

# 一种基于小波方向对比度的多聚焦图像融合方法

王 丽 卢 迪 吕剑飞

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要** 人类视觉系统对于图像的局部对比度非常敏感, 如果把小波变换和方向对比度结合起来, 融合效果可能更好。在研究了方向对比度后提出了一种新的基于小波方向对比度的多聚焦图像融合方法。首先对参加融合的两幅图像进行小波多尺度分解, 然后在每幅图像在每个分解层上, 分别计算高频子带每个像素的邻域均值和低频子带的邻域均值之比, 其中该分解层的低频子带是由上个分解层的低频子带和高频子带求 2 维离散小波逆变换得到, 采用两者之比较大者所对应的高频子带系数作为融合后对应的小波系数, 然后从最高分解层到最低分解层依次对得到的高频小波系数和该分解层的低频小波系数求 2 维离散小波逆变换, 最终得到融合后的图像。这种方法考虑了邻域内像素的相关性, 减少了融合像素的错误选取。实验结果表明, 该方法的融合效果比针对每个像素求小波方向对比度的多聚焦图像融合方法的融合效果得到提高。

**关键词** 图像融合 离散小波变换 小波对比度

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)01-0145-06

## Multi-focus Image Fusion Scheme Based on Wavelet Contrast

WANG Li LU Di LV Jian-fei

(College of Electric and Electron, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040)

**Abstract** The vision system of human being is sensitive to local contrast. If the wavelet transform and directional contrast are put together, the effect of image fusion may be better. This paper puts forward a new multi-focus image fusion scheme based on wavelet directional contrast after researching the directional contrast. First, the input multi-focus images are decomposed by wavelet transform. Second, the high frequency neighborhood and low frequency neighborhood are ratioed on each disaggregative layer of each image. Low frequency of this decomposition is obtained by two-dimensional discrete wavelet inverse transform of last decomposition's low frequency and high frequency. The bigger ratio one corresponding high frequency wavelet coefficient is taken to corresponding wavelet coefficient. Then two-dimensional discrete wavelet inverse transform of high frequency and low frequency from the maximum decomposition to minimum decomposition is calculated. The fusion image is acquired at last. The neighborhood relativity of pixel is taken into account, the error in selecting pixels is reduced. Experiments show that this scheme is improved than the multi-focus image scheme calculating the wavelet directional contrast of each pixel.

**Keywords** image fusion, discrete wavelet transform, wavelet contrast

## 1 引 言

图像融合是将两个或者两个以上的传感器在同一时间(或不同时间)获取的关于某个具体场景的图像或者图像序列信息加以综合, 生成一个新的有

关场景的解释, 而这个解释是从单一传感器获取的信息中无法得到的<sup>[1]</sup>。图像融合的目的是减少不确定性。多聚焦图像是指当摄像机拍摄与镜头距离不同的多个目标时, 由于无法同时聚焦到这些目标使其清晰, 因此采用分别聚焦到各个目标多次拍摄而得到的多幅图像。对这些多焦距图像进行融合,

收稿日期: 2006-04-12 改回日期: 2006-09-12

第一作者简介: 王丽(1982~), 女, 哈尔滨理工大学信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为数字图像融合。E-mail wan-gl2524897@yahoo.com.cn

可以得到一幅在一个场景内各个目标都清晰的图像。

对于多聚焦图像的融合问题,具有代表性的方法是基于多分辨率分析的融合方法,包括基于金字塔变换的融合算法和基于离散小波变换的融合算法,图像的小波多分辨分解与人眼视觉的多通道分解规律一致,因而可获得与人的视觉特性更为接近的融合效果。而且小波变换的图像融合技术能克服拉普拉斯金字塔的不稳定性,小波分解过程中,图像的数据量不变,同时各层的融合可并行进行,所以其计算速度和所需的存贮量都要优于拉普拉斯金字塔<sup>[2]</sup>。而人类视觉系统对于图像的局部对比度非常敏感,因此把小波变换和方向对比度相结合,可获得更好的融合效果。本文在文献[3]提出的方向对比度的基础上进行了改进,得到了更好的融合效果。

多分辨率图像融合的融合规则主要有基于像素的图像融合规则、基于窗口的图像融合规则、基于区域的像素融合规则。本文的融合规则属于基于窗口的图像融合规则,即分别计算每个像素的邻域均值(本文邻域窗口选取为 3×3),这种融合规则在选取像素值的同时也考虑了窗口区域像素的相关性<sup>[4]</sup>。

## 2 基于小波变换的图像融合

### 2.1 图像的 2 维离散小波变换

小波变换是介于函数的时间域(空间域)表示和频率域表示之间的一种表示方法。它在时间域和频率域上同时具有良好的局部化性质。

如果  $f(x, y)$  表示一幅图像,设尺度函数  $\varphi(x)$  和小波函数  $\psi(x)$  对应的滤波器系数矩阵分别为  $H$  和  $G$ ,原始图像记为  $X_0$ ,则 2 维小波分解算法可描述为

$$\begin{cases} X_{j+1} = HX_jH' \\ D_{j+1}^h = GX_jH' \\ D_{j+1}^v = HX_jG' \\ D_{j+1}^d = GX_jG' \end{cases} \quad (j = 0, 1, \dots, J-1) \quad (1)$$

式中,  $h, v, d$  分别表示水平、垂直和对角分量,  $X_j, D_j$  表示对原始图像进行  $j$  层小波分解后得到的低频分量和高频分量,  $H'$  和  $G'$  分别是  $H$  和  $G$  的共轭转置,相应的小波重构算法为

$$X_{j-1} = H'X_jH + G'D_j^hH + H'D_j^vG + G'D_j^dG \quad (2)$$

$(j = J, J-1, \dots, 1)$

图像经 2 维小波分解之后,分别得到图像的低频分量、水平高频分量、垂直高频分量和对角高频分量,其中低频部分集中了主要能量,水平、垂直和对角分量是图像的细节部分。

基于小波变换的图像融合的基本步骤是:(1)先对源图像进行 2 维小波分解;(2)在小波变换域内对各图像的细节信息,即高频分量在不同尺度上按一定的融合规则进行融合,提取出重要的小波系数;(3)对两幅图像经小波变换之后的低频系数进行融合;(4)进行小波反变换,得到融合之后的图像。

融合结构如图 1 所示。

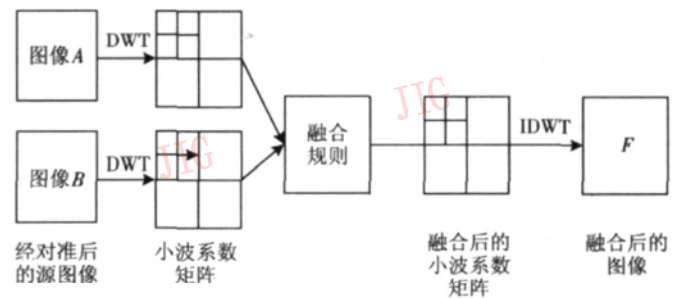


图 1 基于小波变换的图像融合结构图

Fig 1 The image fusion structure based on wavelet transform

### 2.2 小波对比度定义

文献[5]在研究对比度金字塔时提出了局部亮度对比度的定义,即

$$C = (L - L_B) / L_B = L_H / L_B \quad (3)$$

式中,  $L$  为图像局部亮度;  $L_B$  为图像的局部背景亮度,可以认为是低频分量,  $L_H = L - L_B$  是局部亮度减去局部背景得到的局部细节,可以认为是高频分量,文献[3]结合式(3)表达的意义,定义了小波对比度如下:

$$\begin{aligned} \text{垂直对比度: } C_{L-1}^v &= D_{L-1}^1 / A_{L-1} \\ \text{水平对比度: } C_{L-1}^h &= D_{L-1}^2 / A_{L-1} \\ \text{对角对比度: } C_{L-1}^d &= D_{L-1}^3 / A_{L-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $A_{L-1}$  为图像在  $2^{L-1}$  分辨率上的低频近似分量;  $D_{L-1}^1$  为图像在  $2^{L-1}$  分辨率上的垂直高频细节;  $D_{L-1}^2$  为图像在  $2^{L-1}$  分辨率上的水平高频细节;  $D_{L-1}^3$  为图像在  $2^{L-1}$  分辨率上两个对角线方向的高频细节<sup>[6]</sup>。

文献[6]也采用了小波对比度的图像融合算法,但是是基于像素的小波对比度算法,图像融合规则的判断准则是图像信号的显著性水平。

### 2.3 融合规则

有些基于小波分解的多分辨率融合处理方法只

是单纯地在高频和低频分量上制定不同的融合规则,没有考虑低频子带和低频子带的关系,即局部或方向对比度这一重要信息。局部对比度的变化反映了图像内各个对象的差异,更加适合人眼的生理视觉特点。对比度定义包含了图像的高频信息及其相对于背景的背景强度,文献 [3] 提出的基于方向对比度的融合规则如下:

$$D_{l-1F}^1(i,j) = \begin{cases} D_{l-1X}^1(i,j) & |C_{l-1X}^V(i,j)| > |C_{l-1Y}^V(i,j)| \\ D_{l-1Y}^1(i,j) & \text{其他} \end{cases}$$

$$D_{l-1F}^2(i,j) = \begin{cases} D_{l-1X}^2(i,j) & |C_{l-1X}^H(i,j)| > |C_{l-1Y}^H(i,j)| \\ D_{l-1Y}^2(i,j) & \text{其他} \end{cases}$$

$$D_{l-1F}^3(i,j) = \begin{cases} D_{l-1X}^3(i,j) & |C_{l-1X}^D(i,j)| > |C_{l-1Y}^D(i,j)| \\ D_{l-1Y}^3(i,j) & \text{其他} \end{cases}$$

$$M+1 \leq l \leq N \quad (5)$$

式中,  $D_{l-1T}^d(i,j)$  ( $d=1,2,3$ ;  $T=X,Y,F$ ) 分别表示输入图像  $X, Y$  和融合图像  $F$  的高频子带信号在点  $(i,j)$  处的像素灰度值,  $C_{l-1T}^E(i,j)$  ( $E=V,H,D$ ;  $T=X,Y$ ) 分别表示输入图像  $X, Y$  的方向对比度。文献 [3] 中的融合规则的对比度是基于单一像素的简单融合规则,即选取对比度矩阵中模值较大的元素作为相应位置上的融合后的小波系数,一般情况下某一区域内的像素都具有较强的相关性,图像信号的有效信息往往不止一个像素,如果仅对单一像素进行比较,容易出现单一像素的错误选取,因此本文提出了一种基于邻域均值的对比度融合规则。

算法步骤如下:

- (1) 确定邻域大小 (如  $3 \times 3, 5 \times 5$ , 本算法选用  $3 \times 3$  窗);
- (2) 对各分辨率下的高频分量各子带取绝对值后,计算每一个像素点在  $3 \times 3$  邻域内的均值;
- (3) 对最低分辨率  $2^l$  下低频分量子带的每一个像素点,求取其所处的邻域内的均值;
- (4) 然后对最低分辨率  $2^l$  下的低频分量子带和低频分量各子带求离散 2 维小波逆变换,得到分辨率  $2^{l+1}$  下的低频分量,再对该低频分量求取  $3 \times 3$  邻域均值;

(5) 依次类推,最后可求得最大分辨率  $2^{N-1}$  下的低频分量;

(6) 按下列规则确定融合后的高频子带数据:

$$D_{l-1F}^k(i,j) = \begin{cases} D_{l-1X}^k(i,j) & \frac{|U_{l-1X}^k(i,j)|}{|U_{l-1X}^k(i,j)|} \geq \frac{|U_{l-1Y}^k(i,j)|}{|U_{l-1Y}^k(i,j)|} \\ D_{l-1Y}^k(i,j) & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $D_{l-1F}^k(i,j)$  表示第  $k$  个融合后的高频子带,在分辨率  $2^{l-1}$  下点  $(i,j)$  处的像素灰度值;  $D_{l-1X}^k(i,j), D_{l-1Y}^k(i,j)$  分别表示源图像  $X, Y$  在第  $k$  个子带,点  $(i,j)$  处的像素灰度值;  $U_{l-1X}^k(i,j), U_{l-1Y}^k(i,j)$  分别表示源图像  $X, Y$  在第  $k$  个高频子带取绝对值后以点  $(i,j)$  为中心的均值;  $U_{l-1X}(i,j), U_{l-1Y}(i,j)$  分别表示源图像  $X, Y$  的低频子带以点  $(i,i)$  为中心的均值;  $k=1,2,3$  分别对应垂直方向、水平方向,以及对角方向的 3 个高频子带。

(7) 式 (6) 得到的是分辨率  $2^{l-1}$  ( $M+1 \leq l \leq N$ ) 下的高频子带,将该高频子带和分辨率  $2^{l-1}$  下的低频子带求 2 维离散小波逆变换,得到分辨率  $2^l$  下的低频子带,再将该低频子带和按式 (6) 得到的分辨率  $2^l$  下的高频子带求 2 维离散小波逆变换,得到分辨率  $2^{l+1}$  下的低频子带,依次类推,最终得到融合图像。

由于最高分解层的低频部分集中了主要的能量,像素值均为正值,因此采用两幅图像对应低频位置上的值的加权平均:

$$A_{l-1F}(i,j) = k_1 A_{l-1X}(i,j) + k_2 A_{l-1Y}(i,j) \quad (7)$$

式中,  $A_{l-1F}(i,j), A_{l-1X}(i,j), A_{l-1Y}(i,j)$  分别表示融合图像、源图像  $X$ 、源图像  $Y$  在低频上点  $(i,j)$  位置上的值;  $k_1, k_2$  是两个权值,本文中选取  $k_1 = k_2 = 0.5$ 。

本文选取邻域大小为  $3 \times 3$  邻域大小也可以选取  $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$  等,但是邻域选取越大,计算均值所需时间越长,且融合效果都不如邻域大小为  $3 \times 3$  时的融合效果,表 1 为邻域大小分别为  $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$  且分解层数为 6 层时用 Coif2 小波基对 Lena 图像融合所得到的融合评价指标,从表 1 中可以看出邻域为  $3 \times 3$  时融合效果最好。

表 1 邻域大小不同时所得到的融合评价指标

邻域大小	$f_s$	RMSE	PSNR	DDR	SM
$3 \times 3$	14.0225	0.8947	49.0973	0.0033	1.0000
$5 \times 5$	14.0146	1.0470	47.7317	0.0039	1.0000
$7 \times 7$	14.0093	1.6426	43.8202	0.0067	0.9999

## 2.4 图像融合效果评价指标

对于图像融合效果评价指标的选取,主要指的是对客观评价指标的选取。

提高信息量是图像融合最重要的目的之一,

本文采用交叉熵来评价融合图像的信息量是否提高。交叉熵越小,表示图像间的差异越小。若源图像为  $R$ , 融合图像为  $F$ , 则源图像与融合图像的交叉熵为

$$E_C = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_R^i \log \frac{P_R^i}{P_F^i} \quad (8)$$

$P_R^i$  为源图像灰度级为  $i$  的像素数与总像素数之比,  $P_F^i$  为融合图像  $F$  中灰度级为  $i$  的像素数与总像素数之比。 $L$  为灰度级。

图像融合还要求在保持原有信息不丢失的情况下,提高图像的质量,增强图像的细节信息,保持边缘细节及能量,即提高清晰度,可采用空间频率来评价。空间频率反映了一幅图像空间域的总体活跃程度。空间频率越大,图像融合效果越好。

图像的行频率为

$$f_R = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [F(i, j) - F(i, j-1)]^2} \quad (9)$$

列频率为

$$f_C = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} [F(i, j) - F(i-1, j)]^2} \quad (10)$$

图像的空间频率为

$$f_S = \sqrt{f_R^2 + f_C^2} \quad (11)$$

除此之外,采用均方根误差 RMSE, 均方根误差越小,融合效果越好。

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

相似性量度:

$$SM = 2 \times \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R(i, j) \times F(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i, j)^2 + F(i, j)^2]} \quad (13)$$

如果  $SM$  越接近 1,说明融合图像与理想图像更接近,也就是融合效果更好。

峰值信噪比定义为

$$PSNR = 10 \lg \frac{255 \times 255}{RMSE^2} \quad (14)$$

偏差度反映标准参考图像  $R$  与融合图像  $F$  在光谱信息上的匹配程度,如果偏差指数小,则说明融合图像在提高空间分辨率的同时,较好的保留了原始图像的光谱信息,公式为

$$DDR = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|R(i, j) - F(i, j)|}{F(i, j)} \quad (15)$$

在实际评价过程中应综合考虑多个客观参量的评价结果。

## 2.5 小波基和分解层数的选取

图像融合技术中小波基的选择是影响融合图像质量的一个重要因素,一般选取具有正交性、紧支集性、对称性和平滑性的小波基,这样能更好地提取图像特性。表 2 为用符合上述条件的不同小波基对 Lena 图像进行融合后的评价结果(其中分解层数为 6 层,融合规则为本文所提出的方法),以此来确定实验中所使用的小波基。由表 2 可以看出,用 Coi2 小波基所得到的融合效果最好,因此本文采用 Coi2 小波基。

表 2 采用不同小波基所得到的客观评价价值

Tab 2 The objective estimate evaluation of different wavelet base

小波基	$f_S$	RMSE	PSNR	DDR	SM
Db3	13.9997	7.2910	30.8750	0.0284	0.9985
Db8	14.0070	1.1832	46.6696	0.0043	1.0000
Db10	14.0074	1.1618	46.8282	0.0045	1.0000
Sym5	14.0192	0.9661	48.4305	0.0036	1.0000
Sym8	14.0187	0.9124	48.9272	0.0031	1.0000
Coi2	14.0225	0.8947	49.0973	0.0033	1.0000
Coi5	14.0191	0.9047	49.0005	0.0030	1.0000
Bior2.2	14.0216	1.0846	47.4250	0.0058	1.0000
Bior6.8	14.0177	0.9348	48.7162	0.0030	1.0000

表 3 和表 4 分别列出了采用本文方法和文献 [3] 方法对 Lena 图像和 Sailboat 图像进行 7 层小波分解及融合的融合结果,可以看出,融合效果随着分解层数的增加而提高,但到了一定层之后,融合结果变化就不是很明显,而且分解层数越大,计算量越大,计算时间越长,综合评价各种指标, Lena 图像最终采用 6 层小波分解, Sailboat 图像采用 5 层小波分解。

## 3 仿真结果

图 2 分别对标准参考图像 Lena 和 Sailboat 采用本文方法进行融合后得到的仿真结果。

本文邻域大小选为  $3 \times 3$ 。根据表 3、表 4 当 Lena 图像小波分解层数为 6 时,评价结果达到最优,当 Sailboat 图像小波分解层数为 5 时,评价结果达到最优,并且指标都要优于文献 [3] 中的方法。

表 3 对 Lena 图像融合所得到的融合性能评价

Tab 3 The fusion evaluation of image Lena

层数	本文方法						文献 [3] 方法					
	$f_s$	RMSE	PSNR (dB)	DDR	$E_c$	SM	$f_s$	RMSE	PSNR (dB)	DDR	$E_c$	SM
7	14 023 0	0 909 2	48 957 8	0 003 5	6 729 2e-004	1 000 0	13 987 3	1 680 6	43 621 5	0 010 8	7 367 4e-004	0 999 9
6	14 022 5	0 894 7	49 097 3	0 003 3	7 343 3e-004	1 000 0	13 986 8	1 666 2	43 696 4	0 010 7	7 493 8e-004	0 999 9
5	14 016 5	1 038 3	47 804 4	0 005 4	6 980 6e-004	1 000 0	13 980 9	1 728 6	43 376 9	0 011 4	8 317 0e-004	0 999 9
4	13 964 4	1 919 4	42 467 6	0 013 0	0 001 9	0 999 9	13 932 7	2 306 8	40 870 8	0 015 9	0 001 6	0 999 8
3	13 677 0	3 977 6	36 138 4	0 026 0	0 007 9	0 999 6	13 666 4	4 031 1	36 022 3	0 026 1	0 007 4	0 999 5
2	12 711 3	6 028 7	32 526 3	0 037 0	0 013 9	0 999 0	12 714 9	6 027 9	32 527 5	0 037 0	0 014 0	0 999 0

表 4 对 Sailboat 图像融合得到的融合性能评价

Tab 4 The fusion evaluation of image Sailboat

层数	本文方法						文献 [3] 方法					
	$f_s$	RMSE	PSNR (dB)	DDR	$E_c$	SM	$f_s$	RMSE	PSNR (dB)	DDR	$E_c$	SM
7	21 371 7	1 238 0	46 276 6	0 005 7	0 001 3	1 000 0	21 280 5	1 971 2	42 236 2	0 014 6	7 465 0e-004	0 999 9
6	21 371 6	1 180 7	46 688 2	0 005 0	9 590 5e-004	1 000 0	21 280 3	1 934 6	42 399 1	0 022 8	8 165 0e-004	0 999 9
5	21 370 6	1 141 8	46 978 9	0 004 4	9 631 9e-004	1 000 0	21 278 7	1 916 7	42 479 9	0 012 0	8 363 0e-004	0 999 9
4	21 357 4	1 211 3	46 465 6	0 006 2	0 001 3	1 000 0	21 265 2	1 959 2	42 289 4	0 015 1	9 863 6e-004	0 999 9
3	21 214 8	1 998 7	42 115 7	0 013 9	0 002 2	0 999 9	21 130 4	2 462 5	40 303 3	0 018 0	0 002 0	0 999 8
2	20 354 6	4 139 7	35 791 5	0 028 8	0 003 5	0 999 6	20 311 0	4 250 1	35 562 8	0 029 4	0 003 4	0 999 5



(a) 标准参考图像



(b) 聚焦右侧的图像



(c) 聚焦左侧的图像



(d) 采用本文方法得到的最终融合图像



(e) 标准参考图像



(f) 聚焦远景的图像



(g) 聚焦近景的图像



(h) 采用本文方法得到的最终融合图像

图 2 仿真结果

Fig. 2 The result of emulator

## 4 结 论

本文提出了一种同时考虑高频部分和低频部分的基于均值的方向对比度的小波变换图像融合算法,通过实验比较发现,本文方法所得到融合图像的客观质量较文献[3]中提出的基于像素的方向对比度法有所提高。适用于对图像的精度要求较高场合。

### 参考文献 (References)

- 1 Tan Zheng Bao Fumin, Li Aiguo *et al* Digital Image Fusion [M]. Xi'an Xi'an Jiaotong University Press, 2004 1~2 [覃征, 鲍复民, 李爱国等著. 数字图像融合 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004 1~2 ]
- 2 Toet A. Hierarchical image fusion[J]. Machine Vision and Applications, 1990, 3(1): 1~ 11.
- 3 Pu Tian Fang Qing-ji Ni Guo-qiang Contrast-based multiresolution image fusion[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 116~ 118 [蒲恬, 方庆吉, 倪国强. 基于对比度的多分辨率图像融合 [J]. 电子学报, 2000, 28(12): 116~ 118 ]
- 4 Wang Hong Jing Zhong-liang Li Jian-xun Research and development of multiresolution image fusion[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(1): 145~ 151 [王宏, 敬忠良, 李建勋. 多分辨率图像融合的研究与发展 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 145~ 151.]
- 5 Toet A, Ruynen L van, Velaton J Merging thermal and visual images by a contrast pyramid[J]. Optical Engineering, 1989, 28(7): 789~ 792
- 6 Yang Zhij Mao Shiyi Chen Wei New image fusion algorithm based on wavelet contrast[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(2): 209~ 211. [杨志, 毛士艺, 陈炜. 一种新的基于小波对比度的图像融合算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 209~ 211.]