 Tetrolet 变换进行红外与可见光图像融合,通过优化算法对各种规则融合后的稀疏系数进行恢复,以获取融合图像,从而有效减少了融合数据量;郑红等^[9]提出一种基于 Shearlet 变换的红外光与可见光图像融合方法,在主观视觉效果以及客观量化指标性能上均得到了一定提高。但是这些方法的目标和背景边缘保留效果不好,并且很可能出现伪影。

Shearlet 变换是一种由具有合成膨胀的仿射系统构成的最接近最优表示的多维函数,目前在图像滤波和图像识别等方面取得了较好的发展和应用。Shearlet 变换具有比其他多尺度框架更加简单的数学结构,同时在图像表示上具有多方向性、最优非线性、多尺度性等优点。所以,本文在平移不变剪切波变换(Shift Invariant Shearlet Transformation, SIST)的基础上提出一种改进的红外与可见光图像融合方法,在对待融合红外与可见光图像分别进行 SIST 变换获得对应的高频和低频子带系数后,主要对高频部分系数基于直觉模糊理论制定适当规则,并进行统计及融合,最后重构图像获取所需的红外与可见光融合结果。

2 本文融合方法

本文主要的融合方法流程图如图 1 所示。

所提出的红外与可见光图像融合方法的主要步骤为:

(1)对待融合的红外与可见光图像分别进行 SIST 变换,获取各自的高频系数子带和低频系数子带 c^h 与 c^l ;

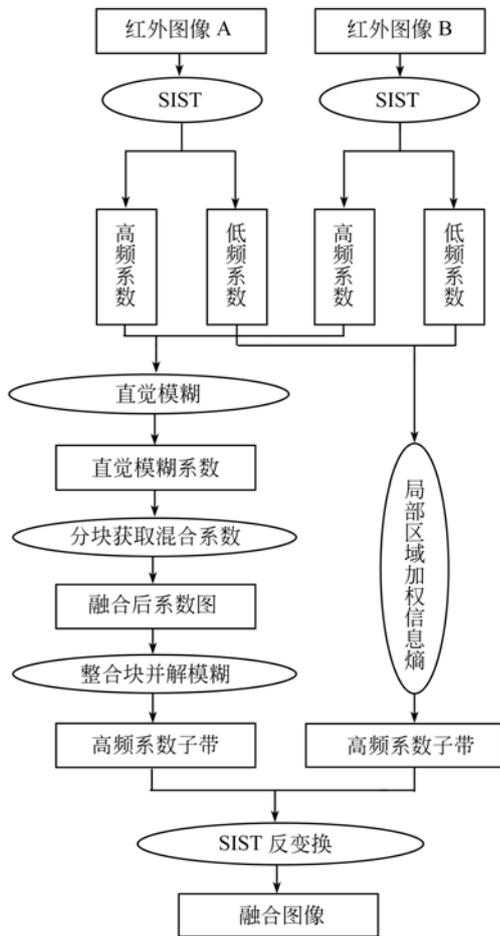


图 1 本文方法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed method

(2) 根据红外与可见光特性对低频系数子带 c^l 采用局部区域信息熵进行融合；

(3) 对高频子带系数 c^h 图像进行初始模糊化, 并通过其熵计算最优 λ 值；

(4) 通过最优 λ 值分别计算输入系数图像中的隶属度 I_{IF} 、非隶属度 μ_{IF} 以及模糊度 π_{IF} , 获取本文方法所需的模糊化系数图；

(5) 将步骤(4)所得系数图均分为 $m \times n$ (由图像大小决定) 的图像块, 并分别计算其相对应块中的黑度值与白度值；

(6) 根据对应块中黑度值与白度值制定融合系数图像块规则, 最后合并图像块获取融合后的模糊化系数图；

(7) 解模糊获得最终融合后的高频子带系数, 并进行 SIST 反变化, 得到融合后的红外与可见光图像。

2.1 平移不变 Shearlet 变换分解

SIST 变换主要分为两个部分: 多尺度分解和多方向分解。SIST 变换在多尺度分解部分采用非下采样金字塔滤波器, 所以对于图像的平移敏感度很小, 也消除了普通 Shearlet 变换时与降采样滤波器进行卷积可能导致的吉布斯现象^[10]。在方向分解过程中, 频谱面被平移不变 Shearlet 滤波器分解为一个低频子带和数个梯形高频子带, 其方向上的分解系数如图 2 所示。由于 SIST 分解过程不是本文重点, 详细的算法描述可见文献^[11]。将所得的高频子带系数与低频子带系数分解为 c^h 与 c^l 后, 可以进入下一步的融合规则制定部分。

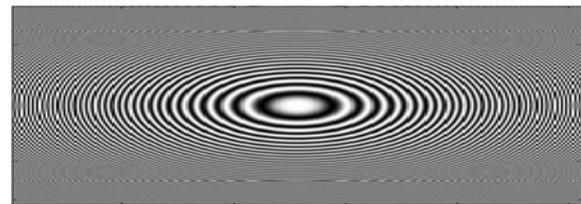
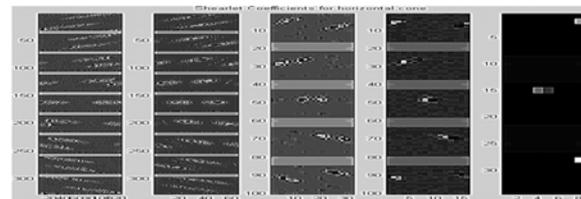
(a) 原始图像
(a) Original image(b) 水平锥面 Shearlet 系数
(b) Shearlet coefficients of level cone(c) 垂直锥面 Shearlet 系数
(c) Shearlet coefficients of vertical cone

图 2 Shearlet 方向滤波器 5 层分解系数

Fig. 2 5-layer decomposition coefficients of Shearlet directional filter

2.2 低频子带系数融合

由红外光图像性质可知红外目标表现出了较高的局部均值和相对均匀的灰度分布。而可见光图像具有丰富背景信息的区域一般具有较高的局

部区域均值,并且其图像灰度值的分布较为离散。根据以上的光学图像性质,本文基于局部区域信息熵,采用其加权平均系数作为低频子带的融合规则,具体表达式如下:

$$c_A^{\text{Fusion},l}(n_1, n_2) = \frac{c_A^l(n_1, n_2) \times \omega_A(n_1, n_2) + c_B^l(n_1, n_2) \times \omega_B(n_1, n_2)}{\omega_A(n_1, n_2) + \omega_B(n_1, n_2)}, \quad (1)$$

其中:可以定义红外光与可见光图像的加权系数 ω_A 与 ω_B 为:

$$\omega_A = \frac{\bar{m}_l^A(n_1, n_2)/(1 + \text{LAE}_l^A(n_1, n_2))}{\max_{(m,n)}(\bar{m}_l^A(n_1, n_2)/(1 + \text{LAE}_l^A(n_1, n_2)))}, \quad (2)$$

$$\omega_B = \frac{\bar{m}_l^B(n_1, n_2)/(1 + \text{LAE}_l^B(n_1, n_2))}{\max_{(m,n)}(\bar{m}_l^B(n_1, n_2)/(1 + \text{LAE}_l^B(n_1, n_2)))}, \quad (3)$$

其中: $\bar{m}_l^A(n_1, n_2)$ 与 $\bar{m}_l^B(n_1, n_2)$ 分别表示可见光图像和红外光图像低频子带系数 $c_A^l(n_1, n_2)$ 与 $c_B^l(n_1, n_2)$ 的局部区域均值, $\text{LAE}_l^A(n_1, n_2)$ 与 $\text{LAE}_l^B(n_1, n_2)$ 分别表示相应区域的局部熵。LAE 主要表示了局部区域内图像灰度分布的离散程度,如果某区域的 LAE 值较大,则表明图像该区域内灰度分布相对均匀;如果某区域的 LAE 值较小,则表明图像该区域内的离散性较大。

2.3 高频子带融合

2.3.1 直觉模糊初始化

基于模糊理论的图像融合处理主要需要构建

$$\text{ENT}(I_F; \lambda) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{2\mu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda) \nu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda) + \pi_{IF}^2(c(n_1, n_2); \lambda)}{\mu_{IF}^2(c(n_1, n_2); \lambda) + \nu_{IF}^2(c(n_1, n_2); \lambda) + \pi_{IF}^2(c(n_1, n_2); \lambda)}. \quad (10)$$

其中: λ 取最大熵值时的值,即 $\lambda_{\text{opt}} = \max_{\lambda}(\text{ENT}(IFS; \lambda))$, 根据上文中隶属度 μ_I 计算式,可以计算出 I_{IF} 的隶属度为^[15]:

$$\mu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda) = 1 - (1 - \mu_I(c(n_1, n_2)))^\lambda, \lambda \geq 0. \quad (11)$$

计算出非隶属度为:

$$\nu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda) = 1 - (1 - \mu_I(c(n_1, n_2)))^{\lambda \times (\lambda + 1)}, \lambda \geq 0. \quad (12)$$

定义模糊度为:

$$\pi_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda) =$$

隶属度、非隶属度函数。首先,初始化模糊集为:

$$F = \{(x, \mu_F(x)) \mid x \in X\}, \quad (4)$$

其中: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为有限集合,函数 $\mu_F(x): X \rightarrow [0, 1]$ 表示 x 在 X 中的隶属度;反之,非隶属度则为 $1 - \mu_F(x)$ 。模糊集 F 在 X 中的支撑定义为

$$\text{Supp}(F) = \{x \in X \mid \mu_F(x) > 0\}, \quad (5)$$

Atanassov 和 Stoeva^[12] 定义直觉模糊集 F 为:

$$F = \{(x, \mu_F(x), \nu_F(x)) \mid x \in X\}, \quad (6)$$

其中: $\mu_F(x), \nu_F(x): X \rightarrow [0, 1]$ 分别表示元素 x 在 X 中的隶属度和非隶属度。其必要条件为

$$0 \leq \mu_F(x) + \nu_F(x) \leq 1. \quad (7)$$

根据文献[13],本文引入参数 $\pi_F(x)$ 用于定义模糊度(介于隶属度和非隶属度之间),基于模糊度建立的模型为:

$$F = \{x, \mu_F(x), \nu_F(x), \pi_F(x) \mid x \in X\}, \quad (8)$$

其中: $\mu_F(x) + \nu_F(x) + \pi_F(x) = 1$ 。描述系数 c^h 与模糊后高频系数图像 I 归属性 $\mu_I(c^h)$ 的表示为:

$$\mu_I(c^h) = \frac{c^h - c_{\min}^h}{c_{\max}^h - c_{\min}^h}, \quad (9)$$

其中: c_{\max}^h 与 c_{\min}^h 分别表示系数 c^h 的在频域内灰度的最大值与最小值。高频系数图像 I 初始化到模糊域内可以将其定义为 $I_F = \{I(c^h), \mu_I(c^h)\}$ 。

2.3.2 参数计算

根据文献[14],计算出模糊域熵值为:

$$1 - \mu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda) - \nu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda). \quad (13)$$

获取最终的 I_{IF} 为:

$$I_{IF} = \{c(n_1, n_2), \mu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda), \nu_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda), \pi_{IF}(c(n_1, n_2); \lambda)\}. \quad (14)$$

2.3.3 系数融合

分别将 I_{IF}^A 与 I_{IF}^B 均分为 $m \times n$ 块(由图像尺寸决定,本文中取 16×16)。

根据能量守恒定律,频域内系数值越大则表明该系数所含能量越大,即该系数含有较大的细

节信息,而该系数在频域内表现出的灰度值也越大。

对于每一对相对图像块来说,制定以下的融合规则:

$$I_{IF}(n_1, n_2) = \begin{cases} \min\{I_{IF}^A(n_1, n_2), I_{IF}^B(n_1, n_2)\}, & \text{if } blackness > whiteness; \\ \max\{I_{IF}^A(n_1, n_2), I_{IF}^B(n_1, n_2)\}, & \text{if } blackness < whiteness; \\ \frac{I_{IF}^A(n_1, n_2) + I_{IF}^B(n_1, n_2)}{2}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

然后将分块后的 $I_{IF}(n_1, n_2)$ 进行重新组合,获取最终融合后的 $I_{IF}^{Fusion}(n_1, n_2)$ 。

2.3.4 解模糊并重构图像

采用式(16)进行解模糊操作:

$$\begin{aligned} \hat{I}(n_1, n_2) = & \\ & (c_{max}^h - g_{min}^h) \times \mu_{IF}(I_{IF}^{Fusion}(n_1, n_2)) + c_{min}^h. \end{aligned} \quad (16)$$

则获得处理后的高频 Shearlet 系数。

最后利用非下采样 Laplacian 金字塔的重构方法对融合后的高频系数分量以及低频系数分量进行重构,得到最终的融合结果。

3 试验结果

本文采用两组可见光与红外光图像进行仿真试验来验证本文融合方法的性能,并且与文献[6]中采用的离散余弦-小波变换(DCT-Wavelet)方法、文献[16]中采用的 NSCT 融合方法以及文献[9]中的 Shearlet 融合方法进行对比。其中, DWT-Wavelet 变换的融合参数同文献[6]; NSCT 变换融合参数采用文献[16]作为参数设置标准,其分解层数设置为 3,尺度分解滤波器选取“maxflat”滤波器,方向分解滤波器选取“dmaxflat”滤波器,分解级数由粗到细分别设置为 2, 3, 3; Shearlet 变换融合方法按照文献[9]中的参数进行设置,分解层数为 3。试验所用的计算机为 Windows XP 操作系统、Pentium(R) Dual-Core E5400@ 2.70 GHZ 2.69 GHZ 的 CPU、2G 内存,编程平台为 Matlab7.0.1。

第一组可见光与红外光图像的源图像选取已配准好的 Equinox faces 图像。其中,图 3(a)为可见光图像;图 3(b)为红外光图像;图 3(c)为 DCT-Wavelet 变换方法融合结果,由图 3(c)可知,基本上没有重影和块状现象,清晰度较高,说明了 DCT 变换与小波变换相结合后,捕捉边缘信息能

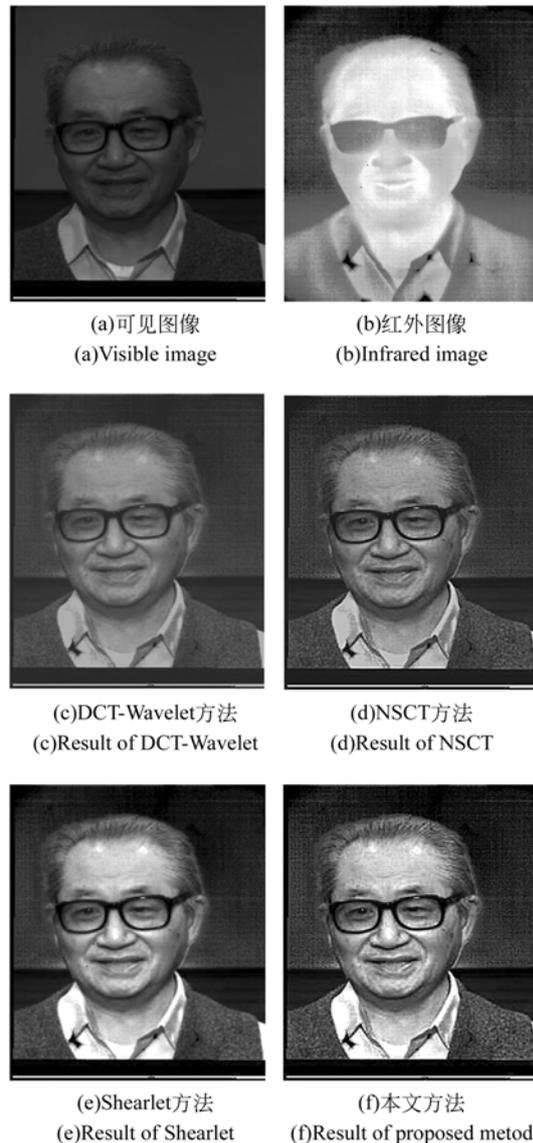


图 3 各种融合方法试验结果对比

Fig. 3 Comparison of fusion results for different methods

力比单独使用小波变换更好;图 3(d)为 NSCT 变换方法融合结果,其视觉效果比 DCT-Wavelet 变换方法稍好,细节等信息更清晰,充分反应了

NSCT 变换具有平移不变性以及多方向表示性的优势。该方法在图像融合中的应用优势是 DCT 变换和 Wavelet 变换等其他方法不能替代的;图 3(e)为 Shearlet 变换方法的融合结果,其分割区域部分内部对比度相对较高,但是分割边缘部分有少许重影和块状现象,相比 NSCT 变换方法没有什么优势;图 3(f)为本文方法融合结果,可以明显看出,其融合对比度相对最高,甚至可以捕捉到少量的边缘纹理信息,轮廓也相对更完整,相对于文献[9]单独使用 Shearlet 变换来说,很好地消除了边缘的伪吉布斯现象,而相对于文献[16]单独使用 NSCT 变换来说对比度更高。

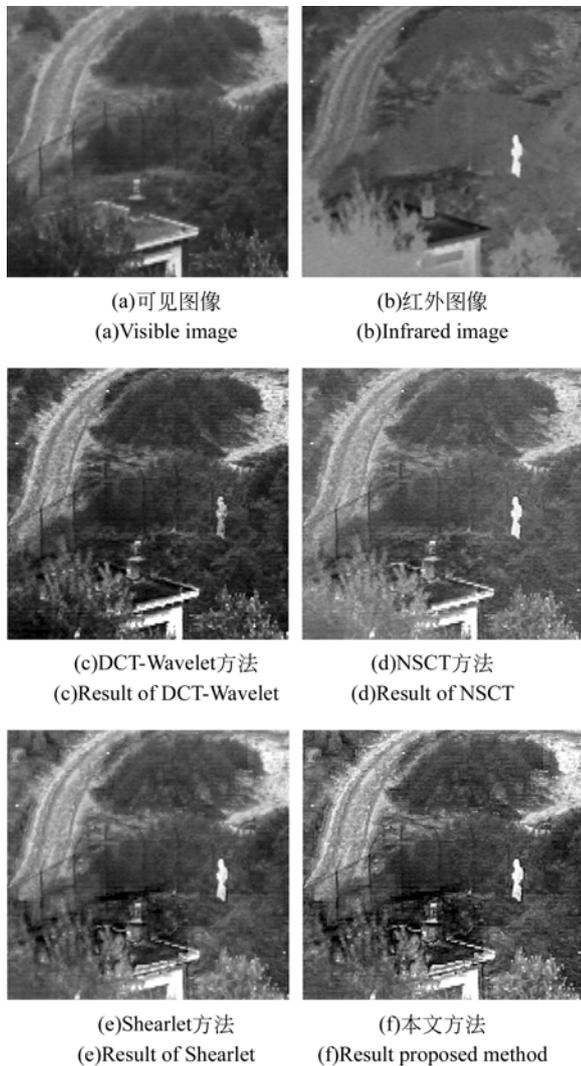


图 4 各种融合方法试验结果对比

Fig. 4 Comparison of fusion results for different fusion methods

第二组可见光与红外光图像的源图像选取配

准后的 TNO UN Camp 图像如图 4 所示。图 4 (a)为原始可见光图像,图 4(b)为原始红外光图像。通过比对 4 种融合方法结果可以发现,本文方法融合结果对比度相对最高,并同时保持了比较完整的图像边缘轮廓和纹理细节信息。

将上述 4 种方法的融合结果经过局部放大后(见图 5)可以明显看出,本文方法融合结果中的人影较为清晰,基本消除了虚影,目标细节比较明显,边缘对比度也比较高。

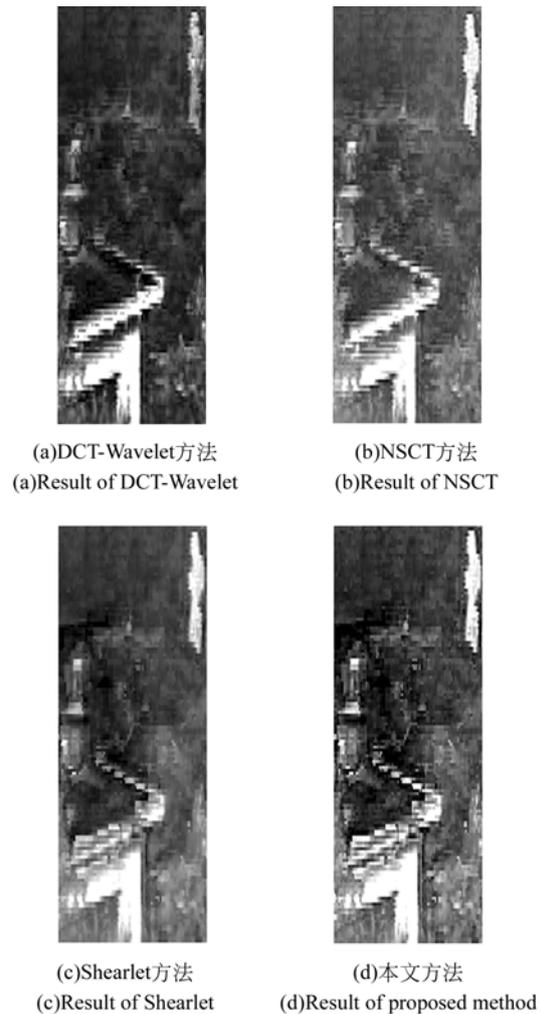


图 5 局部放大结果对比

Fig. 5 Fusion contrast of local region

为了定量评价融合结果,本文使用文献[17]中的 5 种图像评价指标进行量化比较,分别为:信息熵(IE)、平均梯度(AG)、峰值信噪比(PSNR)、边缘保持度(Q)和图像融合花费时间(T)。本文实验采用的各种融合方法在红外与可见光图像上的融合量化评价指标如表 1 所示。

表 1 融合评价指标
Tab. 1 Evaluation criterion for image fusion

图像	融合方法	IE	AG	PSNR	$Q_{AB/F}$	T/s
第一组可见与红外图像	DCT-Wavelet	6.86	7.18	36.45	0.64	19
	NSCT	7.58	7.48	38.85	0.76	401
	Shearlet	7.56	7.69	36.86	0.74	68
	本文方法	7.94	7.88	39.16	0.87	88
第二组可见与红外图像	DCT-Wavelet	5.16	5.59	24.45	0.66	28
	NSCT	6.45	6.85	30.98	0.74	485
	Shearlet	6.72	6.82	30.47	0.76	86
	本文方法	6.91	6.89	32.68	0.85	141

4 结 论

基于 SIST 变换,本文引入直觉模糊理论来进行融合规则设置,对高频部分系数采用直觉模

糊集模糊化后设置融合规则并融合,最后通过平移不变 Shearlet 反变换重构图像,从而获取所需的红外与可见光融合结果。实验结果显示,本文提出方法能够较好保持融合图像的边缘,有效克制吉布斯现象,具有一定的有效性。

参考文献:

- [1] LI H H, GUO L, LIU K. SAR and optical image fusion based on curvelet transform [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, 20(8): 1110-1113.
- [2] 刘卫,殷明,栾静,等. 基于平移不变剪切波变换的域图像融合算法[J]. *光子学报*, 2013, 429(4): 496-503.
LIU W, YIN M, LUAN J, et al.. Image fusion algorithm based on shift-invariant shearlet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 429(4): 496-503. (in Chinese)
- [3] 叶传奇,王宝树,苗启广. 一种基于区域特征的红外与可见光图像融合算法[J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1498-1503.
YE CH Q, WANG B SH, MIAO Q G. Fusion algorithm of infrared and visible images based on region feature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1498-1503. (in Chinese)
- [4] 刘哲,顾淑音,南炳炳. 一种基于块稀疏贝叶斯学习的压缩图像融合算法[J]. *光子学报*, 2013, 42(11): 1365-1369.
LIU ZH, GU SH Y, NAN B B. A compressive image fusion algorithm based on block sparse Bayesian learning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(11): 1365-1369. (in Chinese)
- [5] 王珺,彭进业,何贵青. 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.
WANG J, PENG J Y, HE G Q. Fusion method for visible and infrared images based on non-subsampled Contourlet transform and sparse representation[J]. *Acta Armamentaril*, 2013, 34(7): 815-820. (in Chinese)
- [6] 甘甜,冯少彤,聂守平. 基于分块 DCT 变换编码的小波域多幅图像融合算法[J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 114-120.
GAN T, FENG SH T, NIE SH P. Image fusion algorithm based on block DCT in wavelet domain [J]. *Acta Phys. Sin*, 2011, 60(11): 114-120. (in Chinese)
- [7] KONG W, LEI Y, LEI Y. Fusion technique for grey-scale visible light and infrared images based on non-subsampled Contourlet transform and intensity hue saturation transform [J]. *IET Signal Processing*, 2011, 5(1): 75-80.
- [8] 沈瑜,党建武,冯鑫. 基于 Tetrolet 变换的红外与可见光融合[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(6): 1506-1511.
SHEN Y, DANG J W, FENG X. Infrared and visible images fusion based on tetrolet transform[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6): 1506-1511. (in Chinese)
- [9] 郑虹,郑晨,闫秀生. 基于剪切波变换的可见光与红

- 外图像融合算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1613-1619.
- ZHENG H, ZHENG CH, YAN X SH. Visible and infrared image fusion algorithm based on shearlet transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7):1613-1619. (in Chinese)
- [10] CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The non-subsampled contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15: 3089-3101.
- [11] EASLEY G, LABATE D, LIM W Q. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, 25:25-46.
- [12] TANASSOV KT, STOEVA S. Intuitionistic fuzzy set, in: Proc. Polish Symp [J]. *Interval Fuzzy Math.*, Poznan, 1993: 23-26.
- [13] SZMIDT E, KACPRZYK J. Distance between intuitionistic fuzzy set [J]. *Fuzzy Sets Syst*, 2000, 114 (3):505-518.
- [14] VLACHOS I K, DSERGIADIS G. The role of entropy in intuitionistic fuzzy contrast enhancement [J]. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer, 2007, 4529:104-113.
- [15] CHAIRA T. A rank ordered filter for medical image edge enhancement and detection using intuitionistic fuzzy set [J]. *Appl. Soft Comput*, 2012, 12 (4):1259-1266.
- [16] 张强, 郭宝龙. 一种基于非下采样 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. Fusing of infrared and visible light images based on nonsubsampling Contourlet transform [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26 (6): 476-480. (in Chinese)
- [17] LI X, QIN SY. Efficient fusion for infrared and visible images based on compressive sensing principle [J]. *IET Image Process*, 2011, 5(2):141-147.

作者简介:



冯 鑫(1982—),男,四川人,博士,讲师,2012年于兰州理工大学获得博士学位,现为重庆工商大学机械工程学院老师,主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: 149495263@qq.com