

利用小波变换进行遥感 多光谱图像融合的算法及实现

林 卉¹, 杜培军², 肖 剑平³

(1. 徐州师范大学 国土信息与测绘工程系, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学
地理信息科学系, 江苏 徐州 221008; 3. 武汉市勘测设计研究院, 湖北 武汉 430022)

[摘要] 在分析了小波变换的分解与重建方法后, 提出了一种基于区域的图像增强算法。先提取出源图的边缘, 以图像的边缘为参考, 围绕边缘建立融合窗口, 然后结合区域内的图像信息, 应用基于窗口的融合规则进行融合处理。实验结果显示, 融合后的图像综合了3幅源图像的不同特征, 处理后的图像变得容易识别了。表明该方法保持了尽可能多的原始信息, 算法简单, 稳定性好, 适合于多光谱遥感图像识别、医学成像等领域。

[关键词] 图像融合; 小波变换; 分解与重建; 区域

[中图分类号] P23; TP75 [文献标识码] A [文章编号] 1672 6561(2006)04 0075 04

Algorithm and Realization of Remote Sensing multi spectral Image Fusion Using Wavelet Transform

LIN Hui¹, DU Pei jun², XIAO Jian ping³

(1. Department of Territory Resource Information and Surveying Engineering, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. Department of Environment and Spatial Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China; 3. Wuhan Design and Research Institute of Exploration and Surveying, Wuhan 430022, Hubei, China)

Abstract A new image fusion algorithms based on area is proposed after analyzing decomposition and reconstruction of wavelet transform method. At first, the edges of original images are extracted, which is regarded as reference, and then image fusion windows are established surrounding edges. Furthermore, images information within area is integrated with fusion processing conducted by applying fusion rule based on window. The experiment result shows that fused image synthesizes different character of three original images. At the same time, the result indicates this method has kept the primitive information as many as possible, the algorithm is simple, the stability is good, which is suitable for the field of the remote sensing pattern recognition and the medical formation of image etc.

Key words: image fusion; wavelet transform; decomposition and reconstruction; area

0 引言

图像融合是指将来自同一目标的不同传感器的信息通过一定的算法融合到一幅图上, 从而获得比在单幅图上更完整、更精确的信息。遥感图像融

合目前大致分4种类型: 多种分辨率的融合处理、多时相的融合处理、多种传感器类型的融合处理、多波段大容量的融合处理。笔者研究的对象属于最后一种, 即不同光谱获得的图像。

使用基于小波变换塔式结构的优点是, 小波变换具有紧凑性、正交性、很好的方向性, 这使得小波

[收稿日期] 2005 04 09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(49971055); 江苏省高校自然科学基金项目(04KJD420193); 徐州师范大学重点基金项目(04XLA12)

[作者简介] 林卉(1973-), 男, 湖南武岗人, 讲师, 从事摄影测量与遥感图像处理教学和研究。

变换可以很好的提取不同尺度上的显著特征, 相对于高斯-拉普拉斯金字塔技术而言, 不仅可以产生更好的融合结果, 而且进行反向变换时稳定性更好。另外, 小波变换的塔式结构还使得不管原图像的长度是否为 2 的幂次方, 最终变换后的图像与原图像尺寸相同, 使开发实用的并行算法系统成为可能。

小波变换的多分辨率分析是当前信号与图像处理领域的研究热点, 它可以将原始图像分解成一系列具有不同空间分辨率和频域特性的子图像, 充分反映原始图像的局部变化特征, 将原始图像分解到一系列频道中, 利用分解后的塔形结构, 将被融合图像各自携带的特征与细节在多个分解层、多个频带上对不同景象进行融合。Campbell 和 Robson 的实验表明, 人的视网膜在不同频道中进行处理, 小波分解的图像融合也是这样处理的, 因而可获得与人的视觉特性接近的融合效果^[1-3]。

1 图像小波分解与重建

小波变换是正交变换, 除了具有传统的 Fourier 变换的优点外, 还较好地解决了 Fourier 变换在时域和频域的矛盾, 能够在时域和频域上同时具有很好的局部化特性。经小波分解后, 可以将原始图像分解成低频图像和高频图像, 低频图像还可以逐级分解, 分解的各级子图像都包含着原始图像的空间结构信息。设二维图像 $C_0(m, n)$, 则对于给定的尺度函数和小波函数, 可用下式进行小波分解

$$\left\{\begin{aligned}C_k(i, j) &= \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) h(2m - i) h(2n - j) \quad (1) \\d_k^H(i, j) &= \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) h(2m - i) g(2n - j) \quad (2) \\d_k^V(i, j) &= \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) g(2m - i) h(2n - j) \quad (3) \\d_k^D(i, j) &= \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) g(2m - i) g(2n - j) \quad (4)\end{aligned}\right.$$

重建过程则为

$$\begin{aligned}C_{k-1}(m, n) &= \\&\sum_m \sum_n C_k(m, n) h(2m - i) h(2n - j) + \\&\sum_m \sum_n d_k^H(m, n) h(2m - i) g(2n - j) + \\&\sum_m \sum_n d_k^V(m, n) g(2m - i) h(2n - j) + \\&\sum_m \sum_n d_k^D(m, n) g(2m - i) g(2n - j) \quad (5)\end{aligned}$$

由式 (1) 得到的子图像反映了原图像的平滑特

性, 称为低频图像, 由式 (2) ~ 式 (4) 得到的子图像反映了原图像的亮度突变特性, 分别称为水平、垂直和斜向方向的高频图像, 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。高频子图像像素值在零值左右波动, 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, 所以, 也称边缘子图像。二维图像小波变换分解和重构的工作原理如图 1 图 2^[4-5]。

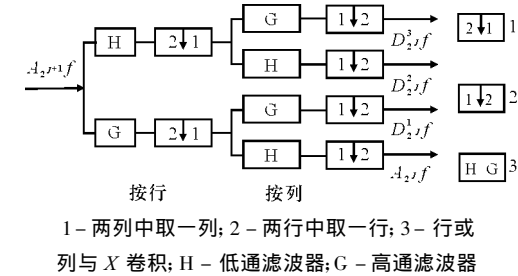


图 1 二维图像多分辨率一步分解
Fig. 1 Two dimensional Image Multi resolution One step Decomposition Diagram

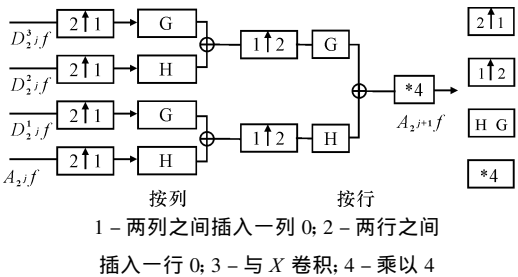


图 2 二维图像多分辨率一步重构
Fig. 2 Two dimensional Image Multi resolution One step Reconstruction Diagram

2 小波变换融合算法与融合规则

2.1 小波变换融合算法^[6-7]

通过小波分解, 除了低频子带都是一些正的变换值外, 其他 3 个高频子带都包含了一些在 0 附近的变换值, 在这些子带中, 较大的变换值对应着亮度急剧变化的点, 也就是图像中的显著特征, 如边缘、亮线及区域轮廓。既然小波变换具有很好的空域及频域局部性, 融合的效果就是对同样的目标, 融合前在图像 A 中若比图像 B 中显著, 融合后图像 A 中的目标就被保留, 图像 B 中的目标就被忽略。对不同的场景, 比如图像 A 中目标的外部轮廓比较明显, 图像 B 中目标的内部轮廓比较明显, 这种情况下, 图像 A、B 中目标的小波变换系数将在

不同的分辨率水平上占统治地位, 从而在最终的融合图像中, 图像 A 中的外部结构与图像 B 中的内部结构都被保留。因此, 通过融合可以实现在单幅图像上片面、不完整、不精确的信息得到更一致更精确的体现。最后对组合后的变换系数进行反向小波变换, 就可得到融合后的图像。

若对二维图像进行 N 层的小波分解, 最终将有 $(3N+1)$ 个不同频带, 其中, 包含 $3N$ 个高频带和 1 个低频带。融合基本步骤如下:

- (1) 对每一源图像分别进行小波分解, 建立图像的小波金字塔分解。
- (2) 对各分解层分别进行融合处理, 采用不同的融合算子对各分解层的不同频率分量进行融合处理, 最终得到融合后的小波金字塔。
- (3) 对融合后所得的小波金字塔进行小波逆变换, 得到重构图像。小波变换图像融合法如图 3。

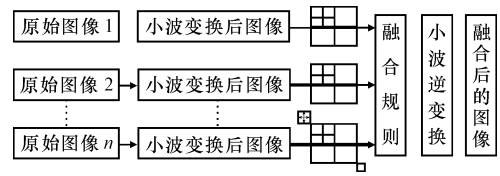


图 3 小波变换图像融合

Fig. 3 Wavelet Transform Image Fusion

2.2 融合规则^[7]

对图像而言, 小波变换是将图像分解成频域上各个频率段的子图, 以代表源图的各个特征分量。这对后续的融合处理极为重要, 使得融合处理可以根据不同的特征分量采用不同的融合方法以达到最佳融合效果。图像的融合策略(方法)是图像融合的核心, 方法与规则的优劣直接影响融合的速度与质量。基于小波变换的图像融合一般结构见图 3。

图 3 表明, 融合规则在融合处理中扮演了一个重要角色。当在建立融合图像的每个小波系数时, 必须确定哪幅源图的小波系数对融合有利, 这个信息将保留在融合决策图中。融合决策图的大小和原图大小一致, 融合决策图的每个值是源图的索引, 可能为相应的小波系数提供较多信息, 这样就可以确定每个小波系数。

为得到融合的小波系数可采用 2 种方法: 一种是逐个考虑源图相应位置的小波系数, 这种方法叫做基于像素的融合规则。该法对源图要求较高, 要求源图经过严格的对准处理; 另一种是不仅考虑相应位置的小波系数, 还要考虑与它相邻的小波系数, 比如以 3×3 或 5×5 窗口划分, 再确定融合的

相应位置的小波系数。这种方法考虑了图像像素与它相邻像素的高度相关性这一事实, 效果比前一种方法好。

基于像素的融合规则在融合处理时表现出的对边缘的高度敏感性, 使得图像在预处理时要求图像严格对准, 否则处理结果将不尽如人意, 这就加大了预处理的难度。基于窗口的融合规则, 因为考虑了与相邻像素间的相关性, 所以降低了对边缘的敏感性。如何选择窗口是这种融合规则的难点, 这要求所选窗口中的小波系数有较大的相关性, 否则就无法发挥出该方法的优越性。可以将图像看作是由不同灰度等级的区域构成, 而物体的边缘表现为灰度差。边缘是图像一个很重要的特征, 包含有价值的目标边界信息, 由边缘可以进行图像的定位、识别、滤波等操作。因此, 可以先提取出源图的边缘, 以图像边缘为参考, 围绕边缘建立融合的窗口(3×3), 然后结合区域内的图像信息, 应用基于窗口的融合规则进行融合处理, 这就是基于区域的融合方法。

在众多边缘检测方法中, 灰度阈值法所提取的边界较粗糙, 同时阈值的选取存在一定难度, 不符合图像融合中对边缘提取的要求, 而边缘算子使用就较为频繁。边缘算子检查每个像素的邻域, 同时对灰度变化率进行量化, 以决定该像素是否处于物体的边界上。在常用的 Roberts, Sobel, Canny, Laplacian 等算子中, Canny 算子对噪声最不敏感, 同时能检测弱边界, 性能最好。

由图 3 可知, 融合决策在融合处理中起着很重要的作用, 真正的融合处理在该处完成。图 4 表明了如何生成融合决策图。

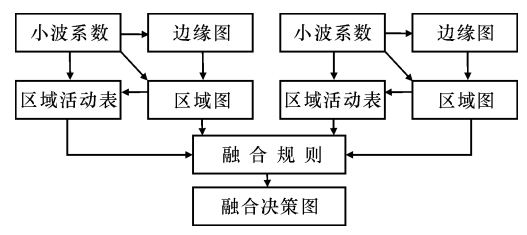


图 4 融合决策图

Fig. 4 Fusion Decision making Diagram

首先, 用 Canny 边缘算子提取源图的低频子矩阵中目标的边缘, 该结果提供了源图中的位置与边缘的增强信息。然后, 用该边缘信息产生区域段, 产生的结果是区域图, 该区域图不同的值表明了不同区域。最后, 将小波系数表的高频部分进行平

均,产生每个区域的活动等级,这可以提供区域更多的信息。这样,就生成了区域活动表。较大的活动值代表了区域含有较多的信息。

根据边缘、区域图和区域活动表,使用以下的融合规则来计算融合决策图:高活动等级优于低活动等级;边缘的像素点优于非边缘像素点;小区域优于大区域。在确定边缘点时先考虑非边界点,然后考虑它们的相关像素点,避免决策图中的孤立点。根据融合决策图,可以建立融合的小波系数表,然后通过小波逆变换得到融合的结果图。

3 仿真实验与结果分析

美国于 1982 年和 1984 年相继发射了陆地卫星 4 号和 5 号。星上安置的第二代传感器 TM 和第一代传感器 MSS 相比,空间分辨率由 79 m 提高到 30 m。探测波谱信道由 4 个增加到 7 个,并调整了可见光与红外信道的光谱范围,其辐射测量和几何保真度都有很大提高,尤其新增加 TM5, 7 波段,包含着丰富的地物信息。这 7 个波段包括 3 个可见光波段,1 个近红外波段,2 个中红外波段和 1 个热红外波段。以武汉市某地区的 TM 1~7 原始影像资料中任意 3 个波段影像进行分析,图像大小为 274 m×274 m,当波段数 $N>3$ 时,处理过程相同。经计算原始多光谱影像的光谱信息量统计如表 1^[8]。

表 1 多光谱影像的光谱信息量统计

Tab. 1 Multi spectral Image Spectrum Information Statistic							
项目	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
信息量	4.64	4.16	5.06	5.52	5.75	4.44	5.28
标准差	7.93	5.40	13.10	23.27	33.62	5.45	18.16
均值	85.91	36.40	21.76	38.35	45.26	130.76	27.54
最大值	108	54	50	75	115	145	61
最小值	74	26	1	0	0	120	3
亮度差	34	28	49	75	115	25	58

从表 1 可知, TM 5, TM 4, TM 7 波段的影像质量最好,同时,这 3 幅影像较其他影像要清晰得多,所以在实验中,对这 3 幅遥感图像采用小波变换来进行图像融合,融合后影像和原始图像如图 5。

对源图像进行分解时,分解阶次为 3 级,融合处理时,由源图像对应的小波变换中的最大滤波系数作为重建融合结果图像的小波系数。融合用的源图像是 TM 影像的 3 个波段影像,这些影像清晰

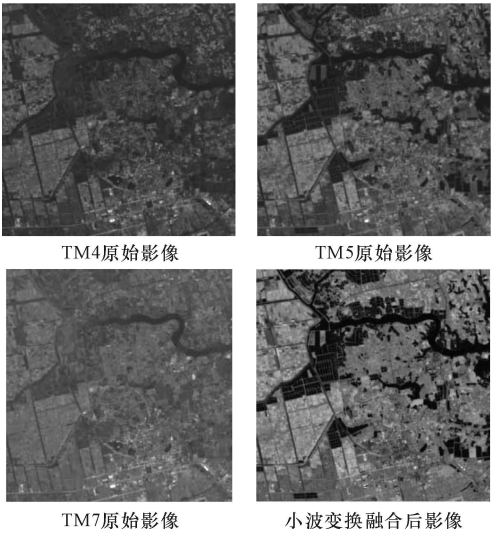


图 5 TM4, TM5, TM7 原始影像图
和小波变换融合后影像图

Fig. 5 TM4, TM5 TM7 Origin Image
and Wavelet Transform Fusion Image

度较差,且有多处出现重影。图 5 表明,融合后的图像清晰度得到了大幅度提高,克服了部分重影。从视觉上看,在原始第 TM4, 5, 7 波段影像图上色调灰暗,地类非常模糊,连水体、道路、田块、鱼池、居民地等地块都很难辨认。第 4 波段影像较暗,图像整体仍很模糊,并有几处“白斑”,水体、道路、管线无法识别;第 5 波段色调较明亮,地类较清晰,水体、居民地、道路依稀可辨,地块轮廓也较分明;第 7 波段色调也很暗,水体可基本辨出,但道路反映得很明显。融合后图像代表空间信息的明度都有所提高,色调非常明晰,各种地物的线条很清楚,地块的轮廓也很分明,水体、道路、鱼池、居民地、桥梁等地物清晰可辨,尤其大块水域中的网格鱼池反映的特别明晰。

融合结果表明,融合后的图像综合了 3 幅源图像的不同特征,处理后的图像变得容易识别了。笔者用到的小波变换方法是基于区域的图像增强算法,该方法保持了尽可能多的原始信息,算法简单,稳定性好,所以,此方法适合实时性不高的场合,如多光谱遥感图像识别、医学成像等领域。当然,其融合结果基本上还是基于视觉的观点来评价的,从结果可以看出,将来如何开发兼有稳定性与准确性的融合算法,从而满足融合系统的实时性要求,仍然是图像融合研究的一个热点,而且如何对融合后的图像提出有效地评价标准也是非常重要的。

(下转第 100 页)

al. Moisture Transport in a Solid Waste Column[J] . Journal of Environmental Engineering, 1984, 110(4): 780 - 796.

[34] McCreanor P T, Reinhart D R. Mathematical Modeling of Leachate Routing in a Leachate Recirculating Landfill[J] . Water Research, 2000, 34(4): 1285 - 1295.

[35] Haarstrick A, Hempel D C, Ostermann L. Modelling of the Biodegradation Organic Matter in Municipal Landfills[J] . Waste Management and Research, 2001, 19(4): 320 - 331.

[36] Katsumi T, Benson C H, Foose G J. Performance based Design of Landfill Liners[J] . Engineering Geology, 2001, 60(1/4): 139 - 148.

[37] Olaosun O, Baheri H R. Impact of Three Different Hydraulic Conductivity Expressions on Modeling Leachate Production in Landfills[J] . Journal of Environment System, 2001, 28(4): 337 - 345.

[38] Rendra S, El Fadel M, Manasseh C, et al. Degradation of Municipal Solid Waste in Simulated Aerobic and Anaerobic Bioreactor Landfills[J] . Journal of Solid Waste Technology and Management, 2003, 29(3): 145 - 153.

[39] 焦胜, 曾光明, 王敏, 等. 垃圾填埋场渗滤液有机物质量浓度的预测[J] . 中南大学学报, 2004, 35(2): 206 - 210.

[40] 钱学德, 施建勇, 郭志平, 等. 粘土衬垫系统污染物迁移规律研究[J] . 河海大学学报, 2004, 32(4): 415 - 420.

[41] Pusch R. Clay barriers for Isolation of Toxic Chemical Wastes, International Symposium[J] . Engineering Geology, 1985, 21(3/4): 199 - 382.

[42] 张澄博, 孔德坊, 许国琳, 等. 成都长安垃圾填埋场填土料对污染物质的吸附试验研究[J] . 矿物岩石, 1998, 18(1): 108 - 114.

[43] Prashanth J P, Sivapullaiah P V, Sridharan A. Pozzolanice Fly Ash as a Hydraulic Barrier in Landfills[J] . Engineering Geology, 2002, 60(1/4): 245 - 252.

[44] 郑红, 鲁安怀, 韩丽荣, 等. 有机膨润土对苯胺的吸附性能及其应用研究[J] . 环境化学, 2001, 20(5): 466 - 469.

[45] 余开彪, 胡斌, 张挺. 垃圾渗滤液在土体中扩散规律的模拟计算[J] . 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1944 - 1948.

[46] 陈家军, 王红旗, 王金生, 等. 填埋场释放气体运移数值模型及应用[J] . 环境科学学报, 2000, 20(3): 327 - 331.

[47] 曹国强, 梁冰, 包明宇. 温度作用下垃圾填埋气体运移规律的研究[J] . 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(1): 47 - 48.

[48] 刘长礼, 张云, 王秀艳. 垃圾卫生填埋处置的理论方法和工程技术[M] . 北京: 地质出版社, 1999.

[49] Schevon G R, Damas G. Using Double Liners in Landfill Design and Operation[J] . Waste Management and Research, 1986, 4(2): 161 - 176.

[50] 刘建国, 聂永丰, 白庆中. 卫生填埋场结构稳定性问题分析[J] . 重庆环境科学, 2001, 23(1): 62 - 66.

[51] 金宏, 张大群, 谭震江. 天津双口垃圾卫生填埋场工程关键技术问题的探讨[J] . 给水排水, 2002, 28(9): 19 - 52.

[52] 张季如. 垃圾填埋场设计中的若干问题研究——以襄樊洪山头填埋场为例[J] . 水文地质工程地质, 2003, 30(4): 42 - 45.

[53] 彭功勋, 施建勇. 卫生填埋场室内离心模拟试验研究[J] . 河海大学学报, 2003, 31(2): 172 - 174.

[54] Koutsourais M M, Sprague C J, Pucetas R C. Interfacial Friction Study of Cap and Liner Component for Landfill Design[J] . Geotextiles and Geomembranes, 1991, 10(5/6): 531 - 548.

[55] Stark T D, Poeppel A R. Landfill Liner Interface Strength from Torsional shear Tests[J] . Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 20(3): 597 - 617.

[56] 李建锋, 吴爱祥, 尹升华. 垃圾填埋场复杂松散多相介质相关力学机制研究[J] . 湖南理工学院学报, 2004, 17(3): 78 - 81.

(上接第 78 页)

[参 考 文 献]

[1] Bruno Garguet duport, Jachy Girek, Jean Marc Chassery, et al. The Use of Multi resolution Analysis and Wavelets Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image data[J] . Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(9): 1057 - 1066.

[2] David A Yocky. Image Merging and Data Fusion by Means of the Discrete Two dimensional Wavelet Transform[J] . J Opt Soc Am A, 1995, 12(9): 1834 - 1841.

[3] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform[J] . Graphical Models and Image Processing, 1995, 57(3): 235 - 245.

[4] 王智均, 李德仁. 利用小波变换对影像进行融合的研究[J] . 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2): 137 - 141.

[5] 邱志成. 遥感图像数据复合方法的研究[J] . 测绘学报, 1990, 19(4): 290 - 297.

[6] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M] . 北京: 科学出版社, 1999.

[7] 邵巨良. 小波理论、影像分析与目标识别[M] . 北京: 测绘出版社, 1998.

[8] 李克鲁, 王霞. 小波变换的信息融合方法及结果评价[J] . 国土资源遥感, 1999(4): 46 - 52.