

多分辨率图像融合的研究与发展

王 宏, 敬忠良, 李建勋

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 航空航天信息与控制研究所, 上海 200030)

摘要: 本文系统综述了多分辨率图像融合算法的发展历史和理论研究, 首先论述了多分辨率图像融合算法的基本原理及发展状况; 然后给出了多分辨率图像融合中的几种典型算法, 并做了较详细的分析与讨论; 最后对多分辨率图像融合存在的问题及其发展做了探讨。

关键词: 图像融合; 多分辨率分析; 金字塔结构

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Research and development of multiresolution image fusion

WANG Hong, JING Zhong-liang, LI Jian-xun

(Institute of Aerospace Information and Control, School of Electrical and Information Technology,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: An overview of the history and theory for multiresolution image fusion approaches was presented. First, the principle and development of the multiresolution image fusion approaches was given. Then, several typical algorithms, including the pyramid transform, the wavelet transform and wavelet frame transform, and the fusion rules of from classical pixel-based schemes to region-based schemes were discussed and analyzed. Finally, the disadvantages and development trend of the multiresolution image fusion approaches were presented according to multiresolution decompositions, fusion rules and evaluation criteria of the fusion results.

Key words: image fusion; multiresolution analysis; pyramid structure

1 引言 (Introduction)

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, 减少原始图像数据量, 提高对环境的适应性, 以获得更可靠、更准确的信息供观察或进一步处理。它是一门综合了传感器技术、信号处理、图像处理和人工智能等的新兴技术。近年来, 图像融合已成为一种十分重要的图像分析与计算机视觉技术。它在自动目标识别、计算机视觉、遥感、机器人、医学图像处理以及军事应用等领域有着广泛的应用前景。

多传感器图像融合一般分为像素级图像融合、特征级图像融合和决策级图像融合。像素级图像融合作为最基本的融合, 它是特征级图像融合和决策级图像融合的基础。在像素级图像融合中, 其融合算法大体上有: 加权融合和主成分分

析^[1-3]、假彩色图像融合算法^[4-6]、基于马尔可夫随机场的图像融合^[7,8]、调制图像融合算法^[9,10]、基于统计的图像融合^[11-13]、基于神经网络的图像融合^[14-16]及多分辨率图像融合等算法, 其中多分辨率图像融合算法作为一类非常重要的融合算法, 目前在图像融合领域中, 有着相当多的应用。下面本文就针对多分辨率图像融合算法进行详细论述。

2 原理结构及其发展 (Principle structure and development)

多分辨率图像融合的原理结构如图 1 所示。多分辨率结构中的各级子图像 (或系数) 相继表示分辨率逐级降低的输入图像。此种结构描述了图像中的特征信息, 其相继各级子图像 (或系数) 是越来越粗略地表示这些特征^[9]。

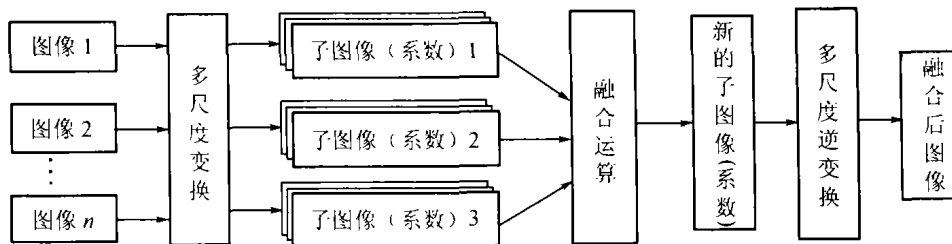


图 1 多分辨率图像融合的原理结构图

Fig. 1 Structure of multiresolution image fusion

多分辨率结构的形成是采用对图像进行自底向顶的分解,每一层图像均是其前一层图像经过某种模板滤波形成的。多分辨率结构可以有效地执行许多基本的图像运算,可以产生一组低通或带通图像。通过级与级的互联,多分辨率结构提供了局部处理与全局处理之间的联系^[9]。

2.1 多分辨率图像融合的分解与重构(Decomposition and reconstruction)

有关多分辨率图像融合的研究,它最初始于 Burt 和 Adelson^[17]提出的拉普拉斯金字塔算法。它是在得到一系列高斯滤波图像的基础上,与其预测所得到的预测图像之差形成的一系列误差图像。拉普拉斯金字塔作为一种经典的多分辨率分解结构至今仍在对其进行研究^[18~20]。

Toet^[21~23]在考虑人类的视觉系统对局部对比度的敏感性这一事实的基础上,提出了对比度金字塔算法。这种算法能够较好地保留重要的图像细节。Zhou^[24,25]提出了不进行降采样的对比度图像融合改进算法,并将此算法应用于 SAR/IR 的图像融合中,此算法便于硬件的实现,减少了噪声的引入。

Toet^[26]同时也提出了形态学金字塔算法;英国的防御评估和研究机构的研究人员已经完成了多种形式的应用形态学金字塔的图像融合算法的研究。

Burt^[27]提出了梯度金字塔算法,它是通过对每层图像进行梯度算子运算,以获得梯度金字塔图像分解。由于其在每一层上均可得到包含水平、垂直及两对角线方向细节信息的四个分解图像,因此,梯度金字塔分解能很好地提取出图像的边缘信息。

Barron 和 Thomas^[28]提出一种基于纹理单元的金字塔算法,它在每层图像中,采用 24 个纹理滤波器以获取不同方向的细节信息。与梯度金字塔算法相比,它能够提取出更多的图像细节信息。

金字塔形融合算法虽然对不同传感器的图像进行较好的融合运算,但由于其层间分解量之间具有相关性,这导致其融合结果不够理想,并且它没有严格的理论基础存在。

随着小波变换理论^[29~34]的兴起和完善,小波变换在图像融合领域得到了广泛的应用。

Chipman et al^[35]及 Li et al^[36]分别提出采用离散小波变换进行图像融合处理。由于离散二进制小波变换在提取图像低频信息的同时,又获得了三个方向的高频细节信息,在理论上较传统的金字塔融合方法具有更好的效果。此后有相当多的研究和应用是基于离散小波变换融合算法^[37~50]。

Koren et al^[51]在 Freeman 和 Adelson^[52,53]、Simoncelli et al^[54]的研究成果上,提出了可变方向(steerable)的二进制小波变换融合算法;它可在任意方向上实现多分辨率分解,更精细地获取图像细节信息。Liu et al^[55]在 Simoncelli 和 Freeman^[56]研究的基础上,对可变方向的二进制小波变换融合算法作了进一步的改进,增加了一个方向滤波器并运用拉普拉斯金字塔进行融合运算,得到较好的融合结果。

采用离散小波进行变换时,由于进行了行列降采样,图

像的大小发生了变化,每层图像的大小均为其上一层图像大小的 1/4,这种变化在图像融合处理过程中往往是不利的。

由此,Z Zhang 和 Blum^[57]、R Oliver^[58]提出了采用小波框架^[59]的融合算法。这种算法进行变换后的图像大小未发生变化,便于图像融合处理。同样,J Nùñez et al^[60]及 Chibani 和 Houacine^[61]分别采用离散小波“à trous”算法^[62,63]进行图像融合运算,也使得图像的大小未发生变化。

近年来,随着小波理论的进一步发展,有些学者尝试采用多进制小波^[65,66]、多小波理论^[67]工具进行图像的融合处理。但是由于多进制小波和多小波理论刚刚引入图像融合领域,有待深入进行研究。

2.2 图像融合规则(Fusion rule)

图像的融合规则是图像融合的核心,融合规则的好坏直接影响融合图像的速度和质量。

Burt^[68]提出了基于像素选取的融合规则,在将原图像分解成不同分辨率图像的基础上,选取绝对值最大的像素值(或系数)作为融合后的像素值(或系数)。这是基于在不同分辨率图像中,具有较大值的像素(或系数)包含更多的图像信息。

Petrovic 和 Xydeas^[69]提出了考虑分解层内各图像(若存在多个图像)及分解层间的相关性的像素选取融合规则。

蒲恬^[70]在应用小波变换进行图像融合时,根据人类视觉系统对局部对比度敏感的特性,采用了基于对比度的像素选取融合规则。

基于像素的融合选取仅是以单个像素作为融合对象,它并未考虑图像相邻像素间的相关性,因此融合结果不是很理想。

考虑图像相邻像素间的相关性,Burt 和 Kolczynski^[71]提出了基于区域特性选择的加权平均融合规则,将像素值(或系数)的融合选取与其所在的局部区域联系起来。

在 Li et al^[36]提出的融合规则中,其在选取窗口区域中较大的像素值(或系数)作为融合后像素值(或系数)的同时,还考虑了窗口区域像素(或系数)的相关性。

Chibani 和 Houacine^[61]在其融合规则中,通过计算输入原图像相应窗口区域中像素绝对值相比较大的个数,决定融合像素的选取。

基于窗口区域的融合规则由于考虑相邻像素的相关性,因此减少了融合像素的错误选取,融合效果得到提高。

Z Zhang 和 Blum^[57]提出了基于区域的融合规则,将图像中每个像素均看作区域或边缘的一部分,并用区域和边界等图像信息来指导融合选取。采用这种融合规则所得到的融合效果较好,但此规则相对其他融合规则要复杂。对于复杂的图像,此规则不易于实现。

3 多分辨率图像融合算法(Multiresolution image fusion)

多分辨率图像融合算法的研究主要有两个方面,一个方面是图像的多分辨率分解与重构,另一个方面是图像的融合规则。在本节,本文对多分辨率图像融合的几种典型算法进行论述说明。

对于多分辨率图像融合的分解与重构来说,主要可分为两类:

1) 金字塔形图像分解与重构.

要建立图像的各种金字塔分解一般要获得高斯金字塔分解.高斯金字塔是一个在尺寸上逐层减半的一组图像序列,即

$$G_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) G_{l-1}(2i+m, 2j+n), \quad (1)$$

$$0 < l \leq N.$$

其中: $G_l(i, j)$ 为第 l 层高斯金字塔图像; l 为分解层数; $\omega(m, n) = h(m)h(n) *$ 为 5×5 具有低通特性的窗口函数, h 的选取服从高斯密度分布函数.

· 拉普拉斯金字塔.

在构造出高斯金字塔图像序列后,对高斯金字塔进行插值膨胀,使第 l 层图像 G_l 膨胀后的尺寸与第 $l-1$ 层图像 G_{l-1} 尺寸相同,其运算如下:

$$G'_{l-1}(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) G_l[(i+m)/2, (j+n)/2]. \quad (2)$$

对高斯金字塔各层分别进行插值膨胀,便得到一个膨胀序列.

设 G_l^* 为拉普拉斯金字塔的第 l 层图像,则有

$$\begin{cases} G_l^* = G_l - G'_l, & N > l \geq 0, \\ G_N^* = G_N. \end{cases} \quad (3)$$

· 对比度金字塔.

对比度金字塔的构造类似于拉普拉斯金字塔,但它的每一层图像是高斯金字塔中相邻两层的图像的比率,即

$$\begin{cases} G_l^* = G_l / G'_l, & N > l \geq 0, \\ G_N^* = G_N. \end{cases} \quad (4)$$

图像的重构可按式得到:

$$\begin{cases} G_N = G_N^*, & N > l \geq 0, \\ G_l = G_l^* * G'_l \end{cases} \quad (5)$$

这种算法能够较好保留重要的图像细节.

· 梯度金字塔.

梯度金字塔算法是通过高斯金字塔中每层图像进行梯度算子运算,便可获得梯度金字塔图像分解.

$$D_{kl} = d_l * [G_l + \omega * G_k]. \quad (6)$$

其中: D_{kl} 为第 k 层第 l 方向梯度金字塔图像; G_k 为高斯金字塔的第 k 层图像; $*$ 为卷积运算; ω 为 3×3 的核,它满足 $\omega = \omega * \omega$; d_l 为第 l 方向的梯度算子,它们定义为

$$d_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}, d_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$d_3 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}, d_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

梯度金字塔的重构相对复杂些,方向拉普拉斯金字塔和 FSD (filter-subtract-decimate) 拉普拉斯金字塔图像作为中间结果将被构造.定义方向拉普拉斯金字塔为

$$\tilde{L}_{kl} = -\frac{1}{8} d_l * D_{kl}. \quad (8)$$

$\tilde{L}_{kl}$ 为第 k 层第 l 方向的方向拉普拉斯金字塔图像.

方向拉普拉斯金字塔 $\tilde{L}_{kl}$ 通过累加形成 FSD 拉普拉斯金字塔 L_k :

$$L_k = \sum_{l=1}^4 \tilde{L}_{kl}. \quad (9)$$

将 FSD 拉普拉斯金字塔转换为拉普拉斯金字塔图像

$$G_k^* = [1 - \omega] * L_k. \quad (10)$$

转换后得拉普拉斯金字塔图像后,可按拉普拉斯金字塔算法重构得到图像.

2) 基于小波变换的图像分解与重构.

· 离散小波变换.

采用离散小波变换进行图像融合处理,均采用的是 Mallat 二进制离散小波图像分解算法.设 A_l 为在空间分辨率 2^l 上对原图像的多分辨率表示,那么图像的小波分解公式为

$$\begin{cases} A_{j+1} = H_x H_y A_j, \\ D_{j+1} = G_x H_y A_j, \\ D_{j+1} = H_x G_y A_j, \\ D_{j+1} = G_x G_y A_j. \end{cases} \quad (11)$$

其中: H_x, H_y, G_x 和 G_y 分别表示为镜像共轭滤波器 H 和 G 分别作用在 A_j 上的行和列,即

$$\begin{cases} (H_x A)_{m,n} = \sum_i h_{i-2m} A_{i,n}, & (H_y A)_{m,n} = \sum_i h_{i-2n} A_{m,i}, \\ (G_x A)_{m,n} = \sum_i g_{i-2m} A_{i,n}, & (G_y A)_{m,n} = \sum_i g_{i-2n} A_{m,i}. \end{cases} \quad (12)$$

二维图像的重构公式为

$$A_j = \bar{H}_x \bar{H}_y A_{j+1} + \bar{G}_x \bar{H}_y A_{j+1} + \bar{H}_x \bar{G}_y A_{j+1} + \bar{G}_x \bar{G}_y A_{j+1}. \quad (13)$$

其中: $\bar{H}_x, \bar{H}_y, \bar{G}_x$ 和 $\bar{G}_y$ 分别是 H_x, H_y, G_x 和 G_y 的共轭转置.

· 离散小波框架.

在小波框架算法中,输入原图像 f 能够分成尺度框架序列 $s_l(i, j)$ 和小波框架序列 $\omega_l^k(i, j), k = 1, 2, 3$.

$$s_{l+1}(i, j) = \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} [h]_{\uparrow 2}(m) [h]_{\uparrow 2}(n) s_l(i-m, j-n),$$

$$\omega_{l+1}^1(i, j) = \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} [h]_{\uparrow 2}(m) [g]_{\uparrow 2}(n) s_l(i-m, j-n),$$

$$\omega_{l+1}^2(i, j) = \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} [g]_{\uparrow 2}(m) [h]_{\uparrow 2}(n) s_l(i-m, j-n),$$

$$\omega_{l+1}^3(i, j) = \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} [g]_{\uparrow 2}(m) [g]_{\uparrow 2}(n) s_l(i-m, j-n). \quad (14)$$

其中: $s_0 = f; h, g$ 为原型滤波器,其扩展 $[h]_{\uparrow 2}, [g]_{\uparrow 2}$ 是通过在元素间插入适当的零元素形成的.

图像的重构为

$$s_l(i, j) = \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} [\bar{h}]_{\uparrow 2}(m) [\bar{h}]_{\uparrow 2}(n) s_{l+1}(i-m, j-n) + \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} [\bar{h}]_{\uparrow 2}(m) [\bar{g}]_{\uparrow 2}(n) s_{l+1}(i-m, j-n) +$$

$$\sum_{m,n \in \tilde{S}} [\tilde{g}]_{\star 2}(m) [\tilde{h}]_{\star 2}(n) s_{l+1}(i-m, j-n) + \sum_{m,n \in \tilde{S}} [\tilde{g}]_{\star 2}(m) [\tilde{g}]_{\star 2}(n) s_{l+1}(i-m, j-n). \quad (15)$$

其中: $\tilde{h}, \tilde{g}$ 为重构造滤波器.

对于多分辨率图像融合的融合规则来说,主要可分为3类:

· 基于像素的图像融合规则.

在将原图像分解成不同分辨率图像的基础上,选取绝对值最大的像素值(或系数)作为融合后的像素值(或系数),即

$$LF_l(i, j) = \begin{cases} LA_l(i, j), & \text{当 } |LA_l(i, j)| \geq |LB_l(i, j)|, \\ LB_l(i, j), & \text{当 } |LA_l(i, j)| < |LB_l(i, j)|. \end{cases} \quad (16)$$

LA_l, LB_l 分别为第 l 层分解图像, LF_l 为相应的融合后图像.

· 基于窗口的图像融合规则.

在 Burt 等人的融合规则中,首先选取一小的窗口(一般为 3×3 或 5×5 , 融合像素点作为中心像素点),求取窗口区域的能量值 $E(m, n, l)$:

$$E(m, n, l) = \sum_{s \in S, t \in T} w(s, t) \cdot [LI_l(m+s, n+t)]^2. \quad (17)$$

其中: $w(s, t)$ 为一权系数, $\sum_{s \in S, t \in T} w(s, t) = 1$; S, T 为窗口的大小; LI_l 为第 l 层的图像.

计算图像对应窗口局部区域归一化相关度 $M_{A,B}(m, n)$ 为

$$M_{A,B}(m, n, l) = \frac{2 \sum_{s \in S, t \in T} w(s, t) \cdot LA_l(m+s, n+t) \cdot LB_l(m+s, n+t)}{E_A(m, n, l) + E_B(m, n, l)}. \quad (18)$$

每一层的融合选取为

$$LF_l = \omega_A \cdot LA_l + \omega_B \cdot LB_l. \quad (19)$$

其中: ω_A, ω_B 为相应的权系数.

如果 $M_{A,B}(m, n, l)$ 小于设定的门限 α 时, $\omega_A = 0, \omega_B = 1$; 否则 $M_{A,B}(m, n, l) \geq \alpha$ 时,

$$\omega_A = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - M_{A,B}(m, n, l)}{1 - \alpha} \right), \quad \omega_B = 1 - \omega_A. \quad (20)$$

在 Li et al 的融合规则中,通常采用选取窗口区域中最大像素值(或系数)作为融合后像素值(或系数).在选取像素值(或系数)的同时,这种融合规则也考虑了窗口区域像素的相关性.也就是说,如果中心融合像素点的融合值来自原图像 A ,而其周围像素点的融合值绝大多数来自原图像 B ,那么中心融合像素点的融合值将变换为图像 B 的对应像素灰度值.

· 基于区域的图像融合规则.

在 Z Zhang 和 Blum 提出的基于区域的融合规则中,在多分辨率图像分解的基础上,对低频图像进行 Canny 边缘算子运算,得到边缘图像.利用边缘图像提供的边缘信息进行区域分割,得到区域图像.图像中的每个区域对应图像中一个对象或对象的一部分.然后,在对应的高频图像内,计算区域的平均能量 $E_l(R^k)$:

$$E_l(R^k) = \frac{1}{N_k} \sum_{i \in R^k} P(i). \quad (21)$$

其中: R^k 为高频图像内的对应区域; N_k 为区域内的像素数; $P(i)$ 为像素灰度的绝对值.

在进行融合运算时,将融合像素点所处的空间位置分为处于边界的像素点和处于区域的像素点.当进行融合的像素在边缘上时,采用灰度绝对值或其窗口区域中的第 i 个最大灰度值作为融合的量测参数;当进行融合的像素在区域上时,用区域的平均能量作为像素融合的量测参数.在比较参数的同时,还应考虑边界像素点与区域像素点的优先选择;小区域内像素点与大区域内像素点的优先选择等等.

4 存在问题及展望(Problems and prospects)

随着图像融合技术在其它领域的广泛应用,更多成像传感器的使用,其所需融合的图像更加繁杂,这些都对已有算法的有效性产生很大的影响.对于图像的分解与重构,到现在未找到非常适合图像融合的方法;图像融合规则的研究还处于起步阶段,未有严格的理论依据.融合图像的客观定量评价方法也需要大量的深入研究.有鉴于此,对多分辨率图像融合的研究侧重点和内容归纳如下:

1) 适合图像融合的多分辨率分解与重构方法.

图像的多分辨率分解与重构对于多分辨率图像融合来说是必不可少的.不同的分解和重构方法会得出不同质量的融合图像,它对图像融合的重要性不言而喻.因此,获得适合图像融合的多分辨率分解与重构方法将是多分辨率图像融合的一个重要研究方面.

2) 新的融合量测指标.

以往所有有关多分辨率图像融合算法的研究,它们大多是已基于像素(或窗口、区域)的“能量”作为融合测度指标,用来反映各分辨率下系数所包含信息的多少.但用此种融合测度指标并非总是合适的(例如干扰噪声).为此,需要找到更能准确反映各分辨率下系数的相对重要性的融合测度指标.

3) 新的图像融合规则.

以往从基于像素、基于窗口到基于区域的融合规则进行了大量研究,取得了一定的成果.然而随着图像融合技术不断应用于其他领域,使得输入原图像及融合目的和要求有着很大的不同,为此需要找到新的图像融合规则以适应这种需求.

4) 分解层数对融合图像的影响及层数优化.

在以往的多分辨率图像融合研究中,已发现在进行多分辨率分解时,不同的分解层数的图像融合有着不同的融合结果,并不是越多的分解层数有着越好的融合结果.分解层数对融合图像的影响及如何选取合适的分解层数都有待进行深入研究.

5) 融合图像的客观评价方法.

融合质量的客观评价可用来指导融合,提高融合的效果.然而,图像融合的客观评价一直未受太多的关注.至今为止,尚未出现公认的客观评价方法.为此,非常有必要进行深入研究.

参考文献(References):

- [1] JIA Y H. Fusion of Landsat TM and SAR images based on principal component analysis [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, 13(1): 46 – 49.
- [2] CHAVEZ P S, SIDES S C, ANDERSON J A. Comparison of three difference methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, 57(3): 295 – 303.
- [3] CHAVEZ P S, KWARTENG A Y. Extracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(4): 339 – 348.
- [4] TOET A, WALRAVEN J. New false color mapping for image fusion [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(3): 650 – 658.
- [5] WAXMAN A M, FAY D A, GOVE A N, et al. Color night vision: fusion of intensified visible and thermal IR imagery [C]// *Proc of SPIE on Synthetic Vision for Vehicle Guidance and Control*. Washington: SPIE Press, 1995: 58 – 68.
- [6] 蒋晓瑜, 高稚允, 周立伟. 基于假彩色的多重图像融合[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(5): 465 – 469.
(JIANG Xiaoyu, GAO Zhiyun, ZHOU Liwei. Multi-sensor image fusion based on false color [J]. *J of Beijing Institute of Technology*, 1997, 17(5): 465 – 469.)
- [7] WRIGHT W A. Fast image fusion with a Markov random field [C]// *Proc of Int Conf on Image Processing and Its Applications*. Stevenage, UK: IEE Press, 1999: 557 – 561.
- [8] 耿伯英, 许锦洲, 杨静宇. 一种基于空频域特征的多传感器图像融合方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(4): 18 – 22.
(GENG Boying, XU Jinzhou, YANG Jingyu. An approach based on the features of space-frequency domain of image for fusion of edge maps obtained through multi-sensors [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(4): 18 – 22.)
- [9] 倪国强. 多波段图像融合算法研究及其新发展(I) [J]. 光电技术与信息, 2001, 14(5): 11 – 17.
(NI Guoqiang. Study on multi-band image fusion algorithms and its progressing (I) [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2001, 14(5): 11 – 17.)
- [10] SMITH S, SCARFF L A. Combining visual and IR images for sensor fusion: two approaches [C]// *Proc of SPIE on Visual Data Interpretation*. Washington: SPIE Press, 1992: 102 – 112.
- [11] SHARAMA R, PAVEL M. Adaptive and statistical image fusion [C]// *1996 Society for Information Display (SID) Symposium Digest of Technical Papers*. San Jose, USA: SID Press, 1996: 969 – 972.
- [12] COSTANTINI M, FARINA A, ZIRILI F. The fusion of different resolution SAR images [J]. *Proc of the IEEE*, 1997, 85(1): 139 – 146.
- [13] XIA Y, LEUNG H, BOSSÉ E. Neural data fusion algorithms based on a linearly constrained least square method [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2002, 13(2): 320 – 329.
- [14] FECHNER T, GODLEWSKI G. Optimal fusion of TV and infrared images using artificial neural networks [C]// *Proc of SPIE on Applications and Science of Artificial Neural Networks*. Washington: SPIE Press, 1995: 919 – 925.
- [15] BROUSSARD R P, ROGERS S K, OXLEY M E, et al. Physiologically motivated image fusion for object detection using a pluse coupled neural network [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1999, 10(3): 554 – 563.
- [16] SHKVAROKO Y, JAIME-RIVAS R. Remotely sensed image fusion with dynamic neural networks [C]// *Proceeding of the 4th Int Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and SubMillimeter Waves" (MSMW'2001)*. New Jersey: IEEE Press, 2001: 244 – 246.
- [17] BURT P J, ADELSON E H. The Laplacian pyramid as a compact image code [J]. *IEEE Trans on Communications*, 1983, 31(4): 532 – 540.
- [18] DO M N, VETTERLI M. Frame reconstruction of the Laplacian pyramid [C]// *Proc of Int Conf on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. New Jersey: IEEE Press, 2001: 3641 – 3644.
- [19] AIAZZI B, ALPARONE L, ARGENTI F, et al. Multispectral fusion of multisensor image data by the generalized Laplacian pyramid [C]// *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New Jersey: IEEE Press, 1999: 1183 – 1185.
- [20] AIAZZI B, ALPARONE L, ARGENTI F, et al. Multisensor image fusion by frequency spectrum substitution: subband and multirate approaches for a 3:5 scale ratio case [C]// *Proc of Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New Jersey: IEEE Press, 2000: 2629 – 2631.
- [21] TOET A. Image fusion by a ratio of low-pass pyramid [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1989, 9(4): 245 – 253.
- [22] TOET A, RUYVEN L J, VALETON J M. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid [J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(7): 789 – 792.
- [23] TOET A. Multiscale contrast enhancement with applications to image fusion [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(5): 1026 – 1031.
- [24] ZHOU Y T. Multi-sensor image fusion [C]// *Proc of Int Conf on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1994: 193 – 197.
- [25] LI H, ZHOU Y T, CHELLAPPA R. SAR/IR sensor image fusion and real-time implementation [C]// *Proc of Int Conf on Signals, Systems and Computers*. New Jersey: IEEE Press, 1996: 1121 – 1125.
- [26] TOET A. A morphological pyramidal image decomposition [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1989, 9(4): 255 – 261.
- [27] BURT P J. A gradient pyramid basis for pattern selective image fusion [C]// *Proc of the Society for Information Display Conference*. San Jose: SID Press, 1992: 467 – 470.
- [28] BARRON D R, THOMAS O D J. Image fusion through consideration of texture components [J]. *IEEE Trans on Electronics Letters*, 2001, 37(12): 746 – 748.
- [29] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and*

- Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674 – 693.
- [30] MALLAT S G. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models [J]. *IEEE Trans on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1989, 37(12): 2091 – 2110.
 - [31] VETTERLI M, HERLEY C. Wavelets and filter banks: theory and design [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1992, 40(9): 2207 – 2232.
 - [32] OLIVIER R. A discrete-time multiresolution theory [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1993, 41(8): 2591 – 2606.
 - [33] MALLAT S, ZHONG S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(7): 710 – 732.
 - [34] ALDROUBI A, ABRY P, UNSER M. Construction of biorthogonal wavelets starting from any two multiresolutions [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1998, 46(4): 1130 – 1133.
 - [35] CHIPMAN L J, ORR T M, GRAHAM L N. Wavelets and image fusion [C] // *Proc of Int Conf on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1995: 248 – 251.
 - [36] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S. Multisensor image fusion using the wavelet transform [J]. *Graphical Models and Image Process*, 1995, 57(3): 235 – 245.
 - [37] HASSAINIA F, MAGAFIA I, LANGEVIN F, et al. Image fusion by orthogonal wavelet transform and comparison with other methods [C] // *Proc of Int Conf on Engineering in Medicine and Biology Society*. New Jersey: IEEE Press, 1992: 1246 – 1247.
 - [38] SLAMANI M A. Enhancement and fusion of data for concealed weapons detection [C] // *Proc of SPIE on Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition VI*. Washington: SPIE Press, 1997: 8 – 19.
 - [39] RAMAC L C, UNER M K, VARSHNEY P K. Morphological filters and wavelet based image fusion for concealed weapons detection [C] // *Proc of SPIE on Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Application II*. Washington: SPIE Press, 1998: 110 – 119.
 - [40] GHASSEMIAN H. Multi-sensor image fusion using multirate filter banks [C] // *Proc of Int Conf on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2001: 846 – 849.
 - [41] PARK J H, KIM K K, YANG Y K. Image fusion using multiresolution analysis [C] // *Proc of Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New Jersey: IEEE Press, 2001: 709 – 711.
 - [42] YAN D M, ZHAO Z M. Wavelet decomposition applied to image fusion [C] // *Proc of Int Conf on Info-tech and Info-net*. New Jersey: IEEE Press, 2001: 291 – 295.
 - [43] WILSON T A, ROGERS S K, MYERS L R. Perceptual-based hyperspectral image fusion using multiresolution analysis [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(11): 3154 – 3164.
 - [44] NIKOLOV S G, BULL D R, CANAGARAJAH C H, et al. Image fusion using a 3-D wavelet transform [C] // *Proc of Int Conf on Image Processing and Its Applications*. Stevenage: IEE Press, 1999: 235 – 239.
 - [45] GRAHAM L, ADHAMI R. Fusion of coincident images using spatial frequency discrimination by application of the wavelet transform [C] // *Proc of Int Conf on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*. New Jersey: IEEE Press, 1994: 326 – 329.
 - [46] TSENG D C, CHEN Y L, LIU M S C. Wavelet-based multispectral image fusion [C] // *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New Jersey: 2001: 1956 – 1958.
 - [47] 全海英, 杨源, 张懿. 一种基于第二代小波变换的图像融合算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2001, 23(5): 74 – 79.
(QUAN H Y, YANG Y, ZHANG Y, et al. An image fusion approach based on second generation wavelet transform [J]. *System Engineering and Electronics*, 2001, 23(5): 74 – 79.)
 - [48] YANG X, YANG W H, PEI J H. Different focus points images fusion based on wavelet decomposition [C]. *Proc of Int Conf on Information Fusion*. New Jersey: IEEE Press, 2000: MoD – 3 – MoD – 8.
 - [49] 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.
(LI Shutao, WANG Yaonan. Multisensor image fusion based on tree-structure wavelet decomposition [J]. *J of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(3): 219 – 222.)
 - [50] 蒋晓瑜, 高稚允, 周立伟. 小波变换在多光谱图像融合中的应用[J]. *电子学报*, 1997, 25(8): 105 – 108.
(JIANG Xiaoyu, GAO Zhiyun, ZHOU Liwei. Multispectral image fusion using wavelet transform [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1997, 25(8): 105 – 108.)
 - [51] KOREN I, LAINE A, TAYLOR F. Image fusion using steerable dyadic wavelet transform [C] // *Proc of Int Conf on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1995: 232 – 235.
 - [52] FREEMAN W T, ADELSON E H. Steerable filters for early vision, image analysis, and wavelet decomposition [C] // *Proc of Int Conf on Computer Vision*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1990: 406 – 415.
 - [53] FREEMAN W T, ADELSON E H. The design and use of steerable filters [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(9): 891 – 906.
 - [54] SIMONCELLI E P, FREEMAN W T. Shiftable multiscale transforms [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1992, 38(2): 587 – 607.
 - [55] LIU Z, TSUKADA K, HANASAKI K, et al. Image fusion by using steerable pyramid [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(9): 929 – 939.
 - [56] SIMONCELLI E P, FREEMAN W T, ADELSON E H, et al. The steerable pyramid: a flexible architecture for multi-scale derivative computation [C] // *Proc of Int Conf on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1995: 444 – 447.
 - [57] ZHANG Z, BLUM R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1999, 87(8): 1315 – 1326.
 - [58] OLIVER R. Image sequence fusion using a shift invariant wavelet transform [C] // *Proc of Int Conf on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1997: 288 – 291.
 - [59] UNSER M. Texture classification and segmentation using wavelet frames [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1995, 11(4): 1549

- 1560.
- [60] NUNÉZ J, OTAZU X, FORS O, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3):1204-1211.
- [61] CHIBANI Y, HOUACINE A. On the use of the redundant wavelet transform for multisensor image fusion [C]// *Proc of Int Conf on Electronics, Circuits and Systems*. New Jersey: IEEE Press, 2000: 442-445.
- [62] HOLSCHNEIDER M, TCHAMITCHIAN P. *Les Ondelettes en 1989* [M]. Paris: Springer-Verlag, 1990:102.
- [63] 张晓东, 李德仁, 蔡东翔, 等. α trous 小波分解在边缘检测中的应用[J]. 武汉大学学报, 2001, 26(1): 29-33.
(ZHANG Xiaodong, LI Deren R, CAI Dongxing, et al. α trous wavelet decomposition applied to detecting image edge [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(1): 29-33.)
- [64] 杨晓梅, 朱长青. 多进制小波变换及其在影像分析中的应用[J]. 中国图像图形学报, 1999, 4(2): 157-160.
(YANG Xiaomei, ZHU Changqing. Multi-band wavelet transform and its application in image analysis [J]. *J of Image and Graphics*, 1999, 4(2): 157-160.)
- [65] 朱长清, 王倩, 杨晓梅. 基于多进制小波的 SPOT 全色影像和多光谱遥感影像融合[J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 132-135.
(ZHU Changqing, WANG Qian, YANG Xiaomei. The fusion of SPOT panchromatic and multi-spectral remote sensing image data by the multi-band wavelet [J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(2): 132-135.)
- [66] 王智均, 李德仁, 李清泉. 多进制小波理论在 SPOT 和 TM 影像融合中的应用[J]. 武汉大学学报, 2001, 26(2): 24-28.
(WANG Zhijun, LI Deren, LI Qingquan. Fusion of SPOT-P and TM multispectral image by M-band wavelet theory [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(2): 24-28.)
- [67] 李树涛. 多传感器图像信息融合方法与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
(LI Shutao. *Research on methods and application of multi-sensor image information fusion* [D]. Changsha: Hunan University, 2001.)
- [68] BURT P. *The Pyramid as a Structure for Efficient Computation, Multiresolution Image Processing and Analysis* [M]. London: Springer-Verlag, 1984.
- [69] PETROVIC V, XYDEAS C. Cross band pixel selection in multi-resolution image fusion [C]// *Proc of SPIE on Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Application*. Washington: SPIE Press, 1999:319-326.
- [70] 蒲恬, 方庆喆, 倪国强. 基于对比度的多分辨图像融合[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 116-118.
(PU Tian, FANG Qingzhe, NI Guoqiang. Contrast-based multiresolution image fusion [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(12): 116-118.)
- [71] BURT P J, KOICZYNSKI R J. Enhancement with application to image fusion [C]// *Proc of the 4th Int Conf on Computer Vision*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1993: 173-182.

作者简介:

王 宏 (1972—), 男, 现在上海交通大学自动化系攻读博士学位. 主要研究方向: 图像融合, 多分辨率分析. E-mail: wangh@sjtu.edu.cn 或 hongwmy@yahoo.com.cn;

敬忠良 (1960—), 男, 1994 年 11 月毕业于西北工业大学自动控制系, 获博士学位. 现为上海交通大学教授, 博士生导师, “长江学者奖励计划”特聘教授. 主要研究方向: 多传感器信息融合与控制, 目标跟踪, 随机模糊神经网络等. E-mail: zljing@mail.sjtu.edu.cn;

李建勋 (1969—), 男, 1996 年 11 月毕业于西北工业大学自动控制系, 获博士学位, 现为上海交通大学副教授. 主要研究方向: 信号与信息处理, 信息融合. E-mail: jxli@mail.sjtu.edu.cn.