文章编号:1001-5078(2010)09-1010-07

·图像与信号处理 ·

基于二代 curvelet 与 wavelet 变换的自适应图像融合

周爱平,梁久祯 (江南大学信息工程学院,江苏无锡 214122)

摘 要:针对同一场景红外图像与可见光图像的融合问题,提出了一种基于二代 curvelet 与 wavelet 变换的自适应图像融合算法。首先对源图像进行快速离散 curvelet 变换,得到不同尺 度与方向下的粗尺度系数和细尺度系数;根据红外图像与可见光图像的不同物理特性以及人 类视觉系统特性,对不同尺度与方向下的粗尺度系数和细尺度系数采用基于离散小波变换的 图像融合方法,在小波域中,对低频系数采用基于红外图像与可见光图像的不同物理特性的自 适应融合规则,对高频系数采用基于邻域方向对比度与局部区域匹配度相结合的自适应融合 规则,然后进行小波逆变换得到融合的 curvelet 系数;最后,进行快速离散 curvelet 逆变换得到 融合图像。实验结果表明,该方法能够更加有效、准确地提取图像中的特征,是一种有效可行 的图像融合算法。

关键词:图像融合;curvelet变换;wavelet变换;物理特性;方向对比度 **中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A

Adaptive image fusion based on the second generation curvelet and wavelet transform

ZHOU Ai-ping, LIANG Jiu-zhen

(College of Information Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: For the fusion problem of infrared and visible light images with the same scene, an adaptive image fusion algorithm based on the second generation curvelet and wavelet transform is proposed. Firstly, source images are decomposed by the fast discrete curvelet transform, thus the coarse scale and fine scale coefficients are obtained at different scales and in various directions. Secondly, according to the different physical features of infrared and visible light images and human visual system features, the coarse scale and fine scale coefficients are fused using image fusion method based on discrete wavelet transform. In wavelet domain, for the low frequency coefficients, we present an adaptive fusion rule based on the physical features of infrared and visible light images; while for the high frequency coefficients, we present an adaptive fusion rule based on the neighborhood directional contrast combined with the local area matching. Fused curvelet coefficients are obtained through the inverse wavelet transform. Finally, the fusion image is obtained through the inverse fast discrete curvelet transform. The experimental results illustrate that the proposed algorithm is effective for extracting the characteristics of the original images.

Key words: image fusion; curvelet transform; wavelet transform; physical feature; directional contrast

1 引 言

图像融合就是综合利用各成像传感器得到的不 同图像的互补信息和冗余信息,获得对该场景更为 全面、准确的图像描述。红外传感器是通过目标场 基金项目:江苏省自然科学基金项目(No. BK20080544)资助。 作者简介:周爱平(1982 -),男,硕士研究生,主要从事图像处 理,信息融合研究。E-mail:zgouaiping@126.com 收稿日期:2010-04-27;修订日期:2010-05-25 景的热辐射成像的,图像整体只反映出目标场景的 轮廓特征,细节信息不丰富,基本上不受照明条件的 影响;而可见光传感器是通过目标场景的反射成像 的,包含了场景的边缘、纹理等丰富的细节信息,但 受照明条件的影响较大^[1]。将图像融合技术应用 到红外图像与可见光图像,可以充分利用其信息的 互补性,提高探测系统的探测能力和全天候工作能 力。多源图像融合技术在一定程度上解决了单源图 像的不确定性,可以更加全面、准确地描述研究对 象,在航空、遥感、国防等领域有着重要的应用^[2]。

近年来,各种多尺度分析方法在图像融合领域 得到了广泛的应用。图像的多尺度分解和重构工具 以及融合规则是基于多尺度分析的图像融合中两个 重要的因素。其中小波变换由于良好的多尺度与时 频局域性,取得了良好的融合效果,得到了广泛的应 用^[3]。小波分析的优势在于反映信号的点奇异性, 而对二维图像的边缘等更高维的奇异性,则难以表 达其特征。于是 E. J. Candès 和 D. L. Donoho 在 1999 年提出了曲波(curvelet) 变换理论^[4], 该理论 更适用于分析信号中高维奇异性,能够有效地逼近 图像中的边缘等细节信息,将 curvelet 变换应用到 图像融合领域,可以改善融合结果的质量。但是,第 一代 curvelet 的数字实现比较复杂,需要子带分解、 平滑分块、正规化和 Ridgelet 分析等一系列步骤,而 且 curvelet 金字塔的分解也带来了巨大的数据冗余 量,因此,D.L. Donoho 等人又于 2002 年提出了实现 更简单、更便于理解的快速 curvelet 变换算法,即第 二代 curvelet^[5]。充分利用 curvelet 变换能够有效地 逼近图像边缘与 wavelet 变换更加有效地表达图像 的细节如纹理、角点^[6],因此,我们提出了二代 curvelet 与 wavelet 变换相结合的图像融合方法。

文中提出了一种基于二代 curvelet 与 wavelet 变 换的自适应像融合方法。首先分别对原始图像进行 快速离散 curvelet 变换,得到不同尺度与方向下的 粗尺度系数和细尺度系数;根据红外图像与可见光 图像的不同物理特性以及人类视觉系统特性,对粗 尺度系数和细尺度系数采用基于离散小波变换的图 像融合方法进行融合,得到融合图像的粗尺度系数 和细尺度系数;最后通过快速离散 curvelet 逆变换 得到融合结果。对图像进行融合实验,采用交叉熵、 信息熵和互信息^[7]对融合结果进行了客观评价,并 与基于二代 curvelet 变换的图像融合方法^[8]和基于 二代 curvelet 与 wavelet 变换的图像融合传统方法^[9] 进行比较,实验结果表明,该方法在主观视觉效果与 客观评价指标上均取得了较好的融合效果,是一种 有效可行的图像融合算法。

2 第二代 curvelet 变换

第二代 curvelet 是对 curvelet 的一种改进,但是 其与第一代 curvelet 在构造上已经完全不同,第一 代 curvelet 的构造思想是通过足够小的分块将曲线 近似到每个分块中的直线来看待,然后利用局部的 Ridgelet 分析特性。而第二代 curvelet 和 Ridgelet 理 论没有关系,实现过程也无需用到 Ridgelet,二者之 间的相同点仅在于紧支撑、框架等抽象的数学意义。 2.1 连续 curvelet 变换

以下定义均在二维空间 R^2 中, x 为空间位置参量, ω 为频率域参量, r, θ 为频率域下的极坐标。对所有尺度 $j \ge j_0$, 定义傅里叶频域的频率窗为:

 $U_{j}(r,\theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j}r) V(2^{\lfloor j/2 \rfloor} \theta/2\pi)$ (1) 其中, W(r) 与 $V(\theta)$ 分别为满足一定条件的径向与 角度窗口; $\lfloor j/2 \rfloor$ 表示 j/2 的整数部分。

定义母 curvelet 为 $\varphi_j(x)$ 的 Fourier 变换 $\hat{\varphi_j}(\omega) = U_j(\omega)$,则在尺度 2^{-j}上的所有 curvelet 都可由 φ_j 旋转和平移得到。引入等距的旋转角序列 $\theta_l = 2\pi \times 2^{-\lfloor j/2 \rfloor} \times l(l=0,1,\cdots,0 \le \theta_l \le 2\pi)$ 和位移参数系列 $k = (k_1,k_2) \in Z^2$,定义尺度为 2^{-j},方向角为 θ_l ,位置 为 $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^{-1}(k_1 \times 2^{-j}, k_2 \times 2^{-j/2})$ 的 curvelet 为:

$$\varphi_{j,l,k}(x) = \varphi_j \left[R_{\theta_l}(x - x_k^{j,l}) \right]$$
(2)

其中, R_{θ} 表示以 θ 为弧度的旋转矩阵。则频率域的 curvelet 变换定义为:

$$c(j,l,k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \hat{f}(\omega) \overline{\hat{\varphi}_{j,l,k}(\omega)} \, \mathrm{d}\omega$$
$$= \frac{1}{(2\pi)^2} \int \hat{f}(\omega) U_j(R_{\theta_l}\omega) \exp[\mathrm{i} \langle x_k^{j,l}, \omega \rangle] \, \mathrm{d}\omega \quad (3)$$
$$\forall \exists k_1, k_2 \in \mathbb{Z}, \notin \mathbb{X} \mathbb{H} \mathbb{R} \notin \mathrm{F} \text{ is curvelet } \mathcal{H}:$$
$$\int \varphi_{j_0,k}(x) = \varphi_{j_0}(x - 2^{-j_0}k) \qquad (4)$$

 $\hat{\varphi}_{i_0}(\omega) = 2^{-j_0} W_0(2^{-j_0} | \omega |)$

与小波理论一样,curvelet 也包括粗尺度和细尺 度下的成分。可见,粗尺度下的 curvelet 不具有方 向性,因此整个 curvelet 变换是由精细尺度下的方 向元素($\varphi_{j,l,k}(x)$)_{$j \ge j_0,l,k}和粗尺度下各向同性的小波$ ($\varphi_{j_0,k}(x)$)_k组成的。连续 curvelet 变换的频域划分 如图 1 所示。</sub>





frequency plane

2.2 离散 curvelet 变换

连续域中频率窗 U_i 将频域光滑地分成角度不同的环形,这种分割并不适合图像的二维笛卡尔坐标系,因此,采用同中心的方块区域 U_i 代替,如图 2 所示。



图 2 离散 curvelet 变换的频域分块图

Fig. 2 discrete curvelet transform tiling of the frequency plane

定义笛卡尔坐标系下的局部窗为:

$$\overline{U}_{j}(\boldsymbol{\omega}) = \widetilde{W}_{j}(\boldsymbol{\omega}) V_{j}(\boldsymbol{\omega})$$
(5)

其中:

$$\begin{cases} \widetilde{W}_{j}(\omega) = \sqrt{\Phi_{j+1}^{2}(\omega) - \Phi_{j}^{2}(\omega)} \\ V_{i}(\omega) = V(2^{\lfloor j/2 \rfloor} \omega_{2}/\omega_{1}), \ j \ge 0 \end{cases}$$

$$\tag{6}$$

 Φ 被定义为一维低通窗口的内积:

$$\Phi_j(\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2) = \phi(2^{-j}\boldsymbol{\omega}_1)\phi(2^{-j}\boldsymbol{\omega}_2)$$
(7)

引入等间隔斜率序列 $\tan \theta_l = l \times 2^{\lfloor -j/2 \rfloor}, l =$

$$2^{\lfloor -\nu/2 \rfloor}, \cdots, 2^{\lfloor -\nu/2 \rfloor} - 1, \mathfrak{M}:$$
$$U_{i,l}(\boldsymbol{\omega}) = W_i(\boldsymbol{\omega}) V_i(S_{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\omega})$$
(8)

剪切矩阵 $S_{\theta_l} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\tan\theta & 1 \end{bmatrix}$,则离散 curvelet 定

义为:

$$\widetilde{\varphi}_{j,l,k}(x) = 2^{3j/4} \widetilde{\varphi}_{j} \left[S_{\theta_{l}}^{\mathrm{T}}(x - S_{\theta_{l}}^{-\mathrm{T}}b) \right]$$
(9)

其中,b 取离散值($k_1 \times 2^{-j}, k_2 \times 2^{-j}$)。

这样离散 curvelet 变换定义为:

$$c(j,l,k) = \int \hat{f}(\omega) \,\overline{U}_j(S_{\theta_l}^{-1}\omega) \exp\left[i < S_{\theta_l}^{-^{\mathrm{T}}}b, \omega > \right] \mathrm{d}\omega$$
(10)

由于剪切的块 $S_{\theta_l}^{-T}(k_1 \times 2^{-j}, k_2 \times 2^{-j/2})$ 不是标准的矩形,因此不能运用快速傅里叶算法,可将式 (10)重新写为:

$$c(j,l,k) = \int \widehat{f}(\boldsymbol{\omega}) \,\overline{U}_j(\boldsymbol{\omega}) \exp[i < b, \boldsymbol{\omega} >] \,\mathrm{d}\boldsymbol{\omega} \quad (11)$$

此时就可以利用局部 Fourier 基变换实现。具体的实现过程参见文献[5]。

3 基于二代 curvelet 与 wavelet 变换的自适应图像 融合

curvelet 变换是一种新的图像多尺度几何分析 工具,更适于分析信号中高维奇异性,并且二代 curvelet 变换实现更简单、更便于理解,而 wavelet 变换 的优势在于分析信号中点奇异性,充分利用二者的 优势更能够有效地逼近图像中的的边缘与纹理等细 节信息。因此,我们提出了基于二代 curvelet 与 wavelet 相结合的图像融合方法。

假设待融合图像已经经过严格的配准,算法实 现可以通过以下步骤:①分别对源图像A, B进行二 代 curvelet 分解,得到不同尺度与方向下的 curvelet 系 数 { $A_{j_0}^{IR}(m,n), C_{j,l}^{IR}(m,n)$ }以 及 { $A_{j_0}^{VI}(m,n), C_{j,l}^{IR}(m,n)$ }以 及 { $A_{j_0}^{VI}(m,n), C_{j,l}^{IR}(m,n)$ }以 及 { $E_{j,l}(m,n), C_{j,l}^{IR}(m,n), C_{j$



图 3 基于二代 curvelet 与 wavelet 变换的图像融合流程图

Fig. 3 schematic diagram of the image fusion based on the second generation curvelet and wavelet transform

3.1 低频系数融合规则

图像的低频子带包含了图像的主要能量,决定 了图像的轮廓。再者,红外图像与可见光图像的成 像机理也不同,红外图像主要是根据物体的热辐射 成像,而可见光图像主要是根据物体的光谱反射成 像,从而,红外图像具有较优的目标特性,可见光图 像包含了场景的边缘等丰富的细节信息。因此,场 景中同一目标在两种图像中的灰度分布特性往往存 在较大差异,甚至表现相反的灰度信息。然而,对低 频系数采用传统的"平均法"将得不到理想的融合 结果。而图像的特征不是由单一的像素点所表征, 是由组成这一特征区域内的多个像素来表征的。因 此,我们提出了一种基于红外图像与可见光图像物 理特性的自适应低频系数融合规则。图像的空间频 率反映了图像在空间域的整体活跃程度,定义为:

$$SF = \sqrt{RF^2 + CF^2} \tag{12}$$

式中, RF 为图像的行频率; CF 为图像的列频率; 其 定义分别为:

$$RF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=2}^{N} [I(i, j) - I(i, j-1)]^{2}}$$
(13)
$$CF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=2}^{M} \sum_{j=1}^{N} [I(i, j) - I(i-1, j)]^{2}}$$
(14)

低频系数的融合规则如下:

$$A_{j_{0}}^{F}(m,n) = \omega_{1}(m,n)A_{j_{0}}^{IR}(m,n) + \omega_{2}(m,n)A_{j_{0}}^{VI}(m,n)$$
(15)

式中, $\omega_1(m,n) = \omega_{IR}(m,n) / (\omega_{IR}(m,n) + \omega_{VI}(m,n))$,

 $\omega_2(m,n) = \omega_{VI}(m,n) / (\omega_{IR}(m,n) + \omega_{VI}(m,n)), 且$ 自适应因子 $\omega_{IR}(m,n), \omega_{VI}(m,n)$ 表示红外图像与 可见光图像各自的物理特性,定义为:

$$\omega_{IR}(m,n) = \frac{\left|\mu_{IR}^{l}(m,n) - \mu_{IR}(m,n)\right| / sf_{IR}^{l}(m,n)}{\max(\left|\mu_{IR}^{l}(m,n) - \mu_{IR}(m,n)\right| / sf_{IR}^{l}(m,n))}$$
(16)

$$\omega_{VI}(m,n) = \frac{\mu_{VI}^{l}(m,n) \times sf_{VI}^{l}(m,n)}{\max(\mu_{VI}^{l}(m,n) \times sf_{VI}^{l}(m,n))}$$
(17)

式中, $\mu_{IR}^{l}(m,n)$, $\mu_{VI}^{l}(m,n)$ 分别表示红外图像与可 见光图像的低频系数取绝对值后以点(m,n)为中心 的局部均值; $f_{IR}^{l}(m,n)$, $f_{VI}^{l}(m,n)$ 分别表示红外图 像与可见光图像的低频系数取绝对值后以点(m,n) 为中心的局部空间频率; $\mu_{IR}(m,n)$ 表示红外图像低 频系数取绝对值后的整体均值。对于红外图像,如 果局部区域均值与整体均值差异越大,并且该局部 区域的空间频率越小,表明该区域为目标的可能性 也就越大,从而对融合图像的贡献也就越大;然而, 对于可见光图像,如果局部区域均值与空间频率越 大,表明该区域包含更多的背景信息,从而对融合图 像的贡献也就越大。

3.2 高频系数融合规则

通常高频系数的绝对值越大,对应图像的显著 特征,如边缘、区域边界等重要特征。因此,绝对值 取大成为普遍使用的融合规则,然而绝对值取大法 对噪声特别敏感,导致噪声误以为是有用信息,注入 到融合图像中,降低融合图像的质量。为了能够确 保更多有用的信息得以保留,减少引入错误信息,并 且根据人类视觉系统(HVS)特点,我们提出了基于 邻域方向对比度和局部区域匹配度相结合的自适应 高频系数融合规则。图像的对比度^[10]定义为:

 $R = (L - L_B)/L_B = \Delta L/L_B$ (18) 式中,L 为图像局部亮度;L_B 为图像的局部背景亮 度,对应低频分量; ΔL 是局部亮度减去局部背景得 到的局部细节,对应高频分量。在小波域中定义了 方向对比度^[11]为:

$$R_{i,j} = C_{i,j} / A_j \tag{19}$$

式中, A_j 为图像在 2ⁱ 分辨率上低频近似分量; C_{i,j}为 图像在 2ⁱ 分辨率上的 i 方向上的高频细节分量; i = 1,2,3 分别表示水平、垂直、对角方向。由于一般情 况下某一区域内的像素都具有较强的相关性,单一 像素的特征通过周围像素表现出来,如果仅对单一 像素的方向对比度进行比较,容易出现单一像素的 错误选取,因此,我们提出了邻域方向对比度定 义为:

$$R_{i,j}(m,n) = \begin{cases} \frac{|\overline{C}_{i,j}(m,n)|}{|\overline{A}_{j}(m,n)|}, \overline{A}_{j}(m,n) \neq 0\\ |\overline{C}_{i,j}(m,n)|, \overline{A}_{j}(m,n)| = 0 \end{cases}$$
(20)

式中, $\overline{C}_{i,j}(m,n)$ 为图像在 2^{j} 分辨率上的i方向上的 高频系数取绝对值后以点(m,n)为中心的均值; $\overline{A}_{j}(m,n)$ 为图像在 2^{j} 分辨率上的低频系数取绝对值 后以点(m,n)为中心的均值。

利用局部区域匹配度判断两幅图像的相关程度。在定义局部区域匹配度之前,引入局部区域能 量^[12],定义如下:

$$E_{i,j}(m,n) = \sum_{k_1 \in S} \sum_{k_2 \in T} |C_{i,j}(m+k_1, n+k_2)|^2$$
(21)

式中,*S*,*T*为局部区域的大小,一般取3×3,5×5或 7×7;*C_i*,j为图像在2^{*j*}分辨率上的*i*方向上的高频细 节分量。从而,局部区域匹配度^[13]定义为:

$$\frac{M_{i,j}^{IR,VI}(m,n) =}{2\sum_{k_1 \in S, k_2 \in T} \left| C_{i,j}^{IR}(m+k_1,n+k_2) C_{i,j}^{VI}(m+k_1,n+k_2) \right|}{E_{i,j}^{IR}(m,n) + E_{i,j}^{VI}(m,n)}$$
(22)

设定一匹配度阈值 T(通常取 0.5 ~ 1.0),如果 M^{IR,VI}_{i,j}(m,n)≤T,表明两个区域的相关性差,邻域方 向对比度较大者表示该区域内包含更加丰富的细节

信息,因此选择两个区域中邻域方向对比度较大的 区域作为融合图像的高频信息,则融合结果中相应 的高频系数为:

$$C_{i,j}^{F}(m,n) = \begin{cases} C_{i,j}^{IR}(m,n), R_{i,j}^{IR}(m,n) > R_{i,j}^{VI}(m,n) \\ C_{i,j}^{VI}(m,n), R_{i,j}^{IR}(m,n) \leqslant R_{i,j}^{VI}(m,n) \end{cases}$$
(23)

如果 *M*^{*R*,*VI*}(*m*,*n*) > *T*,表明两个区域的相关程 度高,两幅图像中都包含相当的细节信息,因此根据 邻域方向对比度大小确定自适应因子 ω:

$$\omega = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - M_{i,j}^{IR,VI}(m,n)}{1 - T}, R_{i,j}^{IR}(m,n) > R_{i,j}^{VI}(m,n) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - M_{i,j}^{IR,VI}(m,n)}{1 - T}, R_{i,j}^{IR}(m,n) \le R_{i,j}^{VI}(m,n) \end{cases}$$
(24)

则融合结果中相应的高频系数为:

$$C_{i,j}^{F} = \omega C_{i,j}^{IR} + (1 - \omega) C_{i,j}^{F}$$
(25)

4 实验结果及分析

为了验证本文算法的有效性,文中采用三种方 法对红外图像与可见光图像进行融合实验。图4 (a)和图4(b)的大小均为240×320,图4(a)为红 外图像,图4(b)为同一场景的可见光图像。图4 (c)为基于二代 curvelet 变换的图像融合方法的融 合结果,低频系数采用加权平均法,高频系数采用绝 对值取大法。图4(d)为基于二代 curvele 与 wavelet 变换的图像融合方法的融合结果,低频系数采用加 权平均法,高频系数采用绝对值取大法。图4(e)为 本文方法的融合结果,阈值 T = 0.85,窗口大小取 3×3 。

从三种方法获得的融合结果可以看出,如图 4 所示,由于原始可见光图像中局部照明较差,图像中 的人物难以辨别,但照明条件相对较好的景物等部 分的边缘细节信息却较为丰富;在红外图像中,人员 的热辐射特征十分明显,图像中的人物比较清晰,但 景物却无法表达场景中的细节信息。三种方法的融 合图像的质量均有所改善。前两种方法得到的融合 图像均较好地保持了边缘细节信息,这是由于 curvelet 更适用于分析信号中高维奇异性,能够有效地 逼近图像中的边缘等细节信息,但存在整体对比度 不高、阴影,如图 4(c)和图 4(d)中的方框区域所 示。而由于本文提出了基于不同物理特性与人类视 觉系统特性相结合的系数融合规则,显然比简单低频加权平均、高频绝对值取大的融合规则更能突出 红外图像中的目标特征和可见光图像的细节特性。 本文方法获得的融合图像效果明显优于上述两种方 法,目标特征十分明显,对比度高,边缘、纹理等细节 信息更加丰富,视觉效果最佳,如图4(e)中的方框 区域所示。





- (c)二代 curvelet 方法

(d)二代 curvelet 和 wavelet 的 传统方法



(e)本文方法 图4 测试图像及融合结果

Fig. 4 test images and fusion results

为了客观地定量评价融合效果,本文采用交叉 熵(cross entropy,CE)、信息熵(information entropy, IE)、互信息(mutual information,MI)等3项指标对 上述三种方法的融合结果进行了分析。其中交叉熵 直接反映了两幅图像对应像素的差异,是对两幅图 像所含信息的相对衡量,交叉熵越小说明图像差异 越小,融合效果越好;信息熵反映了图像中信息的丰 富程度,信息熵越大说明图像所含的信息量越多,融 合效果越好;互信息衡量融合图像从源图像中继承 信息的多少,互信息越大说明融合图像从源图像中 提取的信息越多,融合效果也越好。从表1给出的 三种融合方法的各项性能指标可看出,本文方法的 交叉熵、信息熵和互信息均优于前面二种融合方法, 基于二代 curvelet 与 wavelet 的传统方法次之,基于 二代 curvelet 的方法最差,并且与对融合结果视觉 质量的评价是一致的。

表1 不同融合方法下融合性能的比较

 Tab. 1
 comparison of performance for different

fusion methods

Fusion method	CE	IE	MI
СТ	2.2137	6.4348	2.0746
CT and WT	1.7757	6.8704	2.0847
This proposed	1.7537	7.0025	2.4276

通过对本文方法在不同窗口大小下的融合图 像视觉效果进行研究,实验结果表明,随着窗口的 变化,融合图像的视觉效果也随着变化。从图 5 给出的不同窗口下的融合图像可看出,3×3 窗口 和5×5 窗口下的融合图像视觉效果相当,7×7 窗 口的融合图像视觉效果最差。从表 2 给出的不同 窗口的融合性能比较可看出,5×5 窗口的信息熵 与互信息高于3×3 窗口,但其交叉熵高于3×3 窗 口,7×7 窗口的融合图像的客观性能指标最低,融 合图像效果最差,存在一定的模糊。然而,5×5 窗 口的计算量明显大于 3×3 窗口,综合考虑上述因 素,窗口大小取 3×3。



(a)3×3 窗口的融合图像

图像 (b)5×5 窗口的融合图像 (c)7×7 窗口的融合结果 图 5 不同窗口大小下融合图像 Fig. 5 fusion images under different window size

表2 不同窗口大小下融合性能的比较

Tab. 2	comparison of performance under different
	window size

window size	CE	IE	MI
3 × 3	1.7537	7.0025	2.4276
5 × 5	1.7743	7.0981	2.758
7 × 7	1.7868	6.8706	2.3575

5 结 论

分析了二代 curvelet 与 wavelet 变换的特点之 后,我们提出了一种基于二代 curvelet 与 wavelet 变 换的自适应图像融合算法。源图像经二代 curvelet 变换得到粗尺度系数和细尺度系数,根据红外图像 与可见光图像的物理特性以及人类视觉系统的特 性,对粗尺度系数和细尺度系数采用基于 DWT 的 融合方法进行融合,在小波域中分别讨论了低频系 数和高频系数的融合规则。针对低频子带系数的选 择,提出了基于红外图像与可见光图像的物理特性 的自适应融合方案,针对高频系数的选择,提出了基 于邻域方向对比度与局部区域匹配度相结合的自适 应融合方案。对红外图像与可见光图像进行融合实 验,结果表明该方法能够更有效、精确地保持原始图 像更多有用信息,消除虚影和抑制噪声,在视觉效果 与各项性能指标上均优于传统的二代 curvelet 方法 以及传统的 curvelet 与 wavelet 相结合方法。同时研 究了本文方法在不同窗口大小的融合效果,在主观 视觉与客观性能指标上,最佳的邻域大小为3×3。

参考文献:

- Liu Kun, Guo Lei, Li Huihui, et al. Fusion of infrared and visible light images based on region segmentation [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 75 - 80.
- Zhang Qiang, Guo Baolong. Fusion of infrared and visible light images based on nonsubsampled transform [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2007, 26(6):476-480. (in Chinese)

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.

陶观群,李大鹏,陆光华.基于小波变换的不同融合规

则的图像融合研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32 (2):173-177.

- [4] Candès E, Donoho D. Curvelets-A surprisingly effective nonadaptive representation for objectswith edges [C]//C Rabut, A Cohen, L L S chumaker. Curves and Surfaces. Nashville, TN: Vanderbilt University Press, 2000: 105 – 120.
- [5] Candès E, Demanet L, Donoho D, et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. Multiscale Modeling & Simulation, 2006,5(3):861-899.
- [6] Strack, J L, Donoho, et al. Very high quality image restoration by combining wavelets and curvelet [C]//SPIE Conf., 2001,4478:9 – 19.
- Maes F, Collignon A, Vandermeulen D, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2):187-198.
- [8] Li Huihui, Guo Lei, Liu Hang. Research on image fusion based on the second generation curvelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5):657-662. (in Chinese) 李晖晖,郭雷,刘航. 基于二代 curvelet 变换的图像融合研究[J]. 光学学报, 2006, 26(5):657-662.
- [9] S T Li, Bin Yang. Multifocus image fusion by combining curvelet and wavelet transform [J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29:1295 – 1301.
- [10] Dauphin G, Beghdadi A, Lesegno P V. A local directional bandlimited contrast[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Signal Processing and Its Applications. Paris, France: IEEE, 2003:197 – 200.
- [11] Wang Li, Lu Di, Lü Jianfei. Multi-focus image fusion scheme based on wavelet contrast [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(1):145 150. (in Chinese) 王丽, 卢迪, 吕剑飞. 一种基于小波方向对比度的多聚 焦图 像融合方法[J]. 中国图形图像学报, 2008, 13(1):145 150.
- [12] Gong Changlai. A new wavelet image fusion method based on local energy [J]. Laser and Infrared, 2008, 38(12): 1266-1269. (in Chinese) 龚昌来. 基于局部能量的小波图像融合新方法[J]. 激 光与红外, 2008, 38(12):1266-1269.
- [13] Fu Mengyin, Zhao Cheng. Fusion of infrared and visible images based on the second generation curvelet transform
 [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2009, 28(4):254 258. (in Chinese)

付梦印,赵诚. 基于二代 curvelet 变换的红外与可见光图 像融合[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(4):254-258.

 ^[3] Tao Guanqun, Li Dapeng, Lu Guanghua. Study on image fusion based on different fusion rules of wavelet transform
 [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32 (2): 173 - 177. (in Chinese)