

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2011.08.015

## 基于小波的磨粒图像融合方法研究\*

李绍成<sup>1</sup> 朱典想<sup>1</sup> 左洪福<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学工业学院 江苏南京 210037; 2. 南京航空航天大学民航学院 江苏南京 210016)

**摘要:** 针对油液磨粒检测需要, 基于彩色空间变换和小波分析理论, 研究磨粒多聚焦图像融合方法。该方法采用邻域梯度特征因子取大法来选取多聚焦图像清晰区域的低频系数, 以进行低频融合系数的确定; 采用建立新系数带以及系数取大法来进行高频融合小波系数的选取。分析小波基和分解层数对磨粒多聚焦图像融合效果的影响, 结果表明, 在分解层数为 5 时, 采用 db4、sym4、bior2.4 小波基进行磨粒多聚焦图像融合均可获得较好的融合效果。

**关键词:** 磨粒检测; 多聚焦图像; 小波; 图像融合

中图分类号: TH17 文献标识码: A 文章编号: 0254-0150 (2011) 8-059-4

## Research on Fusion Method of Wear Particle Image Based on Wavelet

Li Shaocheng<sup>1</sup> Zhu Dianxiang<sup>1</sup> Zuo Hongfu<sup>2</sup>

(1. College of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** For the demand of wear particle detection, wear particle multi-focus image fusion method was studied based on color space conversion and wavelet analysis theory. The low frequency fusion coefficients from the clear regions were selected based on the characteristic factor of neighborhood gradient. The high frequency fusion coefficients were selected based on absolute value maximum by establishing new high frequency sub-band. The effects of wavelet base and decomposition layer on wear particle image fusion were studied respectively. The results show that better fusion effect can be obtained by using the wavelet base of db4, sym4 or bior2.4 when the decomposition layer is five.

**Keywords:** wear particle detection; multi-focus image; wavelet; image fusion

油液磨粒检测是一种重要的机器磨损状态监测方法, 根据油液磨粒检测信息, 可以了解设备的磨损状况, 并可以进一步预测设备的性能和故障发展趋势, 为视情维修提供分析与决策依据, 从而确保设备运行可靠。

由于油液中的磨粒尺寸一般在 200  $\mu\text{m}$  以下, 需要利用显微图像系统进行磨粒识别和统计。为了准确地获得磨粒的形态尺寸信息, 需要在大倍物镜下采集磨粒的图像, 由于显微图像系统的景深有限, 在磨粒厚度较大的情况下, 难以获得整个视场清晰的磨粒图像, 为此, 首先需要采集磨粒多聚焦图像, 然后进行多聚焦图像融合以得到整个视场清晰的磨粒图像。本文作者对油液磨粒检测中的多聚焦图像融合方法进行了深入研究。

\* 基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 南京林业大学高学历人才基金 (B2010-31)。

收稿日期: 2011-02-27

作者简介: 李绍成 (1972—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为设备状态监测与故障诊断。E-mail: chenglshao@163.com。

### 1 磨粒多聚焦图像采集方法及特点

作者设计开发了图 1 所示的磨粒图像检测系统, 该系统主要由光学显微镜、数码相机、步进电机及其驱动器、计算机构成, 其中三个步进电机分别用于载物台前后、左右移动, 以及显微镜自动聚焦。

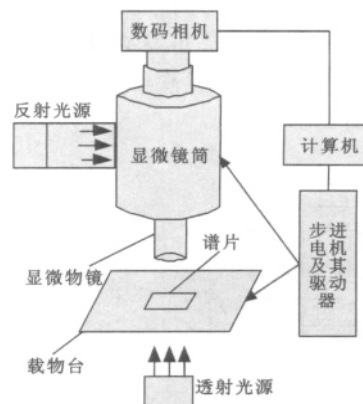


图 1 磨粒图像采集系统

Fig 1 Wear particle image capture system

为了准确地提取磨粒信息,在利用图 1 所示的系统进行磨粒检测时,一般采用放大倍数为 10 000 以上的物镜,但是随着物镜放大倍数的增大,系统景深越小,对于厚度大于系统景深的磨粒,无法在整个视场上获得清晰的磨粒图像,为此,需要采集磨粒多聚焦图像。

多聚焦磨粒图像采集方法与过程如下:首先通过调整显微镜载物台的位置,使磨粒最高部位成像清晰,在此位置上采集磨粒的图像,然后控制步进电机使载物台向下移动一定的距离,该距离略小于显微成像系统的景深,在此位置上采集磨粒的图像,依此方法在各个位置上采集磨粒的图像,直至采集到磨粒最低部位的清晰图像。显然,多聚焦磨粒序列图像的特点是每幅图像有聚焦清晰区域和模糊区域,但是序列图像中包含了整幅磨粒图像的清晰区域,因此,对磨粒多聚焦图像进行像素级图像融合,可以得到整个视场清晰的磨粒图像,如图 2 所示。

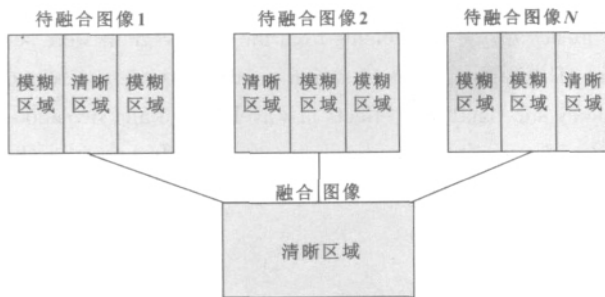


图 2 磨粒多聚焦图像融合示意图

Fig 2 Wear particle multi-focus image fusion schematic

## 2 基于小波的磨粒图像融合规则

### 2.1 基于小波变换的图像融合原理

以两幅图像的融合为例(对于多幅图像的融合方法可依此类推),设 A、B 为两幅原始图像,F 为融合后的图像,基于小波变换的图像融合过程如图 3 所示<sup>[2]</sup>,融合步骤为:

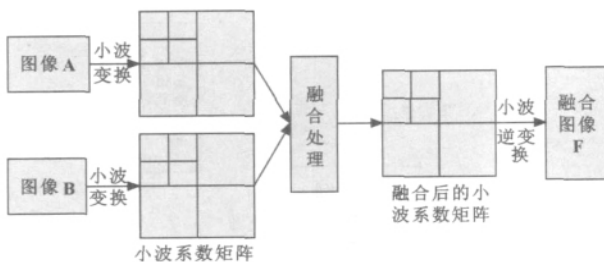


图 3 基于小波变换的图像融合原理

Fig 3 Image fusion principle based on wavelet transform

(1) 对源图像分别进行多层小波分解;

(2) 对各个分解层分别按照一定的融合规则进行融合处理;

(3) 对融合后的小波图像进行小波逆变换,得到重构图像。

### 2.2 基于小波变换的磨粒图像融合规则

在对图像进行小波分解后,关键是选择合适的融合规则对分解后的小波系数进行融合处理。低频系数反映图像的轮廓信息,系数间的相关性高,而基于区域的融合规则体现了图像像素与相邻像素的相关性,因此,可以采用基于区域的融合算法;高频系数反映图像的细节信息,系数间的相关性较低,可以采用基于单个像素点的融合算法<sup>[3]</sup>。

由于磨粒多聚焦序列图像中包含了整幅图像的清晰区域,如果采用源图像中的清晰区域的图像作为该区域的融合图像,就可以得到整幅清晰的磨粒图像。因此,低频系数的融合实际上就是选取清晰区域的低频系数的过程,本文作者采用邻域梯度特征因子取大法来选取清晰区域的低频系数,计算公式如下(设区域大小为  $3 \times 3$ ):

$$G(x, y) = \sum_{m, n \in S} H(m, n) L(x + m, y + n) \quad (1)$$

$$H = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $L(m, n)$  为图像分解得到的低频子图像在  $(m, n)$  点的系数;  $S$  为窗口区域;  $H$  为掩膜矩阵。

由光学系统成像原理可知,聚焦良好的图像对应的成像系统函数的带宽比较宽,而模糊图像对应的成像系统函数的带宽比较窄<sup>[4]</sup>。因此,清晰图像的高频系数远大于模糊图像的高频系数,可以采用小波系数绝对值取大法作为高频系数的融合规则。但是采用绝对值取大法的融合规则存在融合图像同一层各高频子带中的对应系数可能来自于不同的图像,这将造成融合图像中清晰图像对应的高频信息的损失<sup>[3]</sup>。

为解决上述问题,将多聚焦图像同一层中的 3 个子带小波系数分别进行绝对值相加,得到新系数带,比较各新系数带,采用系数取大法来进行融合系数的选取,从而保证各高频子带融合小波系数选自同一清晰图像。

### 3 基于小波与彩色空间变换的磨粒图像融合

本系统通过数码相机采集的磨粒图像是 24 位真彩色图像,由于 RGB 空间感知上不均匀,其分量不仅表示色度也表示亮度,存在很大的相关性,对三个分量分别处理将会带来颜色信息的丢失和错乱<sup>[5]</sup>。YIQ 是一个比较好的颜色空间,在 YIQ 空间中, Y 分

量代表了亮度,  $I$  和  $Q$  分别代表了红青色分量和绿红色分量。 $YIQ$  系统在保持良好彩色特性的同时减小了信号的频带宽度, 另外,  $YIQ$  空间对色彩分量之间的冗余信息是最少的<sup>[6]</sup>。因此, 本文作者将图像从  $RGB$  空间转换到  $YIQ$  空间进行小波图像融合。

$RGB$  空间与  $YIQ$  空间转换公式为:

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.956 & 0.624 \\ 1 & -0.272 & -0.647 \\ 1 & -1.106 & 1.703 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} \quad (4)$$

因此, 本文的磨粒图像融合过程如图 4 所示, 具体步骤为:

- (1) 对磨粒图像进行彩色空间转换, 即将磨粒彩色图像由  $RGB$  空间转换到  $YIQ$  空间;
- (2) 对源图像中  $Y$ 、 $I$ 、 $Q$  各子空间图像分别进行小波分解, 并按照上述的融合规则分别进行融合处理;
- (3) 对融合后的小波图像进行彩色空间反变换, 即由  $YIQ$  空间转换到  $RGB$  空间, 得到磨粒融合彩色图像。

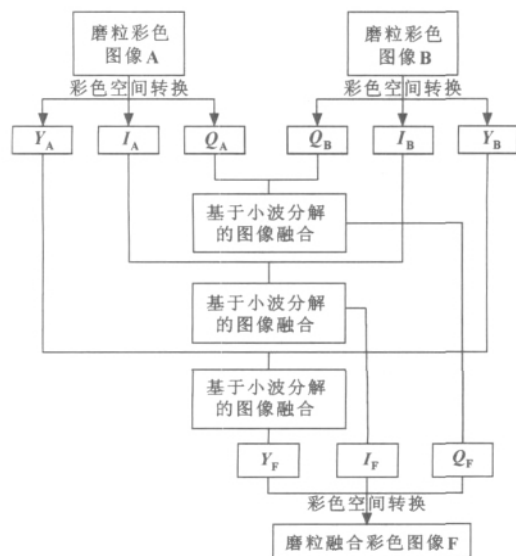


图 4 基于小波和彩色空间变换的磨粒图像融合

Fig 4 Wear particle image fusion based on wavelet and color space conversion

#### 4 磨粒图像融合结果分析

根据图 4 所示的融合原理, 在进行磨粒图像融合时, 还涉及到小波基与分解层数的选择问题, 不同的

选择对融合结果会产生一定的影响。为了得到较高质量的磨粒融合图像, 下面对小波基、小波分解层数的选取对融合结果的影响进行详细分析。

##### 4.1 小波基对融合结果的影响分析

基于小波变换的图像融合是以图像小波变换后各尺度的小波系数为基础的, 而小波基的选取又在一定程度上影响着小波系数的分布, 因此小波基的选取直接影响到融合的效果。小波基的选取应注意 4 个方面的因素<sup>[7]</sup>: 正交性、紧支性、对称性和平滑性, 但是要同时满足这些特性是比较困难的。在对常用小波基特性分析、比较的基础上, 本文作者选用 db4、sym4、bior2.4 这 3 种小波基进行磨粒多聚焦图像融合。

为了便于分析研究, 从磨粒多聚焦序列图像中选取两幅具有代表性的图像, 如图 5 所示。图 6 中的 (a)、(b)、(c) 为分别利用 db4、sym4、bior2.4 小波基, 按照前面提出的融合规则得到的融合图像, 其中, 小波分解层数为 4。由图 6 可以看出, 融合图像涵盖了两幅多聚焦图像的清晰区域, 具有较好的融合效果。

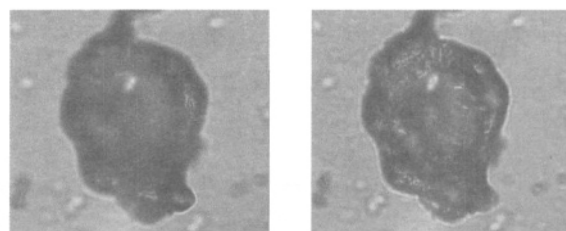
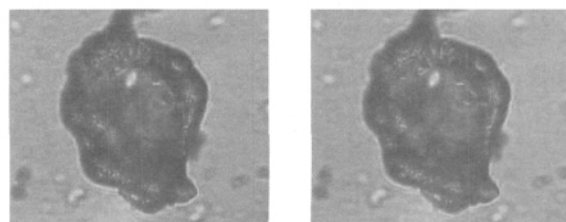


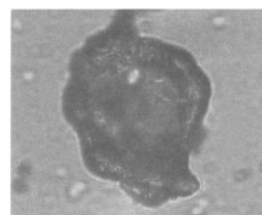
图 5 磨粒多聚焦图像

Fig 5 Wear particle multi-focus images



(a) db4

(b) sym4



(c) bior2.4

图 6 基于小波变换的磨粒融合图像

Fig 6 Fused wear particle images based on wavelet

为了对比分析具体的融合效果，基于磨粒图像特点，选择了 3 个评价指标<sup>[8]</sup>：信息熵  $E$ 、平均梯度  $\bar{G}$ 、交互信息量  $MI$ 。图 6 对应的融合效果如表 1 所示，可以看出，利用本文选择的 3 种小波基进行磨粒图像融合，融合图像的 3 个评价指标值差别较小，表明选择的 3 种小波基都适合磨粒多聚焦图像融合。进一步利用不同的磨粒多聚焦图像进行融合分析，分析结果与上述结论是一致的。

表 1 不同小波基融合效果比较  
Table 1 Fusion effect comparison for different wavelet

评价指标		小波基		
		db4	sym4	bior2.4
$E$	$R$	6.355 3	6.353 5	6.336 2
	$G$	6.613 8	6.601 7	6.616 1
	$B$	6.518 4	6.523 1	6.531 2
$\bar{G}$	$R$	2.428 3	2.420 5	2.410 7
	$G$	2.406 7	2.406 9	2.405 1
	$B$	3.941 2	3.928 1	3.916 7
$MI$	$R$	12.646 9	12.681 4	12.615 0
	$G$	13.940 6	14.014 1	13.974 5
	$B$	11.572 2	11.628 3	11.649 9

4.2 小波分解层数对融合结果的影响分析

在利用小波进行图像融合时，小波变换的层数越多，融合的频率范围越丰富，融合结果的细节也就越丰富，但并不是说小波分解层数越多，图像融合的质量就越高<sup>[9]</sup>。为了研究不同的分解层数对图像融合效果的影响，对图 5 中的磨粒图像，利用 bior2.4 小波在不同的分解层数下进行融合分析，融合结果如图 7 所示，融合效果如表 2 所示。

表 2 不同分解层数融合效果比较  
Table 2 Fusion effect comparison for different decomposition levels

层数	$E$			$\bar{G}$		
	$R$	$G$	$B$	$R$	$G$	$B$
2	6.355 6	6.581 5	6.506 3	2.447 2	2.421 2	3.935 9
3	6.358 6	6.608 3	6.524 2	2.448 3	2.421 7	3.938 5
4	6.359 2	6.616 1	6.531 2	2.450 7	2.425 1	3.939 7
5	6.362 4	6.652 9	6.546 6	2.462 6	2.425 8	3.936 1
6	6.361 3	6.653 9	6.559 4	2.463 3	2.423 5	3.936 7
7	6.362 7	6.671 3	6.568 2	2.408 0	2.402 8	3.917 2

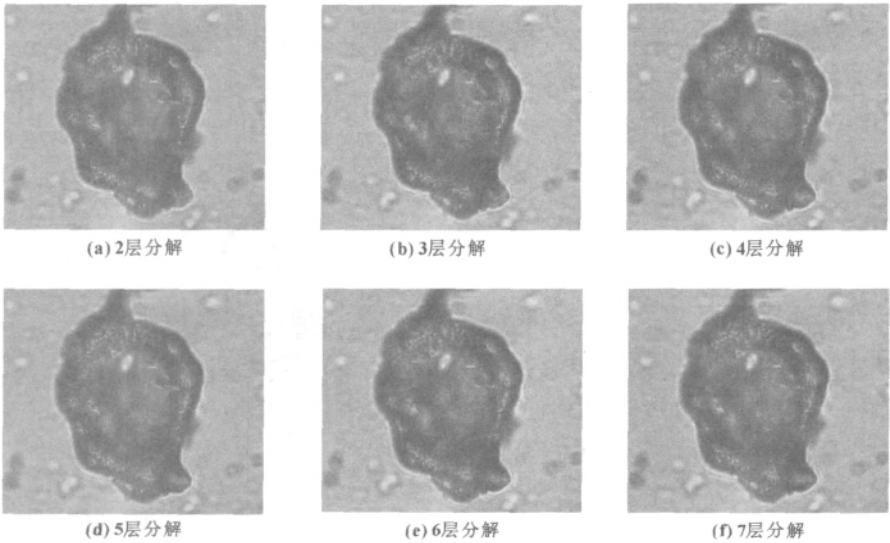


图 7 基于 bior2.4 小波的不同分解层数的磨粒融合图像

Fig 7 Fused wear particle images based on bior2.4 and different decomposition levels (a) two levels; (b) three levels; (c) four levels; (d) five levels; (e) six levels; (f) seven levels

由表 2 可以看出，对于分解层数在 2~5 范围时，随着分解层数增大，融合图像的信息熵、平均梯度逐

渐增大，融合质量提高，但是分解层数继续增大，融合图像的质量变化较小。结合主观评（下转第 73 页）

能,特别是当  $\text{MoO}_3$  的质量分数达到 4% 时,其抗磨性能优于二硫化钼锂基脂。

(3) 总的来说,  $\text{MoO}_3$  自身具备较好的抗磨性能,在润滑油应用时需对其分散问题做进一步的深入研究,但在润滑脂中已经具备实际应用的价值和前景。

#### 参考文献

- 【1】Xie Feng ,Hu Jianqiang ,Yao Junbing ,et al. Antiwear synergism between organomolybdenum compounds and a ZnDDP [J]. Lubrication Science 2006 ,18( 1) : 1 - 5.
- 【2】Xie Feng ,Hu Jianqiang ,Zheng Fazheng ,et al. Antiwear performance of organomolybdenum compounds as lubricant additives [J]. Lubrication Science 2007 ,19( 2) : 81 - 85.
- 【3】谢凤 胡建强 郑发正 等. 非活性有机钼与二烷基二硫代磷酸锌的抗磨协同效应 [J]. 石油学报: 石油加工, 2007 ,23( 2) : 24 - 27.  
Xie Feng ,Hu Jianqiang ,Zheng Fazheng ,et al. Antiwear synergism between organic molybdate containing no sulphur and phosphorus and ZnDDP [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section 2007 23( 2) : 24 - 27.
- 【4】任引哲 王建英 王玉湘 等. 纳米级  $\text{MoO}_3$  微粉的制备与性质 [J]. 化学通报 2002 65( 1) : 47 - 49.  
Ren Yinzhe ,Wang Jianying ,Wang Yuxiang ,et al. Preparation and characterization of nanometer-sized ultrafine powers  $\text{MoO}_3$

[J]. Chemistry 2002 65( 1) : 47 - 49.

- 【5】王鹏 朱新河 吕静. 油酸修饰纳米镍粒子对润滑油摩擦学性能的影响 [J]. 润滑与密封 2010 35( 8) : 70 - 73.  
Wang Peng ,Zhu Xinhe ,Lv Jing. The effects of oleic acid modified nano-nickel particles on tribological characteristics of lubricating oil [J]. Lubrication Engineering 2010 35( 8) : 70 - 73.
- 【6】陈传盛 刘天贵 陈小华 等. 油酸修饰碳纳米管及其摩擦性能的研究 [J]. 润滑与密封 2007 32( 12) : 23 - 26.  
Chen Chuansheng ,Liu Tianguai ,Chen Xiaohua ,et al. Modified multi-walled carbon nanotubes with oleic acid and their tribological properties [J]. Lubrication Engineering 2007 32( 12) : 23 - 26.
- 【7】赵修臣 刘颖 王富耻. 添加油酸修饰的纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子润滑油的摩擦学性能研究 [J]. 润滑与密封 2005 30( 1) : 103 - 105.  
Zhao Xiuchen ,Liu Ying ,Wang Fuchi. Study on the tribological properties of the oils adding oleic acid-modified  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles [J]. Lubrication Engineering 2005 30( 1) : 103 - 105.
- 【8】付洪瑞 王士钊 刘东志 等. 油酸修饰纳米铜粉的摩擦学性能研究 [J]. 润滑与密封 2007 32( 4) : 150 - 152.  
Fu Hongrui ,Wang Shizhao ,Liu Dongzhi ,et al. Investigation on tribological performance of nanon Cu powder modified by oleic acid [J]. Lubrication Engineering 2007 32( 4) : 150 - 152.

(上接第 62 页) 价分析,本文得到如下结论: 磨粒多聚焦图像小波变换融合时,小波分解层数为 5 时可以获得较好的融合效果。利用不同的磨粒多聚焦图像进行融合分析,分析结果进一步验证了上述结论。

#### 5 结论

研究了基于彩色空间变换和小波分析的磨粒多聚焦彩色图像融合方法,分别研究了小波基和小波分解层数对磨粒图像融合效果的影响,研究结果表明,在分解层数为 5 时,采用 db4、sym4、bior2. 4 小波基进行融合均可获得较好的融合效果。

#### 参考文献

- 【1】夏志新. 液压系统污染控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- 【2】Li H ,Manjunath B S ,Mitra S K. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform [J]. Graphical Models and Image Processing ,1995 57( 3) : 235 - 245.
- 【3】孙巍 王珂 袁国良 等. 基于复数小波域的多聚焦图像融合 [J]. 中国图象图形学报 2008 13( 5) : 951 - 957.  
Sun Wei ,Wang Ke ,Yuan Guoliang ,et al. A multi-focus image fusion algorithm in the complex wavelet domain [J]. Journal of Image and Graphics 2008 13( 5) : 951 - 957.
- 【4】那彦 杨万海 方凯. 一种新的可见光图像融合方法 [J]. 电

路与系统学报 2004 9( 2) : 146 - 148.

- Na Yan ,Yang Wanhai ,Fang Kai. A new method for visual light image fusion [J]. Journal of Circuits and Systems 2004 9( 2) : 146 - 148.
- 【5】汪强 尹峰 刘钢钦. 基于小波的彩色图像融合技术 [J]. 计算机仿真 2005 22( 11) : 201 - 204.  
Wang Qiang ,Yin Feng ,Liu Gangqin. The color image fusion algorithm using wavelet transform [J]. Computer Simulation , 2005 22( 11) : 201 - 204.
- 【6】Russ J C. The image processing handbook. Boca Raton: CRC Press ,1995.
- 【7】秦定宇 王敬东 李鹏. 图像融合中小波基的选择分析 [J]. 光电子技术 2006 26( 3) : 203 - 207.  
Qin Dingyu ,Wang Jingdong ,Li Peng. Wavelet base selection and evaluation for image fusion [J]. Optoelectronic Technology , 2006 26( 3) : 203 - 207.
- 【8】Qu G ,Zhang D ,Yan P. Information measurement for performance of image fusion [J]. Electronics Letters 2002 38( 7) : 313 - 315.
- 【9】Zhang Z ,Blum R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. Proc of IEEE ,1999 ,87( 8) : 1315 - 1326.