

# 基于边缘检测小波变换的图像融合研究

玉振明<sup>1,2</sup>, 毛士艺<sup>1</sup>, 袁运能<sup>1</sup>, 高 飞<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 203 教研室, 北京 100083; 2. 广西大学梧州分校, 广西梧州 543002)

**摘 要:** 本文用基于极大值图像边缘检测的小波变换进行图像融合, 即通过用 B 样条函数构造适用于图像边缘检测的小波对输入图像进行两个互相垂直方向的分解, 然后分别用小波系数比较的融合准则和边缘比较的融合准则进行融合, 实验发现由此融合的图像质量优于基于典型小波分解的融合. 进行了仅用图像边缘融合并通过简单重构生成输出图像的实验, 发现由此得到的融合图像质量可以在可接受的范围内, 但可使参与融合的像素大幅度减少, 这对于某些要求数据压缩, 存储量较少的工程化图像融合系统有一定参考价值.

**关键词:** 图像融合; 样条小波; 边缘检测

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 08-1446-05

## Study on Image Fusion Based on Wavelet of Edge Detection

YU Zhen-ming<sup>1,2</sup>, MAO Shi-yi<sup>1</sup>, YANU Yur-neng<sup>1</sup>, GAO Fei<sup>1</sup>

(1. Group 203 Bei Hang University, Beijing 100083, China; 2. Wuzhou Branch Guangxi university, Wuzhou, Guangxi 543002, China)

**Abstract:** The paper uses a wavelet of edge detection on image fusion. The wavelet constructed by B-spline function is appropriate for edge detection and used for image decomposition in two vertical directions. And then fuse image by the rule which compares coefficients of wavelet transform or compares edge of images. The result of experiment shows the quality of fusion image based on wavelet of edge detection precedes typical wavelets. Also try using edge's pixels only to fuse image and find the quality of fusion image is acceptable, but the number of joining pixels reduces greatly. This method may apply to some image fusion that requires data compression or less storage.

**Key words:** image fusion; b-spline wavelet; edge extraction

### 1 引言

小波变换是近年来用于图像融合的主流方法, 已有比较丰富的研究成果. 小波分解的基本方法是基于某一小波基用 Mallat 算法对待融合的图像进行多尺度分解, 在每一个尺度中得到一个低频的模糊子图像和行、列、对角线三个方向上的高频细节子图像, 比较每一个尺度上的各个方向高频子图的小波系数得到相应方向上融合图像的高频子图像, 然后重构生成融合图像. 图像的边缘是图像最重要的特征, 边缘像素虽然只占少数部分, 但却包含了图像的大部分信息. 因此, 图像边缘的检测和提取一直是图像处理的热点研究方向, 近年来发展的 B 样条小波用于图像边缘提取表现出了优良的特性. 文献[1, 2]对小波用于信号奇异点检测进行了研究, 文献[3]报告了基于边缘检测小波变换用于图像融合的可行性, 并取得了较好的实验效果, 但没有系统地阐述融合的过程和方法, 也缺少对为何能取得良好融合效果原理上的分析. 文献[4, 6]对 B 样条小波用于图像边缘检测进行了深入分析, 文[5, 8~10]运用 B 样条小波于图像边缘提取取得了较

好效果. 本文综合这些文献的成果, 详细阐述了基于图像边缘检测的小波分解用于图像融合的原理和方法, 并深入分析了这种融合方法能取得较好效果的原因. 文中用 B 样条函数构造适用于极大值边缘检测的小波进行图像融合, 通过对图像两个相互垂直方向的多尺度分解得到边缘图像, 然后进行融合和重构. 本文试验了不同的融合准则, 先用传统的小波系数值取大的融合准则进行融合, 发现融合图像的质量优于常用小波分解的融合, 如优于 Db 和 Bior 等常用于图像分析的典型小波; 另外还运用了通过定位边缘, 然后比较边缘的图像融合准则进行图像融合, 实验表明这也是一种可行的融合准则, 其融合图像质量和小波系数取大的融合准则相当, 但该准则提供了一种仅用边缘像素进行融合然后简单重构生成融合图像的方法, 这种方法可以使得参加融合的像素大为减少, 而重构生成的融合图像信息损失又不太大, 融合图像质量可控制在主观视觉可接受的范围内, 这为某些对存储空间和数据压缩有较高要求的工程化场合提供了一种可行的算法选择. 本文选用红外和蓝光波段的卫星遥感图像以及中波与短波红外夜视图像进行融合实验, 实验结果支持上述结论.

收稿日期: 2004-07-19; 修回日期: 2005-01-28

### 2 小波变换提取图像边缘原理

信号  $f(x)$  在尺度  $s$  和位置  $x$  的小波变换是:

$$W_s f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_s(x-t) dt$$

其中  $\psi_s(x) = \frac{1}{s} \psi(\frac{x}{s})$  是满足容许条件的母小波经尺度因子伸缩而得. 已经证明小波  $\psi(x)$  可选择为某个低通平滑函数的导数, 即:

$$\psi(x) = \frac{d\phi(x)}{dx} \quad (1)$$

$\phi(x)$  满足积分为 1 且无穷远处趋于 0 的条件, 则对于  $f(x) \in L^2 R$ , 小波变换为:

$$W_s f(x) = f * \left( s \frac{d\phi}{dx} \right) (x) = s \frac{d(f * \phi)}{dx} (x) \quad (2)$$

可见这样的小波变换实质上是信号被平滑函数低通滤波后的导数. 因此, 小波变换的大小反映了信号上升或下降的速率的大小, 小波模最大值处对应着信号的突变点, 如果是图像信号也就是图像的边缘点. 当二维平滑函数为  $\phi_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \left( \frac{x}{s}, \frac{y}{s} \right)$  时, 二维小波定义为:

$$x(x, y) = \frac{\partial \phi_s(x, y)}{\partial x} \quad (3)$$

$$y(x, y) = \frac{\partial \phi_s(x, y)}{\partial y} \quad (4)$$

用上述小波对图像进行  $x, y$  两个互相垂直方向上的小波变换可得到包含边缘信息的边缘图像, 也称之为边缘图像. 定义如下形式的关于图像  $f(x, y)$  的小波变换:

$$\begin{bmatrix} W_x^s f(x, y) \\ W_y^s f(x, y) \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \frac{\partial (f * \phi_s)(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial (f * \phi_s)(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} = s \nabla (f * \phi_s)(x, y) \quad (5)$$

可见这样的小波变换实质上是对被平滑函数低通滤波后再求其梯度. 因此, 图像边缘出现在梯度方向上模取得最大值的位置, 在尺度为  $2^j$  时梯度的模和梯度的方向由下二式决定:

$$\text{Mod}[W_2^j f(x, y)] = \left[ |W_x^j f(x, y)|^2 + |W_y^j f(x, y)|^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{Arg}[W_2^j f(x, y)] = \arctg \left[ \frac{W_y^j f(x, y)}{W_x^j f(x, y)} \right] \quad (7)$$

要对上述变换进行多分辨率分解的关键是推导相应的高通和低通滤波器组系数, 这可从双尺度关系推导, 多分辨率分解的双尺度关系为:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{x}{2} \right) = h_k(x-k) \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{x}{2} \right) = g_k(x-k) \quad (9)$$

当平滑函数取为 B 样条函数时上述滤波器组系数  $h_k$  和  $g_k$  容易推出, 文献[4]说明当平滑函数为二次或三次 B 样条函数时就具有和高斯函数十分相似的时频局部化, 并且文献[4]推导了解和重构滤波器组系数.

利用  $n$  次 B 样条函数的傅里叶变换:

$$\hat{\psi}(\omega) = \left[ \frac{\sin \frac{\omega}{2}}{\frac{\omega}{2}} \right]^{n+1} \quad (10)$$

及其一阶导数:

$$\hat{\psi}'(\omega) = i \hat{\psi}^{n+1} \left( \frac{\omega}{2} \right) = i \left[ \frac{\sin \frac{\omega}{4}}{\frac{\omega}{4}} \right]^{n+2} \quad (11)$$

结合双尺度关系(8)、(9)及小波定义:

$$\hat{\psi}(\omega) = \frac{d\hat{\psi}^{n+1}(x)}{dx} = 4 \frac{d^{n+1}(2x)}{dx} \quad (12)$$

可方便地推出当取  $n=2$  时的滤波器系数:

$$\begin{aligned} h_k &= [0.125 \ 0.375 \ 0.375 \ 0.125], \quad (-2 \leq k \leq 1) \\ g_k &= [-2 \ 2], \quad (1 \leq k \leq 0) \end{aligned} \quad (13)$$

由二尺度关系可得到分解递推公式:

$$S_2^j f(n) = \sum_k h_k S_2^{j-1} f(n-2^{j-1}k) \quad (14)$$

$$W_2^j f(n) = \sum_k g_k S_2^{j-1} f(n-2^{j-1}k)$$

其中  $(j = 1, 2, \dots, J - 1)$ .

1). 重构滤波器系数的推导利用图 1 的分解和重构框图, 图 1 中  $\tilde{H}(2^{j-1})$  和  $\tilde{G}(2^{j-1})$  是重构滤波器.

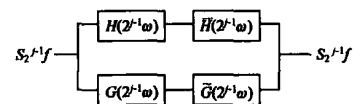


图 1

由图 1 可见要完全重构必须满足:

$$H(2^{j-2}(\cdot)) \tilde{H}(2^{j-2}(\cdot)) + G(2^{j-2}(\cdot)) \tilde{G}(2^{j-2}(\cdot)) = 1 \quad (15)$$

式(15)中取  $\tilde{H} = \bar{H}$  则可得:

$$\tilde{G}(2^{j-2}(\cdot)) = \frac{1 - \bar{H}^2(2^{j-2}(\cdot))}{G(2^{j-2}(\cdot))} \quad (16)$$

上式结合滤波器系数推导时得到高、低通传递函数可得  $n=2$  时的重构高通滤波系数为:

$$\tilde{g}_k = \begin{bmatrix} -\frac{1}{128} & -\frac{7}{128} & -\frac{11}{64} & \frac{11}{64} & \frac{7}{128} & \frac{1}{128} \end{bmatrix}, \quad (-2 \leq k \leq 3) \quad (17)$$

重构低通系数和分解时相同, 重构公式为:

$$S_2^{j-1} f(n) = \sum_k \bar{h}_k S_2^j f(n-2^{j-1}k) + \sum_k \tilde{g}_k W_2^j f(n-2^{j-1}k) \quad (18)$$

在二维情况下, 平滑函数是:

$$\phi^n(x, y) = \phi^n(x) \phi^n(y) \quad (19)$$

小波函数由(3)、(4)定义:

$$\phi^{(n,x)}(x, y) = 4^{-n} \phi^n(x) \phi^n(2y) \quad (20)$$

$$\phi^{(n,y)}(x, y) = 4^{-n} \phi^n(2x) \phi^n(y) \quad (21)$$

双尺度关系为:

$$\hat{\psi}^n(2^{-1}x, 2^{-1}y) = H(x) H(y) \hat{\psi}^n(x) \hat{\psi}^n(y) \quad (22)$$

$$\hat{\psi}^{(n,x)}(2^{-1}x, 2^{-1}y) = G(x) \hat{\psi}^n(x) \hat{\psi}^n(y) \quad (23)$$

$$\hat{\psi}^{(n,y)}(2^{-1}x, 2^{-1}y) = G(y) \hat{\psi}^n(x) \hat{\psi}^n(y) \quad (24)$$

滤波器  $H$  和  $G$  的系数上面已经求出. 定义重构小波:

$$\tilde{\psi}^{(n,x)}(2^{-1}x, 2^{-1}y) = \tilde{G}(x) U^n(y) \hat{\psi}^n(x) \hat{\psi}^n(y) \quad (25)$$

$$\tilde{\psi}^{(n,y)}(2^{-1}x, 2^{-1}y) = \tilde{G}(y) U^n(x) \hat{\psi}^n(x) \hat{\psi}^n(y) \quad (26)$$

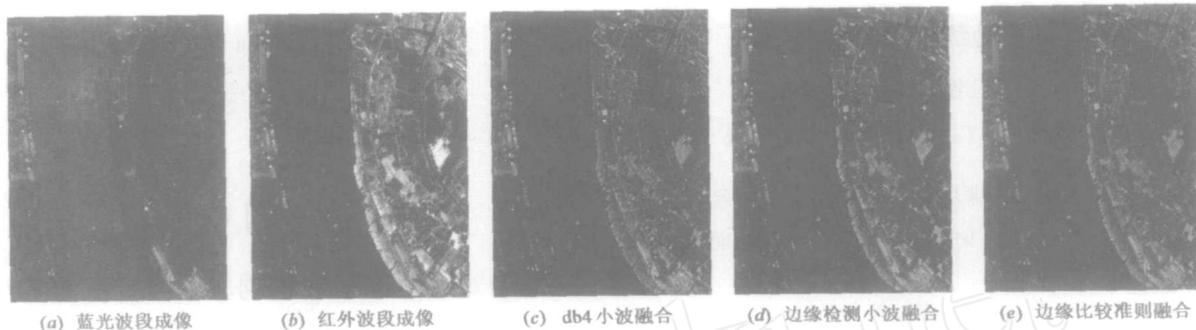


图 2

类似推导一维重构滤波器可推导滤波器  $U$  的系数, 在  $H, G$  和  $\tilde{G}$  满足式(15)的条件下有:

$$U(\omega) = \frac{1 + |H^2(\omega)|^2}{2} \quad (27)$$

$n=2$  由上式可得滤波器  $U$  系数:

$$u_k = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 15 & 21 & 15 & 3 & 1 \\ 128 & 64 & 128 & 32 & 128 & 64 & 128 \end{bmatrix} \quad (-3 \leq k \leq 3) \quad (28)$$

类似式(14), 分解递推公式为:

$$S_2^j f(m, n) = S_2^{j-1} f * (h, h) \quad 2^{j-1} \quad (29)$$

$$W_2^j f(m, n) = S_2^{j-1} f * (g, d) \quad 2^{j-1} \quad (30)$$

$$s_2^j f(m, n) = S_2^{j-1} f * (g, d) \quad 2^{j-1} \quad (31)$$

上面的分解递推公式中  $d$  是冲激响应, 即除 0 处为 1 外, 其余都为 0, 式(29)中  $f * (h, h)$  表示用  $h$  分别对图像的行和列进行卷积,  $2^{j-1}$  表示隔  $2^{j-1}$  抽取参加卷积. 同理可理解式(30)和(31)分别是用  $g$  对  $j-1$  级模糊子图的行和列进行卷积, 分别得到两个相互垂直方向的高频子图, 亦称边缘图像. 重构公式则为:

$$S_2^{j-1} f = W_2^j f * (\tilde{g}, u) \quad 2^{j-1} + W_2^j f * (u, \tilde{g}) \quad 2^{j-1} + S_2^j f * (\tilde{h}, \tilde{h}) \quad 2^{j-1} \quad j = J, J-1, \dots, 1 \quad (32)$$

### 3 图像融合方法

首先与经典的小波融合方法相同, 即融合时在每一尺度的高频分量比较小波系数的绝对值大小, 而最粗糙低频分量则取均值融合. 以  $F$  标记融合图像,  $A, B$  标记输入待融合的图像, 融合准则为(以下称系数比较准则):

$$S_2^j F(i, j) = k_1 S_2^j A(i, j) + k_2 S_2^j B(i, j) \quad (33)$$

$$W_2^j F(i, j) = \begin{cases} W_2^j A(i, j), & \text{if } |W_2^j A(i, j)| > |W_2^j B(i, j)| \\ W_2^j B(i, j), & \text{other} \end{cases} \quad j = J, J-1, \dots, 1 \quad (34)$$

上两式表示最高级  $J$  的低频子图作加权平均, 加权系数  $k$  的选择可视参加融合图像的灰度差异决定, 一般都选 0.5 即可. 而各级高频子图融合由式(34)决定, 式中  $A, B$  分别代表  $X, Y$  和对角线方向, 而用本文中的分解方法则只有  $X, Y$  两个方向. 完成了各尺度下的融合后, 重构融合得到的各级子图即生成融合图像.

另外, 由于分解得到的边缘图像可用于边缘定位和提取, 基于边缘对图像的重要性, 又提出如下融合准则(以下称

边缘比较准则):

(1) 由式(6,7)检测各尺度下输入图像的边缘.

(2) 比每一尺度下输入图像相同位置是否是图像边缘, 如果其中之一像素为边缘而另一像素不是边缘, 则取是边缘的像素作为融合图像的像素, 其余情况要么相同位置的像素同为边缘, 要么都不是边缘, 无论那一种情况融合准则由式(34)决定.

再有, 基于图像边缘检测的融合提供了这样一种可能, 即融合时只用边缘像素, 然后仅由边缘像素重构生成融合图像. 文献[1,2]讨论了只用图像边缘重构图像的可能性, 结论是在大多数情况下重构图像的误差可控制在视觉可接受的范围内, 但重构时运用的交替投影法迭代运算比较复杂. 本文进行了这样的实验, 只用各尺度融合后的边缘像素但仍按一般重构方法重构融合图像, 观察对融合效果的影响, 以期得到一种既可满足一定图像质量要求, 算法相对简单, 但又能使参加融合像素大大减少的融合方法.

### 4 融合实验和性能分析

为了使得实验结论具有较普遍的意义, 选用了两类差异较大的图像进行融合实验, 一类是不同波段卫星遥感图像, 一类是不同波段红外夜视图像. 图 2(a)和 2(b)是上海某地区的卫星遥感蓝光波段和红外波段图像, 观察可见这两个波段成像有许多互补的信息. 图 2(c)是用 Db4 小波按经典分解方法用系数比较准则融合的结果, 而图 2(d)则是用本文所述的基于边缘检测小波分解同样采用系数比较准则的融合结果(分解的层数都为三层). 观察融合的图像可见两种方法的融合效果都较好, 明显可看到互补信息很好地出在图 2(c)和 2(d)中. 详细比较可发现边缘检测小波的效果更优, 许多细节边缘更为清晰和光滑, 图 3 取了其中一个局部, 图 3(a)是 DB4 小波, 图 3(b)是本文方法, 观察图中小圆圈里的目标就可看出后者比前者的边缘更清晰和光滑. 图 4 两幅夜视图



图 3

像,图 4(a)是短波红外成像,图 4(b)是中波红外成像,这两种传感器成像各自互补特征非常明显,图 4(c)和图 4(d)则是 Db4 小波和边缘检测小波同样用系数比较准则融合的结果,比较也可得到和遥感图像融合相同的结论,如仔细观察融合图像中的主要目标人和吉普车,通过边缘检测小波分解融合生成图像中吉普车前右轮总体轮廓比 Db4 小波融合清楚,可明显看出轮胎转向了一个角度,还有车的顶部也是前者比后者光滑。笔者曾用多种小波如 Bior3,7 小波、Haar 小波等与之比较,都有与相同结论。因此,可以得出结论:基于边缘检测小波分解的图像融合具有较优良的特性,在较大的范围内优于经典的小波分解融合方法。

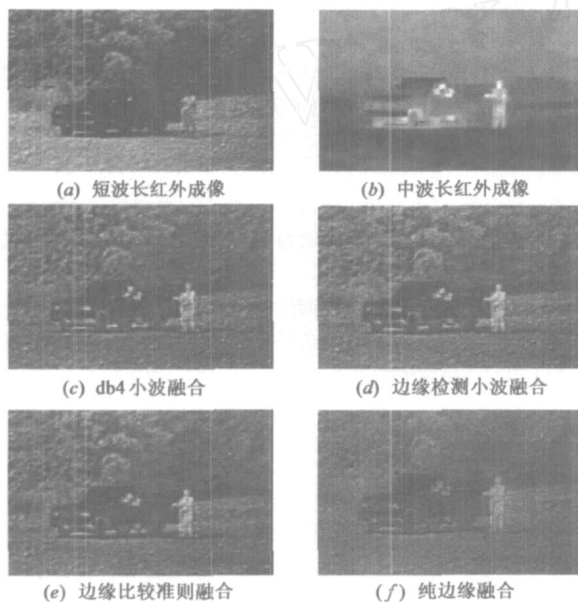


图 4

值得说明的是:评价融合图像质量目前还没有完全客观可靠的指标,很多文献采用的一些统计指标如熵,交叉熵等能从某个侧面反映融合效果,但也有明显的缺陷和局限性。因此,本文的融合质量比较主要是从主观视觉的差别进行评价,如果主观视觉已经能明显看出融合质量的差别,我们认为就不必要再用统计量来比较了。

分析基于边缘检测小波分解的图像融合取得良好效果的原因在于:既保持了小波分解多分辨分析的优势又突出了图像的边缘特性,而边缘包含了图像大部分信息,在上述融合实验中虽然没有直接进行边缘定位和比较,但是用于融合的两个相互垂直的小波分量已经突出了边缘的信息,这两个方向上的小波系数实质上是图像平滑后在两个方向上的导数,故小波系数绝对值的大小本质上就是图像在两个方向上变化的斜率,直接反映了图像变化的快慢程度。因此,小波系数绝对值取大的融合准则实质上是比较输入图像在不同尺度上的变化快慢,然后取变化快的参与融合,图像中变化较大的地方当然是信息量较多的地方。可见,基于边缘检测小波分解的融合方法能取得好的效果,有着是非常明确的物理解释。

图 2(e)和图 4(e)是用边缘比较准则融合的结果,融合准则见本文第三部分中的 1,2 两点,图 3(c)是图 2(e)的一个局

部细节,可见生成的融合图像质量和系数比较准则的融合结果没有明显区别,从这个角度看只比较系数即可没有必要再进行边缘的比较。但是,通过边缘定位然后比较边缘的融合准则提供了一种可能性,即:由于文献[1,2]等成功提出了一种由多尺度边缘重构图像的算法,应用到图像融合中就有可能只通过融合边缘而重构生成融合图像也不会带来太大的信息损失。文献[3]运用这样的算法进行了成功的实验,但重构的算法比较复杂。本文进行了这样的实验,完全只融合图像的边缘,仅由边缘像素仍按原来小波的重构方法重构融合图像观察融合图像的质量,图 4(f)是只用输入图像各尺度边缘像素的小波系数融合的结果,判断边缘时还加了阈值限制,即只有是局部极大值且灰度值超过一定阈值的才判为边缘,这样对由噪音和一些细小纹理引起的边缘进行了滤除,仿真发现参与融合的像素数量大大减少,例如在尺度  $j=3$  时按一般融合方法共 220400 个像素参加融合,而只用边缘像素且设阈值为 5 时参加融合的像素仅为 37626 个。观察图 4(f),可见图像的质量有所下降,但主要目标的信息并没有受太大的影响,主观视觉还可以接受。可见,在某些场合下只用边缘像素进行融合简单重构输出图像是可行的,能得到满足一定质量要求的融合输出图像,这为必须进行数据压缩,存储容量要求苛刻的场合下提供了一种可行的融合方法选择。

## 5 结论

本文主要的工作和结论有:

(1)把小波图像边缘检测的方法应用于图像融合,得出了基本图像边缘检测的小波分解的图像融合效果优于基于一般小波分解融合的结果,并且分析了能够取得良好融合效果的原因。文中详细论述了用 B 样条函数构造的小波实现基于图像边缘检测的图像融合过程。

(2)实验发现通过定位和比较边缘的融合准则是可行的,即融合时优先选择是图像边缘的像素,这样的融合准则为仅由输入图像的边缘融合生成输出图像提供了基础。

(3)试验了只用边缘像素进行融合,即不是边缘的像素一律抛弃,实验发现仅由边缘像素按常规的小波重构方法重构生成的融合图像信息损失在某些情况下也可在视觉可接受的范围内,这为某些对存储空间和数据压缩有较高要求的工程化场合提供了一种可行的算法选择。

## 参考文献:

- [1] Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges[J]. IEEE Trans PAMI-14, 1992, PAMI-14(7): 710 - 732.
- [2] Mallat S, Huang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J], IEEE Trans IP-38, 1992, IP-38(2): 617 - 643.
- [3] S G Nilov, D R Bull, C N Canagarajah, M Halliwell, P N T Wells. 2-D image fusion by multiscale edge graph combination[A]. IEEE Information Fusion, 2000. Proceedings of the Third International Conference [C]. IEEE, 2000.
- [4] 王玉平,蔡元龙. 多尺度样条小波边缘检测算子[J]. 中国科学, 1995, 25(4): 426 - 437.  
Wang Yuping, Cai Yuanlong. The edge detection operator of multi-

- scale B-spline wavelet[J]. Science in China, 1995, 25(4): 426 - 437.
- [ 5 ] GUAN Xiaoping, GUAN Zequn. Edge detection of high resolution remote sensing imagery using wavelet[A]. IEEE Proceedings ICII 2001-Beijing, 2001 International Conferences[C]. Beijing: IEEE, 2001.
- [ 6 ] YU-Ping Wang, S L Lee. From Gaussian scale-space to B-spline scale-space[A]. Acoustics, Speech and Signal Processing 1999 ICASSP '99. Proceedings[C]. IEEE, 1999.
- [ 7 ] 袁运能, 毛士艺. 信号的紧小波表示与最佳小波基[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(4): 392 - 397.  
Yuan Yunneng, Mao Shiyi. Representation of Signal in Tight Wavelet Frame and Best Wavelet Base [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics And Astronautics, 1999, 25(4): 392 - 397.
- [ 8 ] 解梅, 马争. B 样条小波边缘检测算子应用研究[J]. 电子学报, 1999, 27(1): 106 - 108.  
Xie Mei, Ma Zheng. Research of Edge Detection For B-spline Wavelet [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(1): 106 - 108.
- [ 9 ] 张晖, 吴斌, 王建中, 程文华. B 样条小波在图像多尺度边缘检测中的应用研究[J]. 西南工学院学报, 2000, 15(4): 30 - 35.  
Zhang Hui, Wu Bin, Wang Jinzhong, Cheng Wenhua. The application research of image multi-scale edge detection by using B-spline wavelet [J]. Journal of Southwest Institute of Technology, 2000, 15(4): 30 - 35.
- [ 10 ] 张雪, 肖旺新, 吴坚, 吴斌. 用二次 B 样条小波进行图像自适应阈值边缘检测[J]. 红外技, 2003, 25(1): 19 - 24.

Zhang Xue, Xiao Wang-Xin, Wu Jina, Wu Bin. Adaptive thresholds edge detection based on wavelet transform[J]. Infrared Technology, 2003, 25(1): 19 - 24.

#### 作者简介:



玉振明 男, 1963 年 6 月生于广西藤县, 广西大学梧州分校计算机科学系副教授, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士生, 从事图像处理、信号处理理论等方面的研究. E-mail: yunmingming@vip.sina.com.

毛士艺 男, 1935 年生于浙江省, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 博士生导师, 中国电子学会(CIE)会士, 主要研究领域为: 高分辨率雷达成像, 信号建模与谱分析, 信号检测与分, 多目标跟踪与数据融合等.

袁运能 男, 1962 年生于江西余干县, 北京航空航天大学电子信息工程学院副教授, 主要研究领域为小波分析及其, 其高分辨率雷达成像等.

高飞 男, 1975 年生于陕西绥德, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士生, 主要从事信号处理、雷达成像、图像处理、运动目标指示等方面研究工作.