

基于复数小波域的多聚焦图像融合

孙巍¹⁾ 王珂¹⁾ 袁国良²⁾ 王楠¹⁾

¹⁾(吉林大学通信工程学院, 长春 130025) ²⁾(上海海事大学信息工程学院, 上海 200135)

摘要 提出了一种基于 Q-shift 双树复数小波变换的图像融合方法, 该方法利用 Q-shift 双树复数小波变换对图像进行分解, 根据低、高频系数相关性的特点, 采用邻域梯度取大和“合成图像模值取大”相结合的融合方法对低、高频系数分别进行融合, 并对高频融合结果进行“一致性”校验。实验表明, 本文算法具有优于基于小波变换方法的性能。由于 Q-shift 双树复数小波近似的平移不变性和良好的方向选择性, 因此能够有效地避免空间域融合算法存在的对比度低、块效应等问题以及基于小波变换融合算法存在的“伪影”和“振铃效应”。

关键词 多聚焦图像融合 Q-shift DT-CWT 邻域梯度 模值 一致性校验

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)05-0951-07

A Multi-focus Image Fusion Algorithm in the Complex Wavelet Domain

SUN Wei¹⁾, WANG Ke¹⁾, YUAN Guo-liang²⁾, WANG Nan¹⁾

¹⁾ (School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

²⁾ (College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135)

Abstract The images are processed with Q-shift DT-CWT. The low frequency coefficients and high frequency coefficients are fused with NGMS (Neighborhood Gradient Maximum Selectivity) and SI-MVMS (Synthesis Image Module Value Maximum Selectivity) separately because of their different characteristics. For the low frequency coefficients, the ones having maximal neighborhood gradient are selected. For the high frequency coefficients, the ones having maximal absolute values are selected, and verify consistency of the fused coefficients. Experience results show that the images fused by the proposed algorithm are of better quality than that produced through the algorithms with wavelet transform. The proposed algorithm not only solves the problems such as low contrast and blocking effects caused by fusion algorithms in space domain, but also avoids the artifacts and ringing artifacts exhibited by conventional wavelet based fusion algorithms, which benefit from the approximate shift invariant and good directional selectivity of Q-shift DT-CWT.

Keywords multi-focus image fusion, Q-shift DT-CWT, neighborhood gradient, module value, consistency verification

1 引言

多聚焦图像融合方法有空间域和变换域两类。空间域融合方法主要包含平均法和分块融合法, 算法简单, 但融合图像效果不理想^[1], 平均法降低了图像的对比度, 使图像中物体的边缘、轮廓变得模糊; 分块融合法^[2]虽然提高了融合图像中各像素点之间的相关性, 但易出现块效应。这说明空间域融

合方法对图像细节的表现不足。

人类的视觉系统对事物的局部对比度变化(如边界、拐角等)十分敏感^[1], 使得基于多分辨率分析的融合方法逐步取代空间域融合方法。基于多分辨率分析的融合方法主要有基于金字塔变换的融合方法和基于小波变换的融合方法, 但金字塔变换得到的相邻层间的数据是冗余的、相关的, 且无方向性^[3]。而小波变换具有良好的时-频局部性, 非冗余性和方向性, 因此广泛应用于变换域图像融合。

融合图像的质量主要取决于多分辨率分析方法和系数融合准则。多分辨率分析方法的平移不变性和方向选择性关系到图像的细节表现力;系数融合准则的准确性直接影响融合图像的质量。

小波变换的平移变性和有限的方向选择性^[4](仅有水平、竖直和对角线 3 个方向)制约了其细节表现力。目前大多数基于小波变换的融合算法致力于系数融合准则的研究,例如李晖晖引入基于区域平均梯度和全局梯度对高频系数进行选取^[5];Burt 提出了平均与选择相结合的方法^[6];楚恒和晁锐对其进行改进,分别引入局部梯度信息和边缘信息^[8]对低频系数进行选取,高频系数的选取根据绝对值大小进行。由于小波变换在细节表现方面的不足以及融合准则难以准确地提取图像的分解系数,以上算法的融合图像易产生“伪影”和“振铃效应”。

双树复数小波^[4](dual-tree complex wavelet transform, DT-CWT)具有近似的平移不变性和良好的方向选择性(提供 $\pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ$ 6 个方向)。基于双树复数小波变换的优点,本文提出了一种基于 Q-shift 双树复数小波变换的图像融合方法。对于变换得到的低频系数,采用邻域梯度取大的方法进行融合;对于高频系数,针对传统的模

值取大的方法,并对融合得到的系数进行一致性校验。实验结果表明,本文方法能够充分利用变换系数的特点,改善融合图像的质量,取得了比空间域融合算法和基于小波变换的融合算法更好的融合效果。

2 双树复数小波变换原理

Kingsbury 根据傅里叶变换的思想提出在同一个数据上,用两个独立的小波变换平行作用来完成复数小波变换^[9],即 $\psi(t)$ 由下式计算:

$$\psi(t) = \psi_a(t) + i\psi_b(t) \quad (1)$$

式中, $\psi_a(t), \psi_b(t)$ 均是实数值小波。对于 2 维双树复数小波变换,因为有 $\psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$, 所以

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &= [\psi_a(x) + i\psi_b(x)][\psi_a(y) + i\psi_b(y)] \\ &= \psi_a(x)\psi_a(y) - \psi_b(x)\psi_b(y) + \\ &\quad i[\psi_b(x)\psi_a(y) - \psi_a(x)\psi_b(y)] \end{aligned} \quad (2)$$

如图 1 所示,双树复数小波变换包含两个平行的小波树,即树 a 和树 b 两个分支,其中,树 a 的叠加滤波器组表示复数小波变换的实部,树 b 的叠加滤波器组表示复数小波变换的虚部, $\downarrow 2$ 表示隔点取样。其中实数滤波器 $H_{\dots 0a}(n), H_{\dots 1a}(n)$ 代表了一个共轭正交滤波器对, $H_{\dots 0b}(n), H_{\dots 1b}(n)$ 代表了一个共轭积分滤波器对。

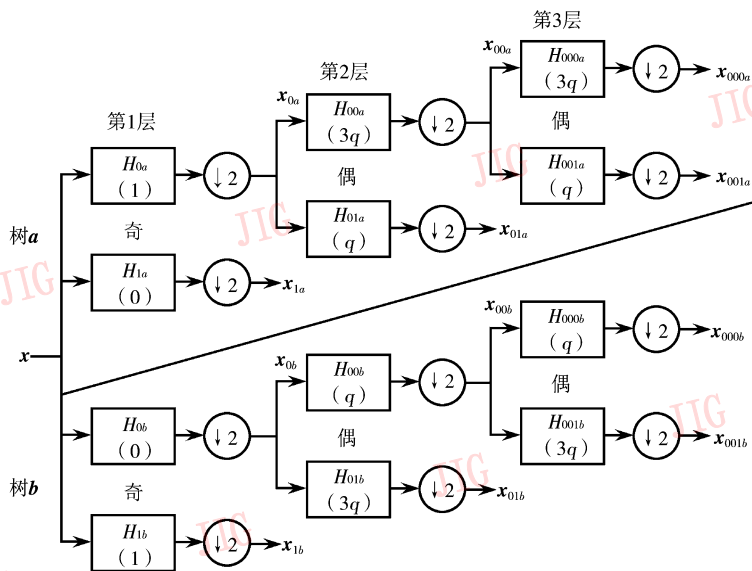


图 1 1 维 Q-Shift 双树复数小波变换示意图

Fig. 1 Q-Shift Dual-Tree Complex Wavelet Transform

在第 1 层分解时,两棵树使用奇数长度的滤波器,并且两棵树分别对信号的奇数采样位置和偶数

采样位置进行滤波(例如 H_{0a} 和 H_{1b} 对奇数采样位置滤波, H_{1a} 和 H_{0b} 对偶数采样位置滤波),这种结构使

得变换等价于不进行下采样的离散小波变换(如小波框架)。在进行高层分解(包括第2层)时,为了保证两棵树输出的所有样值序列都具有一个采样间隔(所有这些样值都来自于两棵树的第1层原始输入),一棵树中的滤波器与另一棵树中的滤波器之间必须保持相对于各自采样速率的半个采样间隔的差距。对于线性相位滤波器而言,这就要求一棵树中的滤波器应当为奇数长,而另一棵树中的滤波器为偶数长。如果在每棵树的不同层次间交替采用奇偶滤波器,那么这两棵树将会呈现良好的对称性。

但是,对高层分解采用奇数长度和偶数长度滤波器交替滤波的方法存在以下几个问题:

- (1) 下采样结构不对称。
- (2) 两棵树的频率响应有轻微的不同。
- (3) 滤波器组必须双正交,因为它们是具有线性相位。

为了克服 DT-CWT 的高层分解滤波器存在的问题,Kingsbury 对原始双树复数小波变换进行了改进,提出了 Q-Shift 双树复数小波变换,1 维信号的 Q-Shift 双树复数小波分解如图 1 所示^[10]。

第 1 层分解与 DT-CWT 相同。在进行高层分解(包括第 2 层)时,交替地使用群延迟近似 1/4 采样(Quarter Sample Shift,图 1 中用 q 表示)的滤波器组,所以称之为 Q-Shift 双树复数小波。高层使用的所有滤波器都是由同一个正交原型序列派生得到的。

3 融合准则

变换系数的选择应根据变换系数的特点进行。低频系数反映图像的轮廓信息,对应图像频率的“慢变”部分,像素间的相关性高,考虑采用基于窗口的融合方法;高频系数反映图像的细节信息,对应图像频率的“快变”部分,像素间的相关性低,考虑采用基于像素的融合方法。

3.1 低频系数融合准则

基于窗口的融合方法主要包括区域特征值取大法和区域特征值加权法。加权法反映了“折衷”的思想,即通过降低清晰区域的图像质量来提高模糊区域的图像质量。但多聚焦图像满足对于图像中的任一区域,都可以在某一待融合图像中找到它的清晰图像,如果可以用其对应的清晰图像作为该区域的融合图像,就可以在保证清晰区域图像质量的基础上,提高模糊区域的图像质量,从而提高整幅融合

图像的质量。在融合时,选取的低频融合准则应具备以下条件:(1)反映图像清晰度;(2)保证选取的像素点尽可能多地来自图像的清晰区域。

NGMS (neighborhood gradient maximum selectivity) 较模值取大算法能够更加准确地提取清晰图像的低频系数。本文使用图像的邻域梯度作为低频系数的特征因子,选取邻域梯度大的系数为融合图像低频系数。邻域梯度的定义如下:

$$G_i(m, n) = \sum_{m', n' \in S} H(m', n') L_i(m + m', n + n') \quad (3)$$

其中, $i = A$ 或 B (A, B 为待融合图像), $L_i(m, n)$ 为 i 图像经分解得到的低频子图像在 (m, n) 点的系数, S 为代表窗口区域, H 为窗口区域的掩模,为了充分反映图像的边缘信息,掩模采用大小为 3×3 的拉普拉斯算子

$$H = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 高频系数融合准则

由光学系统成像原理可知,清晰图像的高频系数远大于模糊图像的高频系数,考虑采用模值取大的融合准则对高频系数进行融合。具体的融合准则如下:

$$L_{f,i}^j(m, n) = \begin{cases} L_{A,i}^j(m, n) & |L_{A,i}^j(m, n)| \geq |L_{B,i}^j(m, n)| \\ L_{B,i}^j(m, n) & |L_{A,i}^j(m, n)| < |L_{B,i}^j(m, n)| \end{cases} \quad (5)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, N$ 代表分解的层数, $i = 1, 2, \dots, 6$ 代表每一层高频系数的 6 个方向。

但是模值取大的融合准则存在以下两方面的问题:(1)融合图像同一层各高频子带中的对应像素点的系数来自于不同的图像;(2)融合图像同一层高频子带中对应像素点的系数与其邻近像素点的系数来自于不同的图像。

然而,某一区域的高频系数应取自清晰图像,因此问题 1 将会造成融合图像中清晰图像对应的高频信息的损失。针对这个问题,提出合成图像(synthesis image)的概念。

合成图像:对于图像分解得到的高频子图像,将同一层的所有高频子图像相加得到一个图像,称为该层高频子图像的合成图像。根据合成图像中某一像素点系数的模值确定该层所有子带对应像素点系数的选取,就可以保证其选自同一清晰源图像。

问题 2 会降低融合图像整体效果。如果对融合系数进行一致性修正,就可以保证每个区域的高频系数选自同一清晰源图像。

根据以上分析,提出了一种合成图像模值取大(SI-MVMS, synthesis image module value maximum selectivity)方法,具体的融合步骤如下:

(1) 求取合成图像,即同一层 6 个高频方向子带的绝对值和。

$$p_i^j(m, n) = \sum_{l=1}^6 |S_{i,l}^j(m, n)| \quad (6)$$

式中, $i=A$ 或 B 代表源图像, $j=1, 2, \dots, N$ 代表分解的层数, $l=1, 2, \dots, 6$ 代表每一层高频系数的 6 个方向子带。

(2) 根据合成图像的系数 $p_i^j(m, n)$ 确定加权因子 $w_A^j(m, n)$, 得到加权因子分布图。

$$w_A^j(m, n) = \begin{cases} 1 & p_A^j(m, n) \geq p_B^j(m, n) \\ 0 & p_A^j(m, n) \leq p_B^j(m, n) \end{cases} \quad (7)$$

(3) 对加权因子分布图进行一致性校验,即图中每一像素点的加权因子应与其周围“多数”加权

因子的取值保持一致。

(4) 根据校验后的加权因子 $\bar{w}_A^j(m, n)$ 得到融合高频系数

$$F_l^j = \bar{w}_A^j(m, n) \times S_{A,l}^j(m, n) + \bar{w}_B^j(m, n) \times S_{B,l}^j(m, n) \quad (8)$$

$$\bar{w}_B^j(m, n) = 1 - \bar{w}_A^j(m, n) \quad (9)$$

4 仿真实验与结果分析

4.1 验证 NGMS 的准确性

为了说明 NGMS 相对于基于像素的融合准则以及基于其他邻域特征(如方差)融合准则的优越性,进行以下 3 组实验:分别对清晰的 Lena, barbara 图像进行不同程度的高斯模糊化, Lena 图像序列如图 2 所示,大小为 512×512 pixel。图中最左面为清晰图像,采用半径为 10 pixel,尺寸分别为 8×8 pixel, 16×16 pixel, 32×32 pixel, 64×64 pixel 的高斯低通滤波器对其滤波,得到从左至右模糊程度依次加深的一组图像。



图 2 模糊处理的 Lena 图像序列

Fig. 2 The serial of blurred image Lena

对 5 幅图像分别进行 Q-shift DT-CWT 分解,提取各自的低频子图像。记清晰图像的低频子图像为图像 0,模糊图像的低频子图像为图像 i , $i=1, 2, 3, 4$ 。对于图像 0 和某一幅图像 i 构成的图像组,分别采用绝对值取大准则、邻域方差取大准则和邻域梯

度取大准则进行系数选取,每一像素点的准确性 $c_{0i}(m, n)$ 由下式得到:

$$c_{0i}(m, n) = \begin{cases} 1 & L_{0i}(m, n) = L_0(m, n) \\ 0 & L_{0i}(m, n) = L_i(m, n) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $L_{0i}(m, n)$, $L_0(m, n)$, $L_i(m, n)$ 分别代表融合

图像、清晰图像、模糊图像在 (m, n) 的系数。

每一组图像的选取准确性 C_{oi} 如下:

$$C_{oi} = \frac{\sum_{m=1}^{256} \sum_{n=1}^{256} c_{oi}(m, n)}{256 \times 256} \quad (11)$$

每种选取准则的准确性为使用该准则得到的 4 组图像准确性 C_{oi} 的算术平方和。仿真实验结果如表 1 所示,可看出邻域梯度取大准则的准确性比绝对值取大准则提高了 30% 左右,比邻域方差取大准则高 3.8% ~ 5%。

表 1 低频系数融合准则的准确性

Tab. 1 The accuracy of NGMS scheme

	单位: %		
	绝对值取大 准则	邻域方差取大 准则	邻域梯度取大 准则
Lena 图像	51.94	77.95	81.78
barbara 图像	53.41	79.27	82.27

4.2 clock 图像融合仿真实验

采用 Q-Shift 双树复数小波对图像进行分解,分解层数为 3 层,第 1 层变换采用近似对称的 (13, 19) 抽头滤波器,高层变换采用 Q-shift (14, 14) 抽头滤波器。分别采用平均法、文献[2]、[7]、[8]的算法以及本文算法对图 3 所示的“clock”多聚焦图像进行融合,图像大小为 512×512 pixel。各

算法的融合图像如图 4 所示。其中,文献[2]将图像分为尺寸相同的子块,根据相应位置上子块的均匀度参数选取子块,融合实验中子块大小为 32×32 pixel,加权因子中参数 $\alpha = 0.6$, 阈值 $TH = 5 \times 10^{-6}$ 。文献[7]、[8]为基于小波变换的融合算法,分别引入局部梯度信息和边缘信息对低频系数进行选取,高频系数根据绝对值大小进行选取。由于存在标准图像,采用均方根误差 RMSE (root mean square error) 对融合图像的质量进行评价,定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [R(x, y) - F(x, y)]^2}{M \times N}} \quad (12)$$

式中, $R(x, y)$ 为标准图像, $F(x, y)$ 为融合图像, M, N 分别为图像的行数和列数。RMSE 越小,说明融合图像越接近标准图像,融合效果越好。各算法性能指标如表 2 所示。

由表 2 可知,平均法的 RMSE 最高,融合效果最差。文献[2]中分块融合算法融合效果优于文献[7]、[8]中基于 DWT (discrete wavelet transform) 的算法,体现出分块算法在直接提取源图像清晰信息上的优势。本文算法的 RMSE 最低,说明本文算法融合图像最接近标准图像,不但优于文献[7]、[8]中基于小波变换的融合结果,而且



图 3 Clock 图像各种算法融合结果

Fig. 3 The fused images for clock

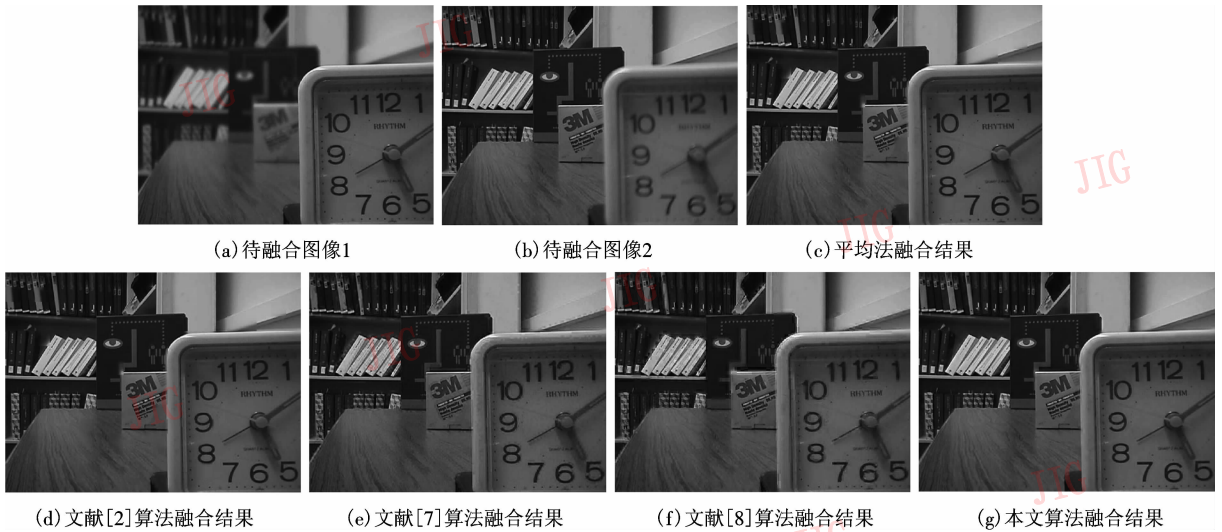


图 4 Disk 图像各种算法融合结果

Fig. 4 The fused images for disk

比文献[2]中分块融合算法更能保留源图像清晰区域的信息。

表 2 clock 图像融合结果性能表

Tab. 2 The RMSE of fusion algorithms

融合算法	平均法	文献[2]算法	文献[7]算法	文献[8]算法	本文算法
RMSE	5.073 4	1.028 4	4.131	3.009 7	0.555 7

4.3 disk 图像融合仿真实验

采用平均法、文献[2]、[7]、[8]的算法和本文算法对图4(a)、(b)所示的 disk 多聚焦图像进行融合,图像大小为 640×480 pixels。各算法的融合图像如图4所示。文献[2]融合实验中子块大小为 60×40 pixel,加权因子中参数 $\alpha = 1$,阈值 $TH = 1 \times 10^{-5}$ 。由于没有标准图像,采用 Piella 提出的加权融合质量指标 WFQI (weighted fusion quality index) 和边缘融合质量指标 EFQI (edge dependent fusion quality index) 作为融合图像的客观评价指标^[11]。WFQI 定义如下:

$$Q_w(A, B, F) = \sum_{\omega \in \Omega} c(\omega) (\rho_A(\omega) \cdot Q_0(A, F | \omega) + (1 - \rho_A(\omega)) \cdot Q_0(B, F | \omega)) \quad (13)$$

$$c(\omega) = C(\omega) / (\sum_{\omega' \in \Omega} C(\omega')) \quad (14)$$

$$C(\omega) = \max(\eta(A | \omega), \eta(B | \omega)) \quad (15)$$

$$\rho_A(\omega) = \eta(A | \omega) / (\eta(A | \omega) + \eta(B | \omega)) \quad (16)$$

式中, $\eta(A | \omega)$ 代表为源图像 A 在窗口 ω 内的某种特征(如方差,能量等), Ω 代表所有窗口的总和, Q_0 为总体质量指标^[11], EFQI 定义如下:

$$Q_E(A, B, F) = Q_w(A, B, F)^{1-\alpha} \cdot Q_w(A', B', F')^\alpha \quad (17)$$

式中, A', B', F' 分别为源图像 A, B 及融合图像 F 的边缘图像,参数 $\alpha \in [0, 1]$,体现了边缘图像的性能在指标中所占的比重,本文 $\alpha = 0.5$ 各算法性能指标如表3所示。

表 3 disk 融合结果性能表

Tab. 3 The WFQI and EFQI of fusion algorithms

融合算法	平均法	文献[2]算法	文献[7]算法	文献[8]算法	本文算法
WFQI	0.900 76	0.904 15	0.968 64	0.950 92	0.975 66
EFQI	0.834 47	0.917 47	0.968 74	0.940 03	0.978 72

对于 disk 图像,本文算法融合图像的 WFQI 和 EFQI 最接近 1,说明与其他方法相比,本文算法能够更准确地提取源图像的清晰区域信息。文献[7]、[8]基于小波变换的算法的 WFQI 优于文献[2]基于分块的算法,这是因为基于小波变换的方法能够更好地提取图像的边缘信息。此外,文献[2]融合图像(图4(d))在白色图书边缘和钟表边缘存在明显的块效应,表明分块算法在细节表现力上存在不足,这正是分块算法的最大缺点。由图4(e)、(f)可以看到,在图像左侧白色图书边缘出现了“伪影”,右侧钟表边缘存在“振铃效应”,这是因

为小波变换有限的方向选择性降低了其细节表现力,此外,文献[7]、[8]算法的高频系数融合准则采用模值取大,造成高频系数选取不准确,从而降低了融合图像的质量。本文算法凭借Q-shift DT-CWT良好的细节表现能力及系数融合准则的准确性,改善了融合图像的质量。同 clock 图像融合实验一样,融合结果不但优于文献[7]、[8]中基于小波变换的融合结果,而且比文献[2]中分块融合算法更能保留源图像清晰区域的信息。

5 结 论

本文提出了一种基于 Q-shift DT-CWT 的图像融合方法,该方法用 Q-shift DT-CWT 对图像进行多分辨率分解,并根据低、高频系数的不同特点分别采用 NGMS 和 SI-MVMS 融合准则进行融合。实验结果表明,Q-shift DT-CWT 在提取图像边缘细节方面好于小波变换,这主要得益于其良好的方向选择性和平移不变性。本文方法很好地避免了基于小波变换融合算法造成的“伪影”和“振铃效应”。此外,本文提出的系数融合准则能够有效地保留图像的轮廓信息和高频信息,该准则同样适合于基于小波变换的图像融合方法。

参考文献 (References)

- 1 Hill P, Canagarajah N, Bull D. Image fusion using complex wavelets [A]. In: Proceeding of the 13th British Machine Vision Association [C], Welsh, UK, Cardiff, 2002: 487 ~ 496.
- 2 Li Shu-tao, Wang Yao-nan, Zhang Chang-fan. Feature of human vision system based multi-focus image fusion [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1699 ~ 1701. [李树涛,王耀南,张昌凡. 基

- 于视觉特性的多聚焦图像融合 [J], 电子学报, 2001, 29(12): 1699 ~ 1701.]
- 3 Akerman A. Pyramid techniques for multisensor fusion [A]. In: Proceedings of SPIE [C], Boston, 1992, 1828: 124 ~ 131.
- 4 Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(6): 124 ~ 152.
- 5 LI Hui-hui, Guo Lei, Liu Hang. Research on image fusion using wavelet transform based on gradient selective rule [J]. Computer Engineering and Application, 2005, 12: 76 ~ 78. [李晖晖, 郭雷, 刘航. 基于梯度选取规则的小波变换在图像融合中的研究 [J], 计算机工程与应用, 2005, 12: 76 ~ 78.]
- 6 Burt P J, Kolczynski R J. Enhanced image capture through fusion [A]. In: Proceedings 4th International Conference on Computer Vision [C], Berlin, Germany, 1993: 173 ~ 182.
- 7 Chu Heng, Li Jie, Zhu Wei-le. Multi-focus image fusion scheme with wavelet transform [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(8): 59 ~ 63. [楚恒, 李杰, 朱维乐. 一种基于小波变换的多聚焦图像融合方法 [J], 光电工程, 2005, 32(8): 59 ~ 63.]
- 8 Chao Rui, Zhang Ke, Li Yan-jun. An image fusion algorithm using wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(5): 750 ~ 753. [晁锐, 张科, 李言俊. 一种基于小波变换的图像融合算法 [J], 电子学报, 2004, 32(5): 750 ~ 753.]
- 9 Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters [A]. In: Proceedings of 8th IEEE Digital Signal Processing Workshop [C]. Bryce Canyon, Utah, USA, 1998: 86 ~ 89.
- 10 Kingsbury N G. Design of q-shift complex wavelets for image processing using frequency domain energy minimization [A]. In: International Conference on Image Processing [C], Barcelona, 2003: 1013 ~ 1016.
- 11 Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion [A]. In: Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing [C]. Barcelona, Spain, 2003: 173 ~ 176.