

文章编号:1002-2082(2016)02-0221-08

基于改进对比度的有限离散剪切波图像融合

陈清江,张彦博,柴昱洲,魏冰蔗

(西安建筑科技大学 理学院,陕西 西安 710055)

摘 要:为了提高多聚焦图像的融合精度,结合有限离散剪切波变换(FDST)良好的局部化特性及平移不变性,提出了一种基于有限离散剪切波变换与改进对比度相结合的图像融合新算法。对经过严格配准后的多聚焦图像进行 FDST 分解,得到低频子带系数和不同尺度不同方向的高频子带系数;对低频子带系数采用区域平均能量匹配度自适应融合算法,高频子带系数的选取则根据低频与高频系数关联得到的对比度进行融合;应用有限离散剪切波逆变换重构得到融合图像,并对融合结果进行主观视觉和客观评价。通过仿真实验,算法在主观视觉效果上有着明显的优越性。在不同融合算法比较的融合结果中,熵值、互信息量和边缘相似度分别平均提高了 1.4%、34.6%和 8.0%,各项客观评价指标优于其他算法。

关键词:有限离散剪切波;对比度;区域能量;平移不变性;图像融合

中图分类号:TN911.73;TP391.4

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0102004

Image fusion based on improved contrast in finite discrete shearlet domain

Chen Qingjiang, Zhang Yanbo, Chai Yuzhou, Wei Bingzhe

(School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of multi-focus image fusion, combining with good localization and shift invariance of finite discrete shearlet transform(FDST), a new image fusion algorithm based on FDST and improved contrast was proposed. Firstly, the registration multi-focus images were decomposed by FDST, and the low frequency sub-band coefficients and high frequency sub-band coefficients of different scales and directions were obtained. The fusion principle of low frequency sub-band coefficients was based on the method of regional average energy matching degree. As for high frequency sub-band coefficients, the sum of contrast was adopted as the fusion rule, which combined the low-frequency coefficients with the high-frequency coefficients. Finally, low frequency information and high frequency information were reconstructed to image by finite discrete shearlet inverse transform, and both subjective visual evaluation and objective performance assessments of the fusion results were implemented. Simulation results indicate that the proposed algorithm is obviously superior on subjective visual effects. The values of entropy, mutual information quantity and edge similarity increase averagely by 1.4%, 3.4% and 0.8%, respectively, compared with other fusion algorithms. It is superior to other fusion algorithms on objective evaluation.

Key words: finite discrete shearlet transform; contrast; region energy; shift-invariant; image fusion

收稿日期:2015-08-11; 修回日期:2015-10-11

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2015JM1024, 2013JK0568)

作者简介:陈清江(1966—),男,河南信阳人,博士,教授,主要从事小波分析,图像处理与信号处理研究。

E-mail: qjchen66xytu@126.com

通信作者:张彦博(1989—),男,硕士研究生,主要从事小波分析在图像处理中的应用。E-mail:412248486@qq.com

引言

图像融合是将来自多个传感器对同一场景的图像数据,经过相应的融合算法组合成一幅图像的过程,从而有效地将各个源图像的优点结合起来,有利于更好地分析和提取图像信息^[1]。这种技术已广泛应用于医学、机器视觉、遥感等领域。

多尺度融合方法首先将源图像进行分解,得到不同层次不同分量的系数,其次选取合适的融合规则,对各系数进行运算选取,最后将处理后的系数进行逆变换得到重构图像。因此,一个好的融合方法不仅依赖于变换而且依赖于融合规则,它们直接影响融合后图像的质量。小波变换^[2-3]具有多分辨分析的特点,在时域和频域上都有表征信号局部特征的能力。对于图像信号,可以较好地表示图像细节信息,因而,运用小波变换进行的图像融合方法可以取得较好的效果。然而,传统的小波变换是由一维张量积小波形成,并不能很好地表示图像的线奇异性,由于张量积生成的小波只能捕捉水平、垂直和对角 3 个方向的信息,为了解决这一问题,人们先后提出了 Ridgelet、Curvelet 和 Contourlet 变换^[4],它们具有良好的各向异性及方向选择性,可以更稀疏地表达图像的边缘及轮廓信息,但上述变换在进行分解时采用了下采样过程,从而导致移变性,出现了频谱混叠现象,使融合后的图像容易引入虚假信息。为了克服这种现象, A. L. Cunha^[5]等人提出了具有平移不变性的非抽样轮廓波变换(non-subsample contourlet transform, NSCT),它除了更好地表示图像边缘信息外,同时具备了平移不变性,在图像融合中取得了较好的视觉效果;但其缺点是计算复杂度较高且分解的方向数有限,为此, S. Höuser and G. Steidl^[6]证明并构造了有限维欧式空间中 parseval 框架的离散剪切波,简称有限离散剪切波(FDST),它不仅具有 contourlet 及 shearlet 的良好特性,同时满足平移不变性,并且由于 FDST 在分解、重构过程中采用快速 Fourier 变换算法,因此也具备了较好的运算效率。

通常,基于多尺度变换的融合策略中,低频子带是对原图像的近似,包含了大量的基本信息,多采用加权平均的方法,权值是通过源图像中局部特征(均值、方差等)计算所得;高频子带多采用区域窗口的显著特征计算其加权系数^[7-9],然而上述方法在融合过程中容易受噪声干扰,导致融合后

的图像出现边缘模糊的现象。

由于低频子带包含了图像的主要信息,这里不选用加权平均法,考虑到低频系数在源图像中所占能量比例较大及像素间的相关性,采用加权区域平均能量匹配测度进行低频子带的融合,该方法既体现了源图像的相关性,又保留了其有用信息。为有效地改善包括边缘纹理等信息的高频子带融合效果,受文献^[10]启发,将高频方向子带与低频分量联系起来,采用改进的对比度作为高频系数的融合标准。实验结果表明,该融合策略能够较好地保留多幅图像的共同特征及边缘轮廓信息,融合效果优于其他算法。

1 有限离散剪切波变换

1.1 剪切波变化基本知识

设 A_a 是抛物型尺度矩阵, S_s 是剪切矩阵,其定义为

$$A_a = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{bmatrix}, S_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $a \in R^+$; $s \in R$ 。

$\forall \psi \in L^2(R^2)$, 连续剪切波函数 $\psi_{a,s,t}$ 表示对 ψ 进行膨胀、剪切及平移,得到:

$$\psi_{a,s,t}(x) = a^{-\frac{3}{4}} \psi(A_a^{-1} S_s^{-1}(x-t)) \quad (2)$$

对上式进行二维傅里叶变换可得:

$$\hat{\psi}_{a,s,t}(\omega) = a^{\frac{3}{4}} e^{-2\pi i \langle \omega, t \rangle} \hat{\psi}(a\omega_1, \sqrt{a}(s\omega_1 + \omega_2)) \quad (3)$$

$\forall f \in L^2(R^2)$, 其连续剪切波变换及对应 parseval 等式表示为

$$SH_\psi(f)(a, s, t) = \langle f, \psi_{a,s,t} \rangle = \langle \hat{f}, \hat{\psi}_{a,s,t} \rangle \quad (4)$$

定义小波函数 $\phi_1, R \rightarrow R$; 冲击函数 $\phi_2, R \rightarrow R$, 则有:

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_1(\omega_1) &= \sqrt{b^2(2\omega_1) + b^2(\omega_1)} \\ \hat{\phi}_2(\omega_2) &= \begin{cases} \sqrt{v(1+\omega_2)} & \omega_2 \leq 0 \\ \sqrt{v(1-\omega_2)} & \omega_2 > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

$$v(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 35x^4 - 84x^5 + 70x^6 - 20x^7 & 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & x > 1 \end{cases}$$

$$b(x) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi}{2}v(|x|-1)\right) & 1 \leq |x| \leq 2 \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{1}{2}|x|-1\right)\right) & 2 < |x| \leq 4 \\ 1 & \text{其他} \end{cases}$$

令 $\hat{\psi}(\omega) = \hat{\psi}_1(\omega_1)\hat{\psi}_2\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)$, 则 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足容许性条件, 对 ω_1, ω_2 取不同的值, 将频域平面分成不同的区域(如图 1), 水平锥面和垂直锥面, 定义为

$$C^h = \left\{ (\omega_1, \omega_2) \in R^2 : |\omega_1| \geq \frac{1}{2}, |\omega_2| < |\omega_1| \right\} \quad (6)$$

$$C^v = \left\{ (\omega_1, \omega_2) \in R^2 : |\omega_2| \geq \frac{1}{2}, |\omega_2| < |\omega_1| \right\} \quad (7)$$

锥面交叉线及低频部分定义为

$$C^\times = \left\{ (\omega_1, \omega_2) \in R^2 : |\omega_1| \geq \frac{1}{2}, |\omega_2| \geq \frac{1}{2}, |\omega_2| = |\omega_1| \right\} \quad (8)$$

$$C^0 = \{ (\omega_1, \omega_2) \in R^2 : |\omega_1| < 1, |\omega_2| < 1 \} \quad (9)$$

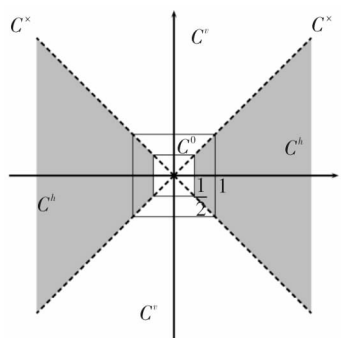


图 1 不同区域的频域平面

Fig. 1 Frequency domain plane in different regions

其重叠区域 $C^v = (-1, 1)^2 / (-\frac{1}{2}, \frac{1}{2})^2$, 定义特征函数 $\chi_{C^\tau}, \tau \in \{h, v, x\}$ 。

$$\chi_{C^\tau} = \begin{cases} 1 & \omega \in C^\tau \\ 0 & \omega \notin C^\tau \end{cases} \quad (10)$$

由此可构造锥面 C^h, C^v, C^\times 上的剪切波:

$$\hat{\psi}^\tau(\omega_1, \omega_2) = \begin{cases} \hat{\psi}_1(\omega_1)\hat{\psi}_2\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)\chi_{C^\tau} & \tau = h, \times \\ \hat{\psi}_1(\omega_2)\hat{\psi}_2\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\chi_{C^\tau} & \tau = v \end{cases} \quad (11)$$

对于低频部分上的剪切波, 先使用加细函数 ϕ :

$$\hat{\phi}(\omega_1, \omega_2) = \begin{cases} \phi(\omega_1) & |\omega_1| < 1, |\omega_2| \leq |\omega_1| \\ \phi(\omega_2) & |\omega_2| < 1, |\omega_1| \leq |\omega_2| \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} 0 & |\omega| \leq \frac{1}{2} \\ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}v(2\omega-1)\right) & \frac{1}{2} < |\omega| < 1 \\ 1 & \text{其他} \end{cases}$$

则 $\phi(x)$ 的平移变换 $(T_t\phi)(x) = \phi(x, t)$, 即 C^0 上有:

$$\hat{\phi}_t(\omega) = e^{-2\pi i \langle t, \omega \rangle} \hat{\phi}(\omega)$$

1.2 有限离散剪切波

为了得到离散剪切波变换, 我们对(2)式中的伸缩参数、剪切参数以及平均参数进行离散化^[6]:

$$a_j = 2^{-2j} = \frac{1}{4^j} \quad j = 0, \dots, j_0 - 1$$

$$s_{j,k} = k2^{-j} \quad -2^j \leq k \leq 2^j$$

$$t_m = \frac{m}{N} \quad m \in I \quad (13)$$

式中: $I = \{(m_1, m_2) : m_i = 0, \dots, N-1, i = 1, 2\}$;

$j_0 = \lfloor \frac{1}{2} \log_2 N \rfloor$ 表示分解尺度, 从而得到离散剪切

波 $\psi_{j,k,m} = \psi(A_{a_j}^{-1}S_{s,j,k}^{-1}(x-t_m))$, 其频域表达式为

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_{j,k,m}(\omega) &= \hat{\psi}(A_{a_j}^T S_{s,j,k}^T \omega) e^{-2\pi i \langle \omega, t_m \rangle} = \\ &= \hat{\psi}_1(4^{-j}\omega_1)\hat{\psi}_2\left(2^j\frac{\omega_2}{\omega_1} + k\right) e^{-2\pi i \langle \omega, m \rangle / N} \end{aligned} \quad (14)$$

式中:

$$\Omega =$$

$$\left\{ (\omega_1, \omega_2) : \omega_i = -\left[\frac{N}{2}\right], \dots, \left[\frac{N}{2}\right] - 1, i = 1, 2 \right\}$$

为了得到整个频域上的剪切波, 在锥面交叉处定义 $|k| = 2^j$, 剪切波的和式为

$$\hat{\psi}_{j,k,m}^{h \times v} = \hat{\psi}_{j,k,m}^h + \hat{\psi}_{j,k,m}^v + \hat{\psi}_{j,k,m}^\times \quad (15)$$

由此离散剪切波可表示为

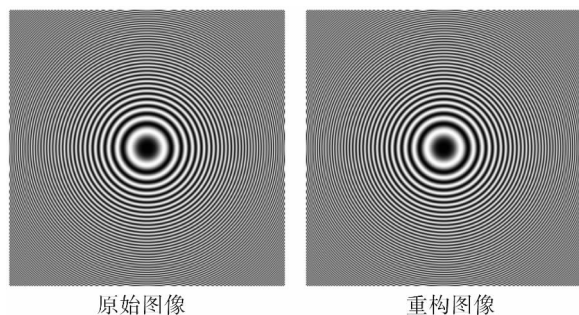
$$SH(f)(\tau, j, k, m) = \begin{cases} \langle f, \phi_m \rangle & \tau = 0 \\ \langle f, \hat{\psi}_{j,k,m}^\tau \rangle & \tau \in \{h, v\} \\ \langle f, \hat{\psi}_{j,k,m}^{h \times v} \rangle & \tau = \times, |k| = 2^j \end{cases} \quad (16)$$

式中: $j = 0, \dots, j_0 - 1; -2^j + 1 \leq k \leq 2^j - 1; m \in I$ 。

由(16)式定义的剪切波可以通过二维快速傅里叶变换算法实现, 具有较快的运算效率。

上述过程得到的离散剪切波已被证明可以构成有限维欧氏空间的 parseval 框架^[6]。FDST 在变换过程中不进行下采样操作, 从而具有平移不变性。对图像 I , 有限离散剪切波主要包括尺度分解和方向分解 2 个过程, 首先, 对图像作频域上的变换(二维快速傅里叶变换)得到图像的频谱, 并对频谱图像进行非下采样金字塔分解, 通过二维

傅里叶逆变换得到相应的低频子带和高频子带;其次对高频子带系数采用上述构造的剪切滤波器进行方向局部化,得到各层方向子带系数,若图像 I 经过 L 层 FDST 分解,可得到 1 个低频子带和 $\sum_{i=0}^{L-1} 2^{i+2}$ 方向子带系数,下面对图 2 所示的测试图像进行 2 层 FDST 分解,通过对重构图像及原始图像作差并取绝对值最大值,经由 FDST 进行两层分解后的重构误差为 2.886×10^{-15} ,这说明重构图像极为精确。图 3 为各层方向子带系数图像。

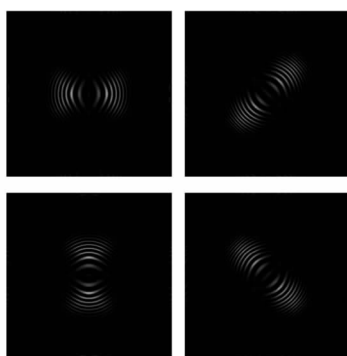


原始图像

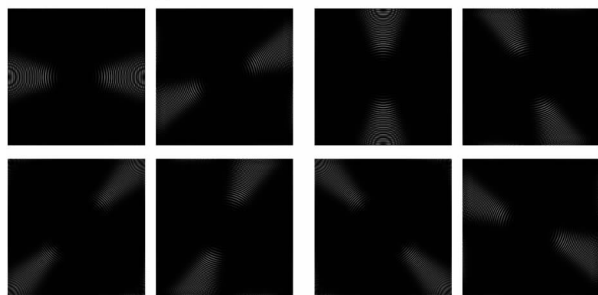
重构图像

图 2 测试图像及重构图像

Fig. 2 Test image and reconstruct image



(a) 第1层方向子带系数图,4个子带



(b) 第2层:8个方向子带系数

图 3 测试图像的 2 层 FDST 分解

Fig. 3 Two-level decomposition of test image

2 图像融合策略

图像的多尺度融合过程主要分为 3 步:1)对源图像分别进行有限离散剪切波分解,得到高频和低频子带系数;2)对低频和各高频系数分别选取不

同的融合规则以及对各系数进行运算选取;3)将处理后的系数应用有限离散剪切波逆变换得到重构图像。

以两幅输入图像 I_A, I_B 为例,算法主要由以下步骤(假设源图像已经严格配准)。

1) 对每幅源图像分别进行 FDST 分解,得到不同尺度,方向子带系数 $\{L_j^A, H_{j,k}^A\}, \{L_j^B, H_{j,k}^B\}$,其中 J 表示分解层数, $L_j^X (X=A, B)$ 表示图像 X 的低频子带系数, $H_{j,k}^X$ 表示图像 X 的第 j 层第 k 个高频子带系数。

2) 对步骤 1 中分解得到的低频子带系数和各带通方向子带系数分别进行融合处理得到融合后图像 I_F 的各尺度上 FDST 系数 $\{L_j^F, H_{j,k}^F\}$ 。

3) 对步骤 2 中得到的 FDST 系数进行逆变换,即得到融合后的清晰图像 I_F 。具体流程见图 4。

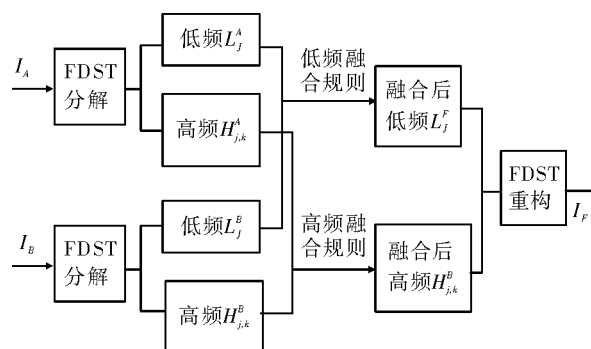


图 4 流程图

Fig. 4 Flow chart

2.1 低频子带融合策略

通过对源图像进行有限离散剪切波分解后得到的低频子带系数,包含了图像的主要信息,以往的融合算法一般选用简单的加权区域能量方法,容易使融合后的图像引入虚假信息。因而采用区域平均能量(RAE)匹配度法^[11],具体规则:取区域窗口大小 $M \times N$,通常窗口大小均为奇数,图像 I 在像素点 (i, j) 处的区域平均能量表达式为

$$RE^I(i, j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} |L_j^I(i+m, j+n)|^2 \quad (17)$$

相应地,两幅图像间基于区域平均能量的匹配度计算公式为

$$M_{A,B}(i, j) = \frac{2}{RE^A(i, j) + RE^B(i, j)} \cdot \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} L_j^A(i+m, j+n) L_j^B(i+m, j+n) \quad (18)$$

(18)式反映了两幅图像基于区域平均能量的相似程度。令 T 为匹配度阈值,一般为 $0.5 \sim 1$ 。则低频融合规则为

$$H_{j,k}^F(i,j) = \begin{cases} H_{j,k}^A(i,j), M_{A,B}(i,j) \leq T \ \& \ RE_{i,k}^A(i,j) \geq RE_{i,k}^B(i,j) \\ H_{j,k}^B(i,j), M_{A,B}(i,j) \leq T \ \& \ RE_{i,k}^A(i,j) < RE_{i,k}^B(i,j) \\ 0.5 \times (H_{j,k}^A(i,j) + H_{j,k}^B(i,j)), M_{A,B}(i,j) > T \end{cases} \quad (19)$$

2.2 高频子带融合策略

源图像经过变换分解后的高频子带系数代表了源图像的细节信息,细节信息越多,说明清晰度越高。蒲恬^[12]等人将对比度概念应用于多传感器图像融合中。图像对比度 C 一般定义为 $C = \frac{L_P - L_B}{L_B} = \frac{L_H}{L_B}$, L_P 为图像局部灰度, L_B 为图像局部背景灰度(相当于图像变换后的低频分量), $L_H = L_P - L_B$ 则相当于图像变换后的高频分量。考虑到图像像素之间的相关性,基于传统的对比度概念,定义图像中各像素新的对比度为

$$C^I(x,y) = \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{(m,n) \in N(x,y)} \left[\frac{g_i^I(m,n)}{f_N^I(m,n)} \right]^2, \quad I=A,B \quad (20)$$

式中 $N(x,y)$ 为以像素 (x,y) 为中心定义的矩形窗口(9×9 的矩形窗口)。 $C^I(x,y)$ 越大,说明源图像 I 中像素 (x,y) 所在局部区域对比度越大,对应像素越清晰。

3 仿真实验及结果分析

为了验证该融合算法的有效性,实验中用 MATLAB R2014b 针对多聚焦图像进行仿真验证。考虑到图像融合过程中多尺度分解方法有很多,首先验证在传统融合策略下分别用离散小波变换(DWT),非抽样小波变换(SWT),轮廓波变换(CT),有限离散剪切波变换(FDST)的融合结果进行比较;其次进行不同融合算法的结果分析及比较,文中采用主观视觉评价及相应的客观评价指标^[13](信息熵 EN ,互信息 MI ,边缘信息传递量 $Q^{AB/F}$)进行说明。

3.1 不同变换域的图像融合

选取常用的多聚焦图像(图 5(a)和图 5(b)所示的气球图,图 6(a)和图 6(b)所示的球前后聚焦图)作为测试数据,融合策略:低频采取加权平均,高频系数绝对值取大,分别用 DWT、SWT、

NSCT、FDST 进行图像融合,融合结果依次为图 5(c)~(f)及图 6(c)~(f)所示。

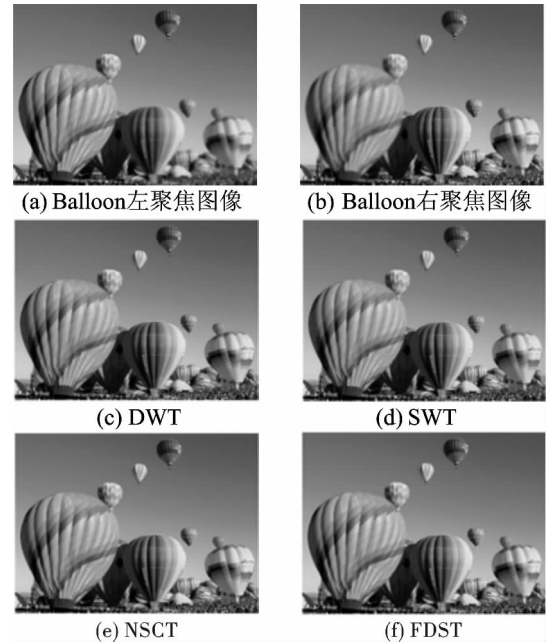


图 5 不同小波域在传统融合策略下对 Balloon 的融合结果

Fig. 5 Balloon image fusion results using traditional fusion strategy in different wavelet domains

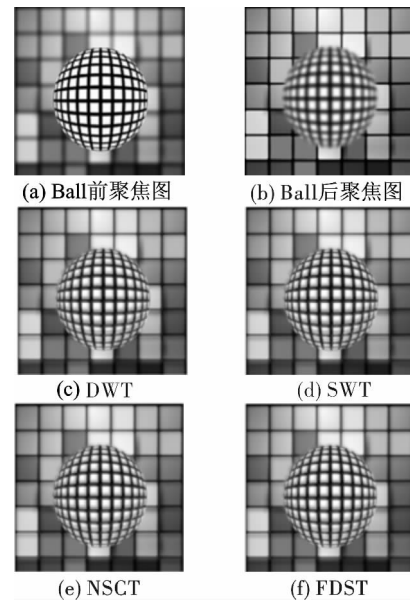


图 6 不同小波域在传统融合策略下对 Ball 图的融合结果

Fig. 6 Ball image fusion results using traditional fusion strategy in different wavelet domains

图 5(c)~(f)和图 6(c)~(f)是多聚焦图在不同小波域下的融合效果,图 5(c)、图 6(c)均由 DWT 融合所得,从放大效果可以看出,图 5(c)的大球和小球边缘有明显的块状效应,图 6(c)球的边缘有阴影现象。从非抽样小波变换(SWT)得到

的图 5(d)和图 6(d)来看,图 5(d)大球边缘块状效应有所改善,但小球边缘没有太大变化。图 6(d)整体视觉上 and 图 6(c)相比较为清晰,但是模糊了源图像的清晰部分。图 5(e)和图 6(e)均由 NSCT 融合所得,两幅图像的边缘信息有所改善,虚影有

所减少,但两幅图像视觉上均较为模糊。图 5(f)和 6(f)是 FDST 的融合结果,尽管采用传统的融合策略,但两幅融合图像都比前面的图像清晰,捕捉到了图像的主要信息,对比度也有所提升,取得了较好的融合效果。相应的客观指标评价结果见表 1。

表 1 不同小波域下对 Balloon 图和 Ball 图的融合结果比较

Table 1 Fusion results comparison of balloon and ball image in different wavelet domains

融合结果评价	Balloon 图			Ball 图		
	EN	MI	$Q^{AB/F}$	EN	MI	$Q^{AB/F}$
DWT	7.478 6	6.368 5	0.807 5	7.852 8	2.758 2	0.477 2
SWT	7.476 3	6.640 4	0.816 8	7.860 5	2.830 6	0.510 0
NSCT	7.476 6	6.672 5	0.809 4	7.834 0	3.208 8	0.471 4
FDST	7.481 5	6.674 9	0.824 2	7.864 5	3.652 0	0.568 5

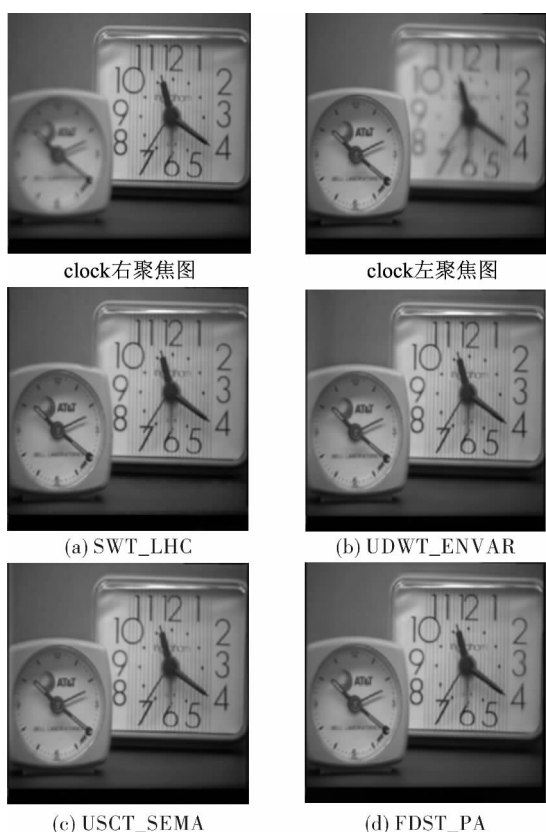


图 7 不同融合算法下对 clock 图像的融合结果

Fig. 7 Clock image fusion results using different fusion strategies

由表 1 可以看出:在 Balloon 图中 SWT 与 NSCT 在传统融合策略下的各项指标接近,熵值略低于 DWT,但是互信息量及边缘信息传递量均优于 DWT;而无论是在 Balloon 图还是在 Ball 图中,FDST 的所有评价指标均优于 DWT、SWT 和 NSCT,这说明 FDST 在变换域更具有优势。

3.2 不同融合算法的比较

选用图 7 所示的 clock 左、右聚焦图,图 8 所

示的 peppers 左、右聚焦图分别进行测试,将本文算法与近几年提出的 3 种融合算法进行对比。方法 1^[10]是基于改进对比度的小波变换进行融合,一种将高频分量与低频分量相关联的对比度作为融合系数的评判标准,记为 SWT_LHC;方法 2^[7]基于 atrous 小波变换,低频采用加权区域能量,高频采用区域方差取大的融合策略,记为 UDWT_

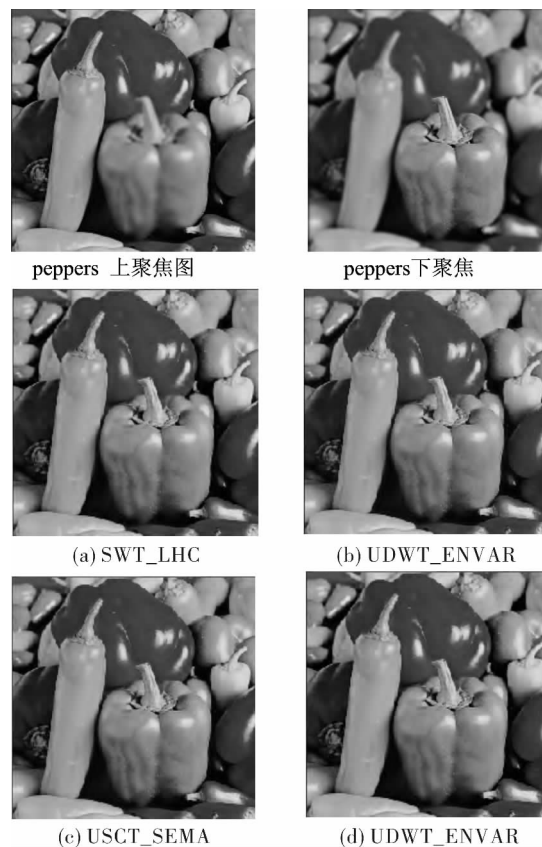


图 8 不同融合算法下对 peppers 图像的融合结果

Fig. 8 Peppers image fusion results using different fusion strategies

ENVAR;方法3^[14]选取非下采样轮廓波域,低频考虑自适应加权的融合策略,高频结合图像边缘信息选用区域方差的融合策略,记为NSCT_SEMA。其融合结果分别为图7(a)~(d),图8(a)~(d)所示。

从图7和图8的融合结果来看,在视觉上几幅

图像的差异不是很大,图像整体上都比较清晰,这是由于几种融合算法均考虑了像素之间的相关性,保留了左右聚焦图像中的有用信息。考虑到前两种融合算法并未对高频子带进行方向分解,对图像边缘的刻画略逊于NSCT和FDST的融合效果。表2通过客观评价指标对其进行定量分析。

表2 不同融合算法下对clock图和peppers图的融合结果比较

Table 2 Fusion results comparison of clock and lab image in different fusion strategies

融合结果评价	clock 图			Peppers 图		
	EN	MI	$Q^{AB/F}$	EN	MI	$Q^{AB/F}$
SWT_LHC	7.269 5	5.058 1	0.674 7	7.593 2	5.979 6	0.754 4
UDWT_ENVAR	7.423 4	4.326 0	0.647 3	7.583 9	5.371 0	0.749 8
NSCT_SEMA	7.443 5	4.312 9	0.665 2	7.574 5	5.571 7	0.767 4
FDST_PA	7.436 7	4.931 0	0.686 8	7.593 9	6.442 8	0.769 4

由表2可以看出:UDWT_ENVAR与NSCT_SEMA融合方法的评价指标在熵值及互信息上比较接近,从边缘相似度来看,NSCT_SEMA要优于UDWT_ENVAR;而SWT_LHC方法在互信息量指标上要高于上面2种方法,尤其在clock图的数据上更为明显。对于边缘相似度指标,SWT_LHC与NSCT_SEMA均高于UDWT_ENVAR的对应指标,但整体相差不大。将这3种算法与本文融合算法相比较,对于clock图,FDST_PA在边缘相似度上要明显优于其他算法,熵值略低于NSCT_SEMA;在peppers图中,3项指标均优于其他算法,这说明本文融合算法具有较好的融合效果。

4 结束语

为改善现有多尺度分解图像融合的缺点,而对比度作为图像质量的一项重要指标,提出了一种基于有限离散剪切波域和改进对比度相结合的自适应融合方法。利用FDST具有平移不变性以及良好的方向局部化特点,即有效地提取图像边缘、轮廓等细节信息。低频选用基于区域平均能量匹配度的自适应融合策略,能够较好地获取两幅图像中的有用信息;考虑到低频子带与方向子带间的关联,采用一种改进的对比度作为高频融合策略,试验结果表明:提出的基于FDST域融合算法与其他融合算法相比较,在主观视觉方面要优于其他算法的融合结果;在客观评价指标上,除了第一幅图中熵值不是最优,其他指标均优于其他算法。总的来说,该融合算法能够得到较好的

融合效果,同时也具有较高的运算效率。

参考文献:

- [1] Jing Zhongliang, Xiao Gang, Li Zhenhua. Image fusion-theory and applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007:1-3.
敬忠良,肖刚,李振华. 图像融合-理论与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2007:1-3.
- [2] Li S, Kwok J T, Wang Y. Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images[J]. Information Fusion, 2002, 3(1):17-23.
- [3] Wang H H. A new multiwavelet-based approach to image fusion. [J]. Journal of Mathematical Imaging & Vision, 2004, 21(2):177-192.
- [4] Jiao L C, Tan S. Development and prospect of image multiscale geometric analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(S1):1975-1981.
焦李成,谭山. 图像的多尺度几何分析:回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 31(增刊1):1975-1981.
- [5] Cunha A L, Zhou J P, Dom N. The non sub sampled contour let transform: theory, design, and application[J]. IEEE, 2006, 10:3089-3101.
- [6] Hauser S, Steidl G. Convex multiclass segmentation with shearlet regularization[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2013, 90(1):62-81.
- [7] Han Xiao, Peng Li. New multi-focus image fusion algorithm based on wavelet transform[J]. Computer and Digital Engineering, 2014, 42(9):1628-1631.
韩潇,彭力. 基于小波变换的多聚焦图像融合新算法[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(9):1628-1631.

- [8] Wang Hongmei, Chen Lihua, Li Yanjun, et al. A new and more effective image fusion algorithm based on salient feature[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(4):486-490.
王红梅,陈励华,李言俊,等.一种基于显著特征的图像融合算法[J].西北工业大学学报,2010,28(4):486-490.
- [9] Yue Zhen, Li Fanming. Polarization image fusion algorithm based on wavelet transform[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2):321-326.
岳振,李范鸣.一种基于小波变换的红外偏振融合算法[J].应用光学,2014,35(2):321-326.
- [10] Wang Zhenglin. Wavelet image fusion algorithm based on contrast[J]. Laser & Infrared, 2014(9):1042-1044.
王正林.基于对比度的小波图像融合算法研究[J].激光与红外,2014(9):1042-1044.
- [11] Kong Weiwei, Liu Jianping. Technique for image fusion based on NSST domain improved fast non-classical RF[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 61(6):27-36.
- [12] Pu Tian, Fang Qingzhe, Ni Guoqiang. Contrast-based multiresolution image fusion[J]. Acta Electronica Sinica, 2000(12):116-118.
蒲恬,方庆喆,倪国强.基于对比度的多分辨率图像融合[J].电子学报,2000(12):116-118.
- [13] Yan Lele, Li Hui, Qiu Juneng, et al. Image quality assessment method based on regional contrast and structural similarity[J]. Journal of Applied Optics, 2015,36(1):58-63.
闫乐乐,李辉,邱聚能,等.基于区域对比度和 SSIM 的图像质量评价方法[J].应用光学,2015,36(1):58-63.
- [14] Tong Tao, Yang Guang, Tan Haifeng, et al. Multi-sensor image fusion algorithm based on NSCT[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(2):22-25,59.
童涛,杨桃,谭海峰,等.基于 NSCT 变换的多传感器图像融合算法[J].地理与地理信息科学,2013,29(2):22-25,59.