

文章编号: 1003-501X(2007)11-0078-04

基于边缘信息的偏振图像融合算法及评价

张晶晶^{1, 2}, 方勇华¹(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室, 安徽 合肥 230031;
2. 安徽大学 电子工程与技术学院, 安徽 合肥 230039)

摘要: 偏振遥感图像通常都采用强度、偏振度、偏振角来表征目标偏振特性。本文提出的基于边缘信息的偏振图像融合算法是将三幅偏振图像利用离散小波变换把图像分解成不同尺度的低频和高频部分, 采用小波区域窗口和子区域窗口统计把小波系数分类成边缘和非边缘系数, 通过这些方法进行有效的边缘细节信息提取。在融合处理中, 低频图像的小波系数平均值作为融合后的低频系数, 高频细节系数根据不同区域特征选择方法以及对输入图像小波系数的窗口区域方差来确定融合后高频小波系数。仿真实验结果表明, 这样使得融合后的图像细节更真实更丰富, 图像的偏振特性体现更为充分, 同时减少对源图像的预处理要求, 使图像在整体上有较好的视觉效果。从而证明这种方法能够在保留图像微小细节方面获得满意的结果, 且算法有效性优于其他的图像融合方法。

关键词: 偏振图像; 小波分解; 边缘检测; 图像融合

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

Algorithm and evaluation for polarization image fusion based on edge information

ZHANG Jing-jing^{1,2}, FANG Yong-hua¹(1. Remote Sensing Lab, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China,
2. The School of Electronic Science and Technology of Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: An algorithm for polarization image fusion based on edge information is presented, which decomposes three polarization images into low frequency part and high frequency part in different level by discrete wavelet transform. Local window and local sub-window statistic in the wavelet domain is used to further classify the wavelet coefficients into the edge and non-edge coefficients for extracting edge information. In the fusion process, the average of low frequency coefficients is regarded as low frequency coefficient of fused image, the fused detailed coefficients are obtained by several different area-based feature selection methods, and each coefficient equals to the corresponding input image wavelet coefficient that has the greatest multi-window local deviation. The simulation experiment shows that the algorithm can cause the detail of image becoming true and rich, and make polarization characteristic becoming sufficiency after fusion. At the same time, it can reduce pretreatments of original image, and take a great visual effect on the whole. Experimental results show that the proposed algorithm can achieve an excellent effect on retaining subtle image detail. The new image fusion algorithm provides a performance better than other methods.

Key words: polarization image; wavelet transform; edge detection; image fusion

引 言

图像融合技术就是将多通道的关于同一目标或场景的图像经过一定处理, 融合多个源图像中的冗余信息和互补信息, 突出和强化图像中的有用信息, 增加图像的可靠性以使综合后的信息更加丰富, 对同一场

收稿日期: 2006-11-12; 收到修改稿日期: 2007-09-26

作者简介: 张晶晶(1974-), 女(汉族), 浙江宁波人, 讲师, 在读博士, 主要研究工作是遥感图像的处理。E-mail: helenzjj@aiofm.ac.cn

景或目标描述更加准确、更全面、更精细。图像的特征更适合观察，以利于对图像进一步分析、理解及目标的测试、识别或跟踪。因此，图像融合日益得到重视^[1]。

目前图像融合处理主要在三个不同层次上进行：像素级融合、特征级融合和决策级融合。像素级融合是特征级融合和决策级融合的基础，像素级融合主要采用简单图像融合方法，如极大值法、加权平均法等；基于塔形分解法，如高斯金字塔分解法、拉普拉斯金字塔分解法、对比度金字塔法等；以及基于小波分解法，如最大值选择策略、频带一致性策略、局部相关匹配策略、区域能量策略、边缘特征提取策略等^[2]。但简单图像融合方法会对图像进行平滑，在一定程度上造成图像边缘轮廓变得模糊，融合能力差。后两种分解法是一种多尺度、多分辨率图像融合，其融合过程是在不同尺度、不同空间分辨率、不同分解层上分别进行的，可以有针对性地突出各图像的重要特征和细节信息，从而得到更佳的融合效果。但相比之下，由于塔形分解是图像的冗余分解，各层数据有相关性，除梯度塔形分解有方向性外，其余均无方向性^[3-4]。

小波分解是时间-尺度分析和多分辨率分析的一种新方法，是时间与频率上的局部分析，能更加有效的提取信号和分析局部信息。图像的小波分解是通过二维离散小波变换把图像分解为不同分辨率的高频和低频小波系数，分别提取二维图像的低频分量以及水平、垂直、45°方向的高频分量，图像融合就可以在这些特征域内进行针对性的融合^[5]。

偏振遥感图像通常采用 Stokes 参量 I、Q、U 表征偏振遥感信息，然而，这样表征目标信息都是独立的。因此，根据偏振图像这一特征，融合后的图像应该保留强度图像所表现的低频特性，又突出偏振特性所表现目标的高频特征，从而改善图像目标的识别能力。本文采用小波变换对偏振图像进行融合，采用区域统计方差最大值实现高频图像的有效边缘检测，并采用区域方差最大的像素以及不同特征融合规则来决定融合图像的像素，这样尽可能保留图像的真实边缘细节部分，可有效地将来自三个不同偏振角图像的特征与细节有机地融合起来^[6]。

1 图像的小波分解和重构

小波变换是正交变换，这使分解具有正交性，但正交小波变换的正交滤波器不具有线性相位特性，其产生的相位失真将会引起图像边缘的失真，所以图像数据融合一般采用双正交小波变换^[7]。

基于小波变换的图像融合算法的第一步就是对图像进行小波分解。在二分的情况下，Mallat 从函数的多分辨率空间概念出发，提出了小波变换的快速算法，在二维的情况下，设 $V_j^2(j \in Z)$ 是空间 $L_2(R_2)$ 的一个可分离多分辨率分析，对每一 $j(j \in Z)$ 来说，尺度函数系 $\{\Phi_j, m_1, m_2\}(m_1, m_2 \in Z_2)$ 构成子空间 V_j^2 的规范正交基，二维离散数字图像信号 $f(x, y) \in L_2(R_2)$ 可以用它在子空间列 $\{V_j^2\}(j \in Z)$ 的正交投影 $A_j f(x, y)$ 近似表示，设原始图像为 $A_0 f(x, y)$ ，则有

$$A_j f(x, y) = A_{j+1} f + D^1_{j+1} f + D^2_{j+1} f + D^3_{j+1} f \quad (1)$$

$$\text{其中: } A_{j+1} f = \sum_{m_1, m_2 \in Z} C_{j+1, m_1, m_2} \Phi_{j+1, m_1, m_2}, D^{\varepsilon}_{j+1} f = \sum_{m_1, m_2 \in Z} D^{\varepsilon}_{j+1, m_1, m_2} \Psi^{\varepsilon}_{j+1, m_1, m_2} \quad (2)$$

其中 $\varepsilon = 1, 2, 3$ 。若用 H 和 G 分别表示小波函数的镜像共轭滤波器的低通和高通滤波器组， S_0 表示原始图像，则二维的小波变换的快速分解公式为

$$\begin{aligned} S_{i+1} &= H_r H_c S_i, & W_{i+1}^h &= H_r G_c S_i \\ W_{i+1}^v &= G_r H_c S_i, & W_{i+1}^d &= G_r G_c S_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中： H_r 、 G_r 和 H_c 、 G_c 表示镜像共轭滤波器 H 和 G 分别作用在行和列上。这样原图像 S_0 的重构算法可以描述为

$$S_0 = \sum_{i=1}^n (H_r^* G_c^* W_i^h + G_r^* H_c^* W_i^v + G_r^* G_c^* W_i^d) + H_r^* H_c^* S_n \quad (4)$$

其中： H_r^* 、 G_r^* 和 H_c^* 、 G_c^* 表示镜像共轭滤波器 H_r 、 G_r 和 H_c 、 G_c 的共轭转置矩阵。

图像经二维小波变换分解之后，分别得到图像的低频分量、水平高频分量，垂直高频分量，因此，一副图像的小波变换就是将该图像分解在不同频率中的不同特征域上。

2 基于边缘检测的融合策略

提出基于边缘检测的融合策略,主要是考虑相邻象素之间的相关性,提取图像的边缘点,以图像的边缘为参考,围绕边缘建立融合策略。因为其中低频图像反映原图像的近似和平均特性,集中原图像的大部分信息;高频子图像像素 503C 在零值左右波动,绝对值较大的像素反映原图像的亮度突变特性,体现原图像的突变特性,对应于原图像的边缘、区域边界等,也称边缘子图像,所以融合一般在高频部分进行^[8]。

本文提出的融合策略,在对应低频系数方向上,采用取平均值的方法来构成融合图像小波低频系数矩阵。对于反映图像细节的高频小波系数采用边缘检测来分析一定区域不同方向的边缘性,以便提取图像的边缘点以更好地体现图像的细节。这里采用基于小波变换局部方差的融合规则,将小波分解后的高频子图像分成一系列小区域,通过滑动邻域操作分别计算各个小块的方差,由此判断各个区域的边缘特征以确定采用适当的高频融合系数。为了减少计算量,本文选用 3×3 的邻域进行操作。

设小波系数区域中心点 $W(i, j)$ 的主窗口区域和子窗口区域方差分别为 $\sigma_w(i, j)$ 和 $\sigma_{sw}(i, j)$, 则利用主窗口区域和子窗口区域方差 $\sigma_w(i, j)$ 和 $\sigma_{sw}(i, j)$ 的大小,我们就可将小波系数分类为重要边缘点和非重要边缘点。调整原理是采用概率上的“多数”原则,即在频带数据融合时对每个像素进行如下处理:如果某个像素的 8 邻域中至少有 5 个像素是重要边缘点,说明该区域是有效边缘区。如果某个像素的 8 邻域中至少有 5 个像素为非重要的边缘区,说明该区域是有效平滑区。

中心点 $W(i, j)$ 的方差可取为

$$\sigma(i, j) = \begin{cases} \sigma_{sw}(i, j) & , \sigma_{sw}(i, j) \geq \sigma_w(i, j) \\ \sigma_w(i, j) & , \sigma_{sw}(i, j) < \sigma_w(i, j) \end{cases} \quad (5)$$

具体融合步骤如下:

1) 对待融合的源偏振图像 A, B, C(分别为 0° 、 60° 、 120°)分别进行离散双正交小波变换分解生成低频图像和一系列不同尺度的高频图像。

2) 利用式(5)分别计算待融合高频子图像对应局部方差。

3) 利用局部方差准则进行边缘区和平滑区的区分,再分别进行对应高频子图像的融合,设融合后图像高频为 $f(i, j)$, 则对于有效边缘区则取方差最大的高频系数;对于有效平滑区则加权

$$f(i, j) = \frac{\sigma_A}{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C} W_A(i, j) + \frac{\sigma_B}{\delta_A + \delta_B + \sigma_C} W_B(i, j) + \frac{\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C} W_C(i, j) \quad (6)$$

4) 对 A, B, C 图像对应的低频小波系数进行平均作为融合后图像的低频小波系数。

5) 最后将融合变换获得的小波系数进行离散双正交小波的逆变换即可得到融合后的图像。

3 实验结果及评价

本文使用了天津地区的一组 555nm 波段的航空偏振图像进行融合,该图像是由航空多波段偏振 CCD 相机于 2003 年 12 月在天津进行航空实验获取。图 1 为偏振角分别为 0° 、 60° 、 120° 的三幅偏振输入图像,

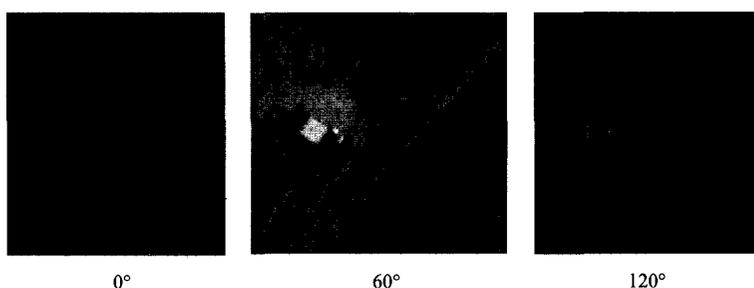


图 1 输入图像序列

Fig.1 Input image sequence

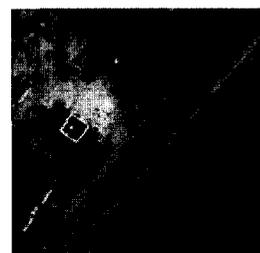


图 2 本文方法融合

Fig.2 Images calculated by proposed method

图2为用本文方法得到的图像。

对于图像融合结果的评价分为主观评价和客观评价两种，它们一般结合起来使用。主观评价是通过目视效果进行分析，客观评价就是利用图像的统计参数进行判断的。本文用均值、灰度标准差、熵值以及平均交叉熵和均方根交叉熵等统计特性对融合图像进行定量分析。

1) 灰度均值

$$B_{\text{mean}} = \frac{1}{MN} \sum_{i,j} F(i,j) \quad (7)$$

均值为像素的灰度平均值，体现图像的平均亮度。

2) 灰度标准差

设一副图像的灰度分布为 $P = \{P(0), P(1), \dots, P(i), \dots, P(L-1)\}$ ，其中 L 为灰度级， $P(i)$ 为灰度等于 i 的像素数与图像的总像素之比，且有 $\sum_{i=0}^{L-1} P(i) = 1$ 成立。则图像的灰度标准差定义为

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (i - \sum_{k=0}^{L-1} KP(K))^2 P(i)} \quad (8)$$

灰度标准差反映灰度相对平均灰度的离散情况，标准差越大，则灰度分布越散，体现的视觉效果也越佳。

3) 信息熵

图像的信息熵定义为

$$EN = -\sum_{i=0}^{L-1} P(i) \log_2(P(i)) \quad (9)$$

信息熵从整体上表示了信息熵的总体特性，熵越大图像中包含的信息量就越大，信息越丰富，融合效果会越好。

4) 清晰度

清晰度采用梯度法来衡量，图像的梯度计算为

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2) / 2} \quad (10)$$

其中： ΔI_x 和 ΔI_y 分别为 x 和 y 方向上的差分， n 为图像的大小。如果 \bar{g} 越大，则图像的清晰度越高，融合会有效地改善图像的清晰度^[9]。

从表1的数据可以看出，该方法融合结果的均值即平均亮度适中，标准差明显增大及其灰度分布最散，可见该方法最符合人眼的视觉特性。该结果熵值比其它方法都有较大幅度的提高，可见其细节更为清晰、信息量更为丰富。和原图像相比，清晰度也大有提高。另外，从

融合的结果可以看出偏振图像各自突出的特征被有机的结合，增强了偏振遥感图像的认识能力。

4 结 论

本文在总结前人的几种常用图像融合算法的基础上，提出了一种新的能融合三副图像的融合算法，即基于边缘信息小波融合算法。总体上说小波变换的多分辨图像分解融合效果应该说是比较好的，但本文提出的融合算法考虑了不同方向的图像细节，同时消除了噪声引起的伪边缘，使图像细节更真实更丰富，减小对源图像的预处理要求，使图像在整体上有较好的视觉效果。融合后的偏振图像在很好地保留图像丰富光谱信息的同时，较大地提高了其空间分辨率，也就为最终增强图像的信息清晰度，改善解译的精度，以及提高信息的可靠性及使用效率，提供了技术上的支持。

表1 对本文融合算法的融合图像定量指标

Table 1 Guide line of fusion image by the proposed algorithm

B_{mean}	δ	EN	\bar{g}
120.31	39.53	4.96	12.779

参考文献:

- [1] 郭忠武, 王广志, 丁辉, 等. 人体运动检测中的标志点识别算法[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22(2): 312-315.
GOU Zhong-wu, WANG Guang-zhi, DING Hui, et al. Algorithm for Recognizing the Markers in Human Motion Detection[J]. **Journal of Biomedicine Engineering**, 2005, 22(2): 312-315.
- [2] Howard Richard T, Bryan Thomas C, Book Michael L, et al. Active Sensor System for Automatic Rendezvous and Docking[J]. **SPIE**, 1997, 3065: 106-115.
- [3] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
YU Qi-feng, LU Hong-wei, LIU Xiao-lin. **Precision Measurement and Motion Measurement Based on Image**[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [4] ZHANG Xiao-miao, LIU Xiao-lin, YU Qi-feng. Comparative High Contrast Area Extraction in Image Based on Spatial-Contrast Feature[A]. **International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV'05)**[C]. Beijing, China: IEEE, 2005: 133-136.
- [5] 郑毅. 基于Zernike矩的管道弯曲度高精度检测[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(5): 523-526.
ZHENG Yi. Camber Measurement Based on Zernike Moments at High Accuracy[J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2006, 27(5): 523-526.
- [6] 李春艳, 谢华, 李怀锋, 等. 高精度星敏感器星点光斑质心算法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 41-44.
LI Chun-yan, XIE Hua, LI Huai-feng, et al. Centroiding algorithm for high-accuracy star tracker[J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, 33(2): 41-44.
- [7] 陈兴美, 严壮志. 基于FPGA的红外光斑中心实时检测[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 401-405.
CHEN Xing-mei, YAN Zhuang-zhi. Real-time detection of infrared spot based on FPGA[J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2005, 34(4): 401-405.

~~~~~  
(上接第81页)

## 参考文献:

- [1] Lemeshefsky G P. Multispectral Multisensor Image Fusion Using Wavelet Transforms[J]. **SPIE**, 1999, 3716: 214-222.
- [2] S Mallat, S Zhang. Characterization of signals form multiscaled edges[J]. **IEEE Trans PAMI-14**, 1992, PAMI-14(7): 710-732.
- [3] Simone G, Farina A. Image Fusion Techniques for Remote Sensing Applications[J]. **Information Fusion**, 2003, 3: 3-15.
- [4] Baccar M, Gee L. Segmentation of Rangs Images Via Data, Fusion and Morphological Watersheds[J]. **Pattern Recognition**, 1996, 29(10): 1673-1687.
- [5] Silva Centeno, Jorge A, Haertel Victor. An adaptive Image Enhancement Algorithm[J]. **Pattern Recognition**, 1997, 30(7): 1183-1189.
- [6] 叶松, 汤伟平, 孙晓兵, 等. 一种采用IHS空间表征偏振遥感图像的方法[J]. 遥感信息, 2006(2): 17-19.  
YE Song, TANG Wei-ping, SUN Xiao-bing, et al. Characterization of the Polarized Remote Sensing Images Using IHS Color System[J]. **Remote Sensing Information**, 2006(2): 17-19.
- [7] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
PONG Yu-hua. **Wavelet Transform and Application of engineering** [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [8] 王勇, 韩九强, 张新曼. 基于边缘信息的图像融合算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(4): 66-68.  
WANG Yong, HAN Jiu-qiang, ZHANG Xin-man. A New Algorithm for Image Fusion Based on Edge Information[J]. **Microelectronic & Computer**, 2004, 21(4): 66-68.
- [9] 李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.  
LI Bing-cheng, LUO Jian-shu. Application and Analysis of wavelet[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.