

文章编号: 0253-2239(2007)01-0040-5

# 基于形态学 4 子带分解金字塔的图像融合\*

赵 鹏<sup>1,2</sup> 浦昭邦<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学自动化测量与控制系, 哈尔滨 150001)  
(<sup>2</sup> 东北林业大学信息学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 提出了一种基于数学形态学滤波的多分辨率图像融合。这种融合方法使用了形态学开闭运算构造了低通与高通滤波器, 将原始图像分解为 4 子带图像金字塔和 4 子带方向衬比度图像金字塔。然后利用方向衬比度和区域标准差进行图像融合得到融合的 4 子带图像金字塔, 最后应用子带图像重构得到融合图像。融合实验表明, 该方法优于传统的形态学金字塔图像融合, 衬比度金字塔图像融合和小波分解图像融合。

**关键词:** 图像处理; 图像融合; 数学形态学; 多分辨率; 方向衬比度; 4 子带分解

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

## Image Fusion Based on Morphological 4-Subband Decomposition Pyramid

Zhao Peng<sup>1,2</sup> Pu Zhaobang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Automation Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)  
(<sup>2</sup> Information Institute, Northeast Forestry University, Harbin 150040)

**Abstract:** A novel multi-resolution image fusion based on mathematical morphological filtering is proposed. This fusion scheme constructs the low-pass and high-pass filters with morphological opening and closing operators. The original image is then decomposed into 4-subband image pyramid and 4-subband direction contrast image pyramid. The image fusion is performed by the direction contrast and region standard deviation to get the fused 4-subband image pyramid. The final fused image is formed with the subband image reconstruction. The fusion experiments indicate this image fusion is superior to the traditional fusion based on the morphological pyramid, contrast pyramid and wavelet decomposition.

**Key words:** image processing; image fusion; mathematical morphology; multi-resolution; direction contrast; 4-subband decomposition

## 1 引 言

图像融合就是利用各种成像传感器不同的成像方式, 提供互补信息, 增加图像的信息量以便获得更可靠更准确的图像信息供观察和进一步处理, 它在地理信息系统、机器视觉和生物医学工程等领域有广泛应用<sup>[1,2]</sup>。图像融合分为像素级融合、特征级融合和决策级融合 3 个层次, 其中像素级融合主要使用了多分辨率方法, 常用的有拉普拉斯(Laplacian)金字塔及

其派生结构<sup>[3,4]</sup>, 小波变换及多小波分解法<sup>[5~9]</sup>, 梯度及纹理金字塔结构<sup>[10,11]</sup>等。

Toet 最早提出了基于数学形态学的多分辨率图像分析法, 这种方法在图像处理、机器视觉领域得到广泛应用<sup>[12]</sup>。在此基础上 Matsopoulos 和 Marshall 使用了基于形态学金字塔的图像融合方法, 将其成功应用于磁共振图像(MR)和计算机 X 射线层析术(CT)医学图像融合<sup>[13]</sup>。这种融合使用

\* 黑龙江省科技攻关项目(20020101438)资助课题。

作者简介: 赵 鹏(1972—), 黑龙江阿城市人, 讲师, 博士研究生, 主要从事视觉检测、视觉跟踪、图像融合方面的研究。  
E-mail: impanefu@yahoo.com.cn

导师简介: 浦昭邦(1940—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师。主要从事视觉检测、视觉跟踪、图像融合方面的研究。  
E-mail: zbpu@hope.bit.edu.cn

收稿日期: 2006-02-14; 收到修改稿日期: 2006-04-24

了平凡结构性元素对原始图像和各级子图像进行滤波和下采样处理,进而构造相应的差分图像金字塔并且进行融合及重建处理。

Pei 和 Chen<sup>[14]</sup>应用数学形态学将图像分解成 4 个子带图像,构造了相应的子带图像金字塔,这种方法具有易于实现和保持各级图像细节等优点。本文对这种子带分解方法作了两点改进。首先,由于人类视觉系统对图像的局部衬比度敏感,如果在子带图像分解中引入方向衬比度就可能具有更好的表示效果;其次,我们将子带分解图像金字塔和子带方向衬比度图像金字塔应用于图像融合,提出了一种新颖的数学形态学多分辨力图像融合方法,取得了较好的融合效果。

## 2 子带分解图像金字塔

### 2.1 子带分解图像

在文献[14]中,Pei 和 Chen 利用交替连续的形态学开闭运算构造了一维形态学低通滤波器,显然,它能够平滑掉比结构元素小的图像噪声。相应的高

通滤波器就是低通滤波器的互补形式,具体的表达形式如下:

$$H_0(X) = \text{closing}[\text{opening}(X)] = (X \circ B) \bullet B, \quad (1)$$

$$H_1(X) = X - H_0(X), \quad (2)$$

这里的  $X$  为原始图像,  $B$  为结构性元素,“ $\circ$ ”表示“开”运算,“ $\bullet$ ”表示“闭”运算,  $H_1(X)$ ,  $H_0(X)$  分别表示相应的高通和低通滤波器。和线性滤波器比较,形态学滤波中的结构性元素  $B$  的选取很重要,它的长度和方向决定了通带带宽和滤波器谱方向,  $B$  越大,滤波器的通带越窄。将一维的水平垂直方向滤波器通过重叠运算就形成了二维的 4 子带分解滤波器:

$$\begin{cases} H_{00}(X) = H_0^V[H_0^H(X)], \\ H_{01}(X) = H_1^V[H_0^H(X)], \\ H_{10}(X) = H_0^V[H_1^H(X)], \\ H_{11}(X) = H_1^V[H_1^H(X)], \end{cases} \quad (3)$$

这里的  $H_{00}(X)$ ,  $H_{01}(X)$ ,  $H_{10}(X)$ ,  $H_{11}(X)$  分别表示原始图像的 LL, LH, HL 和 HH 滤波器,具体的子带分解过程如图 1,子带重构过程如图 2,选用  $B$  为平凡条形结构性元素。

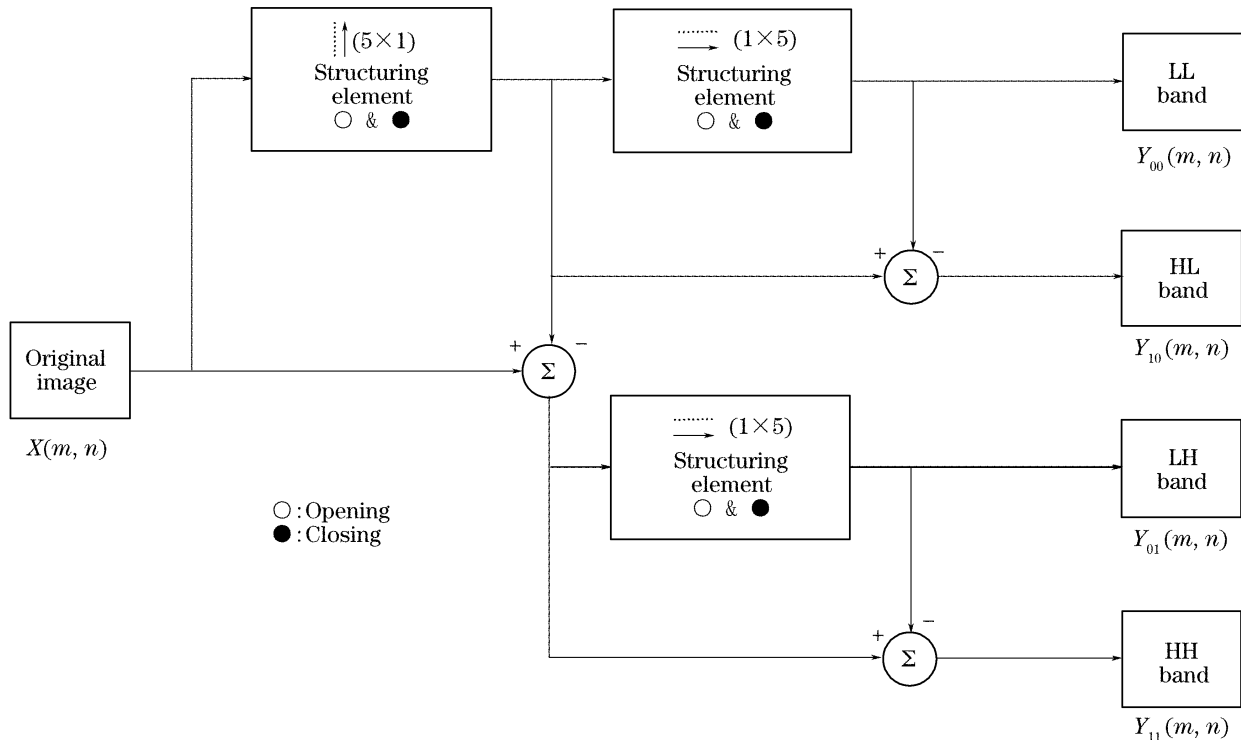


图 1 应用形态学滤波器的图像 4 子带分解流程图

Fig. 1 Flow chart of the image 4-subband decomposition with morphological filters

### 2.2 子带分解图像金字塔

子带分解图像的多分辨力分级表示就构成了子带分解图像金字塔,它的基本步骤为:首先,原始图像  $X(m, n)$  分解为 4 个子带图像,分别为

$$\text{低频带 } y_{00}(m, n) = y_{00}^0(m, n),$$

$$\text{垂直带 } y_{10}(m, n) = y_{10}^0(m, n),$$

$$\text{水平带 } y_{01}(m, n) = y_{01}^0(m, n),$$

$$\text{对角带 } y_{11}(m, n) = y_{11}^0(m, n).$$

其次,再对低频带  $y_{00}(m, n)$  重复上述过程,将其进一步分解为 4 个子带图像  $y_{00}^1(m, n)$ ,  $y_{10}^1(m, n)$ ,  $y_{01}^1(m, n)$ ,  $y_{11}^1(m, n)$ 。不断重复上述过程,就形成子带分解图像金字塔。

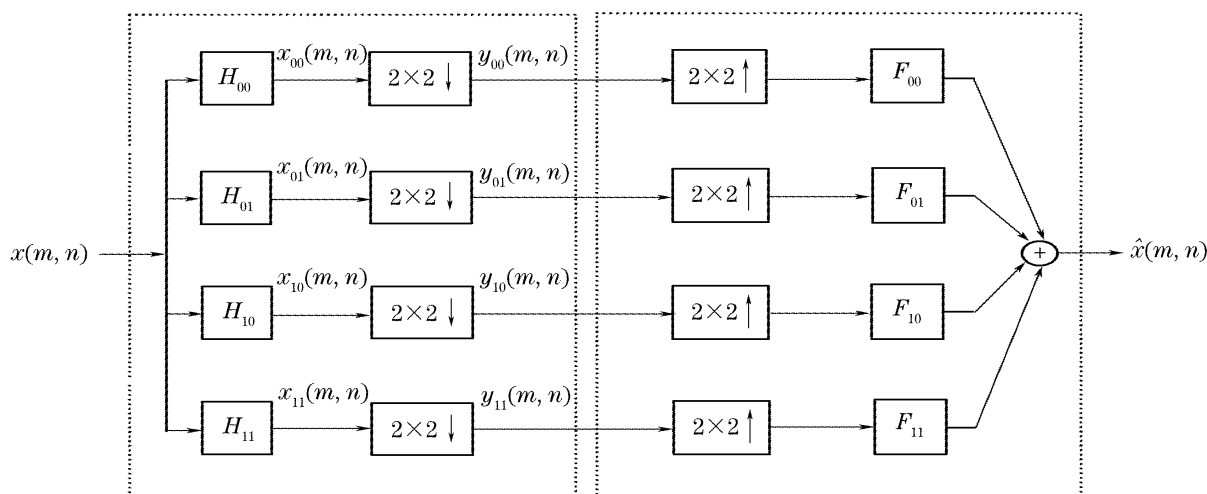


图 2 应用形态学滤波器的图像 4 子带重构流程图

Fig. 2 Flow chart of the image 4-subband reconstruction with morphological filters

### 3 子带方向衬比度图像金字塔及图像融合

#### 3.1 子带方向衬比度图像金字塔

人类的视觉系统对图像衬比度变化十分敏感, Campbell 的实验表明<sup>[15]</sup>, 人类的视网膜图像就是在不同的频率通道中进行治疗的。因此, 这就启发我们应该将文献[14]中的子带分解图像金字塔作进一步改进处理, 建立相应的子带方向衬比度图像金字塔, 使其更好地在图像融合计算机视觉领域中得到应用。这里的图像衬比度定义为

$$C = \frac{L - L_B}{L_B} = \frac{L_H}{L_B}, \quad (4)$$

(4)式中  $L$  表示图像局部灰度,  $L_B$  表示图像局部背景灰度,  $L_H$  表示图像局部高频分量, 根据(4)式, 将子带方向衬比度图像金字塔定义为

$$\begin{cases} C_{i0}^i(m, n) = y_{i0}^i(m, n) / y_{00}^i(m, n), \\ C_{i1}^i(m, n) = y_{i1}^i(m, n) / y_{00}^i(m, n), \\ C_{i2}^i(m, n) = y_{i2}^i(m, n) / y_{00}^i(m, n), \\ i = 0, 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

#### 3.2 图像融合步骤

设  $A, B$  为两幅源图像, 其融合的基本步骤为

1) 对每一源图像分别进行子带分解, 建立相应的子带分解图像金字塔和子带方向衬比度图像金字塔;

2) 对子带分解图像金字塔的各分解层分别进行融合处理, 不同的分解层采用不同的融合算子, 这样最终得到融合子带分解图像金字塔;

3) 将各级融合子带分解图像, 应用文献[14]中的子带图像重构过程重建原始融合图像。

#### 3.3 图像融合规则

传统的多分辨力图像融合只是单纯地在高频分量和低频分量上制定不同的融合规则, 没有考虑低频分量子带和相应的高频分量子带的关系, 即没有考虑方向衬比度这一重要信息。而生理学研究表, 人类的视觉系统对图像方向衬比度变化十分敏感。因此, 如果充分利用子带方向衬比度图像金字塔的空间频率和方向性, 制定相应的基于方向衬比度的图像融合规则, 就有可能针对人眼的频率特性和方向特征获得更好的融合图像。

设  $A, B$  为两幅源图像, 相应的融合规则为

1) 融合图像  $F$  的低频部分取作各源图像子带分解后低频部分的平均值:

$$y_{00}^N(F)(m, n) = \frac{y_{00}^N(A)(m, n) + y_{00}^N(B)(m, n)}{2}, \quad (6)$$

其中  $y_{00}^N(A), y_{00}^N(B)$  分别表示源图像  $A, B$  在最高分解尺度  $N$  上的低频分量,  $y_{00}^N(F)$  表示融合图像在最高分解尺度  $N$  上的低频分量。

2) 在最高分解尺度上, 根据  $A, B$  图像的 3 个方向高频分量的方向衬比度值, 对应比较  $A, B$  图像的各方向衬比度, 取绝对值大的方向衬比度所对应的图像  $A$  或  $B$  的高频分量作为融合图像  $F$  对应方向的高频分量。

$$\begin{cases} y_{i0}^N(F)(m, n) = y_{i0}^N(A)(m, n), \\ \quad \text{if } C_{i0}^N(A)(m, n) \geq C_{i0}^N(B)(m, n) \\ y_{i0}^N(F)(m, n) = y_{i0}^N(B)(m, n), \\ \quad \text{if } C_{i0}^N(A)(m, n) < C_{i0}^N(B)(m, n) \end{cases} \quad (7)$$

上式给出了垂直高频分量的融合选取规则, 水平和

对角高频分量的融合选取和(7)式类似,这里省略。

3) 在最高分解尺度以外的各子带分解尺度上,根据  $A, B$  图像的 3 个方向高频分量的方向衬比值,对应比较中心处理像素的局部区域的标准差值(局部区域选为区域),取较大的标准差对应的高频分量作为融合后对应方向的高频分量:

$$\begin{cases} y_{i_0}^i(F)(m, n) = y_{i_0}^i(A)(m, n), \\ \text{STD}_{i_0}^i(A)(m, n) \geq \text{STD}_{i_0}^i(B)(m, n) \\ y_{i_0}^i(F)(m, n) = y_{i_0}^i(B)(m, n), \\ \text{STD}_{i_0}^i(A)(m, n) < \text{STD}_{i_0}^i(B)(m, n) \end{cases} \quad (8)$$

(8)式给出了垂直高频分量的融合选取规则,其中,STD(Standard deviation)表示标准差,水平和对角高频分量的融合选取和(8)式类似,这里省略。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 多聚焦图像融合

我们使用了标准测试的多聚焦 lab 图像,图 3(a)为左聚焦图像,钟表轮廓清晰,而图 3(b)为右聚焦图像,人体与 3M 方形盒子轮廓清晰。图 3(c)为应用本文方法得到的融合全聚焦图像。为了对比融合效果,又对多聚焦实验室图像应用了衬比值金字

塔融合法(CP)<sup>[16]</sup>,小波变换融合法(DWT)<sup>[17]</sup>以及形态学金字塔融合法(MP)<sup>[13]</sup>,并且在融合过程中选择的特性局部区域均为  $3 \times 3$  区域,分解层数均为 6 层。关于衬比值金字塔融合法,本文采用了文献[16]提出的衬比值金字塔方法,但是融合规则没有采用基于区域特性量测的选择加权融合算子,仍然采用基于区域标准差最大准则的选择融合算子。关于 DWT,本文使用的离散小波选用了 Daubechies 小波系中的小波基 db8,并且融合规则仍然采用了平均算子(低频子带),基于绝对值最大准则的选择融合算子(最高尺度上的 3 个高频子带),基于区域标准差最大准则的选择融合算子(其他尺度上的各高频子带)。关于 MP,按照文献[13]的方法,我们首先应用形态学“开”运算和下采样建立形态学金字塔;其次,应用形态学“闭”运算和差分运算建立差分图像金字塔;最后,在融合过程中,仍然采用了基于区域标准差最大准则的选择融合算子,没有采用文献[13]的基于绝对值最大准则的选择融合算子。这样,在金字塔分解层数和特性局部区域都严格相同,图像融合规则基本相同的条件下,就可以更加有效地将本文方法(4 band MP)与上面的 3 种图像融合方法作对比。

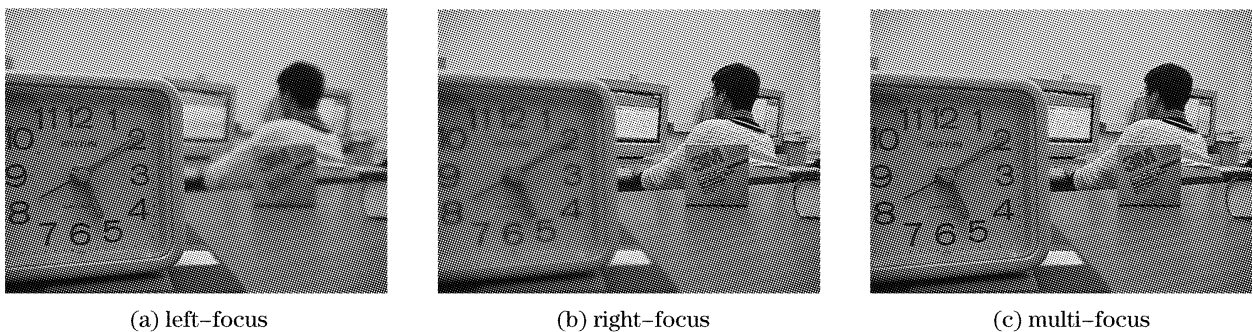


图 3 多聚焦实验室图像及其融合

Fig. 3 Multi-focus lab images and their image fusion

实验中我们采用了融合图像的熵、交叉熵和均方根误差<sup>[16]</sup>来评价融合图像质量,相应的评价数据示于表 1。对于同一组融合实验,一般情形下若某种融合方法得到的融合图像的熵较大,交叉熵较小, $E_{\text{rms}}$ 较小,则说明该融合方法性能相对较好。

表 1 多聚焦图像融合结果评价对比

Table 1 Evaluation of the multi-focus image fusion results

Fusion scheme	Entropy	Cross entropy	$E_{\text{rms}}$
4 band MP	4.5823	0.0031	1.5456
CP	4.4156	0.0054	1.6235
DWT	4.4263	0.0035	1.5702
MP	4.4006	0.0051	1.6121

### 4.2 互补性图像融合

在图 4(a)中,坦克的尾部被烟雾遮挡,在图 4(b)中,坦克的前部被烟雾遮挡。因此,单凭图 4(a)或图 4(b),无法看到完整清晰的坦克轮廓边缘。在图 4(c)中,应用本文图像融合方法,就能够得到完整的坦克轮廓边缘。

同时,我们也应用了 4.1 节中的衬比值金字塔融合法<sup>[16]</sup>,小波变换融合法<sup>[17]</sup>以及形态学金字塔融合法<sup>[13]</sup>,并且在融合过程中选择的特性局部区域均为  $3 \times 3$  区域,分解层数均为 6 层,融合规则与 4.1 节相同。相应的融合结果评价数据示于表 2。

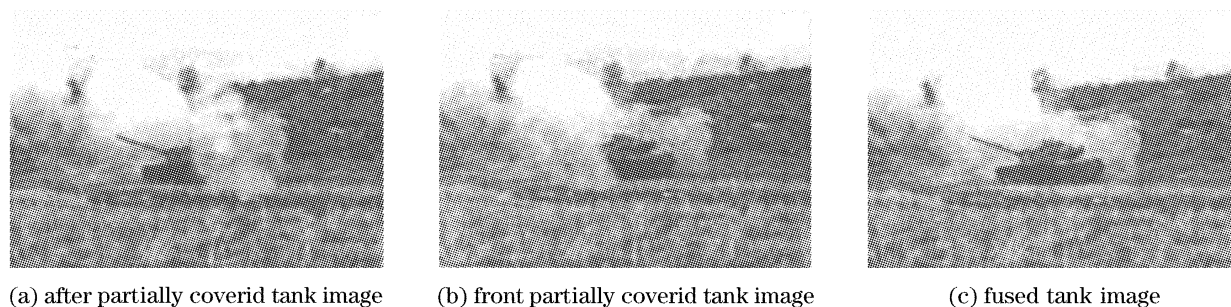


图 4 局部遮挡坦克图像及其融合

Fig. 4 Partially covered tank images and their image fusion

表 2 互补性图像融合结果评价对比

Table 2 Evaluation of the complementary image fusion results

Fusion scheme	Entropy	Cross entropy	$E_{rms}$
4 band MP	5.0882	0.0261	5.5498
CP	5.0868	0.0265	6.6235
DWT	5.0633	0.0454	12.6585
MP	5.0713	0.0354	8.5623

## 5 结 论

本文提出了一种新颖的基于形态学滤波子带分解的多分辨率图像融合方法,这种子带分解将图像分解为相应的低频分量和 3 个方向的高频分量。针对各级分辨率图像中的低频和高频分量,使用了不同的融合算子进行融合处理。这种图像融合方法保留了数学形态学滤波的快速、易于实现、保持图像局部细节等优点,因此,应用本文方法得到的融合图像具有丰富和准确的景物信息,能够更好地为高层次的图像分析模式识别等任务服务。

## 参 考 文 献

- Liu Weiyi, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Three dimension reconstruction by space image fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 363~369 (in Chinese)  
刘维一,王肇圻,母国光等. 用空间图像融合技术进行三维重建的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 363~369
- Li Qin, Yu Xin. Study of image fusion methods appropriated to biological images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 494~500 (in Chinese)  
李勤,俞信. 适合于生物图像的图像融合算法研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 494~500
- P. J. Burt, E. H. Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Trans on Communications*, 1983, **31**(4): 532~540
- A. Toet. Multi-scale contrast enhancement with applications to image fusion[J]. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(5): 1026~1031
- H. Li, B. S. Manjunath, S. Mitra. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform[J]. *Graphical Models and Image Process*, 1995, **57**(3): 235~245

- Hong Wang, Zhongliang Jing, Jianxun Li. Image fusion using non-separable wavelet frame[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 523~526
- Wang Hong, Jing Zhongliang, Li Jianxun. An image fusion approach based on object region[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 351~355 (in Chinese)  
王宏,敬忠良,李建勋. 一种基于目标区域的图像融合新方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 351~355
- Wu Yan, Yang Wanhai, Li Ming. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676 (in Chinese)  
吴艳,杨万海,李明. 基于小波分解和进化策略的图像融合方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 671~676
- Li Shutao, Wang Yaonan. Multi-sensor image fusion based on tree-structure wavelet decomposition [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(3): 219~222 (in Chinese)  
李树涛,王耀南. 基于树状小波分解的多传感器图像融合[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(3): 219~222
- V. S. Petrovic, C. S. Xydeas. Gradient-based multi-resolution image fusion[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2004, **13**(2): 228~237
- D. R. Barron, O. D. J. Thomas. Image fusion through consideration of texture components [J]. *IEEE Trans on Electronics Letters*, 2001, **37**(12): 746~748
- J. Goutsias, H. J. A. M. Heijmans. Nonlinear multi-resolution signal decomposition schemes—Part I: Morphological Pyramids [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, **9**(11): 1862~1876
- G. K. Matsopoulos, S. Marshall. Application of Morphological Pyramids; Fusion of MR and CT Phantoms [J]. *J. Visual Communication and Image Representation*, 1995, **6**(2): 196~207
- S. C. Pei, F. C. Chen. Hierarchical image representation by mathematical morphology subband decomposition [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1995, **16**(2): 183~192
- F. W. Campbell. The human eye as an optical filter [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1968, **56**(6): 1009~1015
- Liu Guixi, Yang Wanhai. A multi-scale contrast-pyramid based image fusion scheme and its performance evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1336~1342 (in Chinese)  
刘贵喜,杨万海. 基于多尺度对比度塔的图像融合方法及性能评价[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1336~1342
- Liu Guixi, Yang Wanhai. Image fusion scheme of pixel-level and multi-operator for infrared and visible light images [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(3): 207~210 (in Chinese)  
刘贵喜,杨万海. 一种像素级多算子红外与可见光图像融合方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(3): 207~210