

遥感图像融合的研究现状、困境及发展趋势探讨

孙洪泉^①, 窦闻^②, 易文斌^①

(^① 北京师范大学资源学院, 北京 100875; ^② 东南大学交通学院, 江苏 南京, 210096)

摘要: 从像素级、特征级和决策级遥感图像融合的角度, 概述了遥感图像融合的研究现状处于瓶颈发展时期。提出遥感图像融合研究的三方面主要困境: 缺乏统一的融合理论框架作指导; 缺乏面向应用的融合算法设计; 融合数据源的选择没有针对性, 缺乏针对不同传感器数据和不同分辨率的融合研究。指出目前遥感图像融合研究在特征级和决策级融合, 多角度融合, 数据预处理精度, 以及不确定性分析方面的研究不足。最后, 提出了未来遥感图像融合的发展趋势和研究热点。

关键词: 遥感; 图像融合; 融合理论框架; 尺度选择; 多角度; 面向应用;

doi: 10. 3969/j. issn. 1000- 3177. 2011. 01. 021

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000- 3177(2011) 113- 0104- 05

A Discussion on the Status, Dilemmas and Tendencies of Remotely Sensed Image Fusion Research

SUN Hong quan^①, DOU Wen^②, YI Wen bin^①

(^① College of Resource Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

^② Transportation College, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: The remotely sensed image fusion study was reviewed based on the pixel level, feature level, and decision level fusion. It was pointed out that the current status of remotely sensed image fusion is in the bottleneck period of the development. Three major aspects of dilemmas of remotely sensed image fusion were pointed out, which are the lack of general fusion theory as the guidance, the lack of application oriented fusion algorithms designs, and the absence of fusion methods for the specific of data sources, especially the fusion algorithms for data of different sensors and different resolutions. Then the inadequacies of remotely sensed image fusion at feature level and decision level, multi angle fusion, accuracy of pre processing, as well as the analysis of uncertainty were pointed out. Finally the tendencies and prospects of remotely sensed image fusion were given.

Key words: remote sensing; image fusion; fusion theory frame; scale Selection; multi angle; application oriented

1 引言

多源图像融合属于多传感器信息融合的范畴, 是指将不同传感器获得的同一景物的图像或同一传感器在不同时刻获得的同一景物的图像, 经过相应处理后, 再运用某种融合技术得到一幅合成图像的过程。多幅图像融合可克服单一传感器图像在几何、光谱和空间分辨率等方面存在的局限性和差异性, 提高图像的质量, 从而有利于对物理现象和事件进行定位、识

别和解释^[1]。与单源遥感图像相比, 多源遥感图像所提供的信息具有冗余性、互补性和合作性^[2]。因此, 将多源遥感图像各自的优势结合应用, 获得对环境正确的解译是极为重要的。多源遥感图像融合则是富集这些多种传感器遥感信息的最有效途径之一, 是现代多源数据处理和分析中非常重要的一步。

本文基于遥感图像融合的研究现状, 分析了图像融合研究的困境和不足, 最后提出了未来的发展趋势和热点, 以期达到抛砖引玉的作用。

收稿日期: 2009- 12- 24

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 40671122); 北京市自然科学基金(编号: 4072016); 霍英东教育基金(编号: 111017)。

作者简介: 孙洪泉(1983~), 男, 辽宁丹东, 博士研究生。主要从事遥感图像处理的研究。

E mail: shq@ires. cn

2 遥感图像融合研究现状

随着信息科学技术的发展,在 20 世纪七八十年代诞生了一个称为“数据融合”的全新概念^[3]。这一概念不断扩展,处理的对象由一般的数据发展到数字图像。1979 年, Daliy 等人^[4]首先将雷达图像和 Landsat-MSS 图像的复合图像应用于地质解译,被认为是最早的图像融合。20 世纪 80 年代,图像融合技术逐渐应用到遥感图像的分析 and 处理中。90 年代以后,图像融合技术成为研究的热点,并成为很多遥感图像应用的一个重要预处理环节。

目前,遥感图像融合已经发展为像素级、特征级和决策级 3 个层次^[5-6],如表 1。需要指出的是,融合层次并没有划分融合算法严格的界限,因为本质上各个融合层次都是信息融合的范畴。像素级图像

融合技术已被广泛研究和应用,并取得了一定的成果。特征级融合是一种中等层次的信息融合,利用从各个传感器图像的原始信息中提取的特征信息,进行综合分析及融合处理,不仅增加从图像中提取特征信息的可能性,还可能获取一些有用的复合特征,尤其是边缘、角、纹理、相似亮度区域、相似景深区等。在特征级融合中,对图像配准的要求不如像素级图像融合对配准要求那么严格。决策级图像融合是一种更高层次的信息融合,其结果将为各种控制或决策提供依据。在进行融合处理前,先对图像进行预处理、特征提取、识别或判决,建立对同一目标的初步判决和结论,然后对各个图像的决策进行相关处理,最后进行决策级的融合^[3]。从特点来看,不同层次的融合各有优缺点,难以在信息量和算法效率方面都同时满足需求。

表 1 遥感图像融合三个层次的对比

融合层次	融合算法	特点
像素级	Brovey ^[7] , IHS ^[8-9] , 分量替换法 ^[10-11] (包括 GS 方法 ^[12] 、PCA 方法 ^[8-13] 等), 高通滤波方法 ^[10,13] 、小波变换法 ^[14-17] 、模糊数学 ^[18-19] 、逻辑滤波、数学形态学 ^[20] 等。	信息量最大,信息损失最小,预处理最小,容错性和抗干扰能力最差,融合方法最难。
特征级	模糊方法 ^[19] 、神经网络技术 ^[21] 、聚类方法 ^[22] 、Kalman 滤波 ^[21] 等。	信息量,信息损失,预处理,容错性和抗干扰能力,融合方法难易程度都处于中等。
决策级	贝叶斯估计法 ^[23] 、Dempster-Shafer 法、神经网络法 ^[24] 、模糊聚类法 ^[18] 等。	信息量最小,信息损失最大,预处理最大,容错性和抗干扰能力最强,融合方法最易。

从已有的图像融合研究成果来看,由于理论的成熟度和操作的可行性,融合研究主要集中在像素级,而对特征级,尤其是决策级的研究还不够成熟,仍在不断探索阶段。近来,从理论基础和研究工具来看,非常新的数学理论和计算智能理论等的应用,在数学理论深度上不断提高,如小波和小波包^[25-26]、脊波^[27-28]、模糊数学^[29]、数学形态学^[20]、支持向量机^[30] 等的使用,更加重视图像融合的数学意义,向更专业的信号处理方向发展。从研究手段来看,多源遥感图像融合的研究思路在逐步拓宽,对已有方法进行组合、集成,如 IHS 方法和小波方法的结合^[31]、PCA 和小波方法的结合^[32]、小波方法和金字塔方法结合^[33-34],等等。

3 遥感图像融合研究困境和不足

以上按照融合的层次对遥感图像融合研究现状所作的分析要概述其所有的研究内容未必全面,但是可以基本上概括图像融合的研究成果。并且,从另一个角度也反映出图像融合的主要研究内容和格局基本停留在融合方法的改进和创新上。

近来,遥感图像融合被普遍认为是一个瓶颈发

展时期。首先,理论上存在难以逾越物理意义的鸿沟,图像融合在视觉增强的同时损失了图像本身的物理意义,比如地物反射率等定量信息。其次,技术上也难有大的跨越性发展,某种程度上说是计算机视觉等领域的硕果引领了早期的图像融合的发展。因此,近年来的图像融合技术主要集中并停滞在新数学工具的使用和原有算法的组合上。但本质上,这些方法基本上属于在某种数学工具基础上面向问题的信号处理技术,或者针对特定应用问题的解决方案,缺乏对融合基本理论的研究,没有从根本上解决融合问题的“病态性”,这导致在研制和应用的过程中,主观性和随意性很强,造成了图像融合研究领域的混乱局面^[35]。本节主要分析了遥感图像融合研究的困境和不足。

3.1 遥感图像融合研究的困境

图像融合作为一个系统工程,仅仅从融合算法的改进上开展研究并不能从根本上很好的解决融合问题。作者认为目前遥感图像融合技术存在 3 个方面的困境:

①没有统一的理论框架作指导,这一问题逐渐

受到某些学者的关注;

②缺乏面向应用的融合算法。

③数据源的选择没有针对性,目前还鲜有涉及。

3.1.1 缺乏统一的理论框架作指导

遥感图像融合统一理论框架是解决目前遥感图像融合方法格局混乱的最有效,也最急迫的手段,已经受到许多学者的关注,并且已经开始有零星的文献报道^[36-39]。但这些理论方法没有一种能够得到公认,仍未能上升到物理解释和数学推导的理论高度,尽管如此,这些学者的工作已经为图像融合统一理论框架研究提供了思路。Wang^[40]从遥感图像成像过程出发,对建立通用图像融合模型作了一定的探索,这是第一次公开提出通用模型研究的文献,然而其模型建立过程中仍未能很好的重视主观性与随意性的问题。窦闻^[41]从遥感机理、物理模型和数学推理出发,得到像素级图像融合的通用数学模型,但是缺乏对特征级和决策级的支持。因此,目前亟需以实际应用结合物理解释和数学推导进行模型实现的基本思想,建立统一的对地观测信息融合的基本理论和广义融合模型,为融合方法的研制和应用提供理论指导。

3.1.2 缺乏面向应用的融合算法

尽管目前的融合算法很多,但是缺乏从特定应用角度的融合算法设计。大多数算法没有从物理机理和应用目的进行分析,而是依据图像质量的评价体系进行设计和比较,这样得到的结果不具有针对性,虽然图像整体效果增强,但是不能满足增强感兴趣的的目的。遥感图像融合的研究存在理论方法和应用研究脱节的现象,理论方法研究没有考虑应用的回馈效应,应用研究也没有考虑理论方法的物理解释,即使是结合应用的图像融合研究也存在很大的局限性^[42-43],面向应用的融合算法的设计缺乏依据,大多情况仅仅把融合作为提高图像解译能力的手段,缺乏信息量的保真度。依然固守高分辨率全色图像和低分辨率的多光谱图像的原则,而不是从应用目的出发考虑原始图像特有信息的保持。这些问题是融合过程丢失了原始遥感图像本身的物理属性的病态问题所致,使得融合只能停留在改善视觉效果这一基本问题上。另外,遥感过程的复杂性和不确定性也是导致融合问题难以针对具体应用来比较和设计的主要原因之一。

3.1.3 数据源的选择没有针对性

遥感图像融合的数据选择问题可以分为两个方面:首先是针对具体的传感器类型的融合研究不足;其次是对融合数据源的尺度选择问题还没有任何经验或理论模型。

①针对不同的传感器数据的融合研究不足

虽然现有融合问题的研究中很多是针对某具体的数据类型进行开展的,但是,对这些数据本身的特性考虑不足,很多依然是围绕融合方法的改进进行的探讨,并不是真正意义上基于数据特性的融合研究。随着各种类型传感器的投入使用,尤其是SAR、近红外、高光谱等传感器的应用,图像融合已经不局限于视觉效果的融合,而是更注重融合图像对地物光谱信息的保留,以满足更高空间分辨率的分类或定量遥感需求。

②缺乏融合数据源的尺度选择理论

图像融合数据源的尺度选择问题是研究者想面对但无法面对的问题,因为传感器物理分辨率的固定将数据尺度选择变成了不可选择。这也从一定程度上限制了遥感图像融合从机理上进行研究的动力。图像融合数据源的尺度选择是从另一个角度研究如何更好地保持原始图像细节信息和光谱信息,达到“更高效”的集成原始图像特性的问题。这对面向具体应用的数据融合问题的研究,乃至传感器设计都有十分重要的推动作用。但是,尺度选择研究的困难依然在于数据的限制。研究者也无法在计算机上模拟出各种尺度的传感器真实复杂的成像条件,这是对融合尺度选择研究的一大挑战。

3.2 遥感图像融合研究的不足

遥感图像融合研究除了以上的三点困境之外,还存在如下几方面的不足:

①特征级和决策级融合研究不足

现有的遥感图像融合研究主要集中在像素级,对特征级和决策级融合研究还远远不够。目前对于特征级和决策级融合,还没有一个清晰的理论界定,而仅仅是概念性的描述解释,没有和图像处理的其他领域结合起来,而停留在单纯的图像融合层面上。面向对象的图像处理技术正在逐渐被引入到这方面的研究中。

②多角度融合研究不足

多角度的融合能够获得更丰富的信息,更好地消除图像中的阴影等噪声。目前的遥感图像融合主要涉及到多源和多尺度融合,对于多传感器数据的融合也基本是保证同一视角,而真正意义上的多角度融合研究还处于空白阶段。

③数据预处理过程的精度有待提高

当数据从测量空间转入融合空间时,必须进行严格的数据预处理。然而目前对融合前的数据进行的空配准、去噪、几何辐射校正、大气校正、压缩和滤波等处理,其工作精度仍有待提高,这要通过引入新的理论、算法来实现。

④对多源遥感图像不确定性的重视不够

不确定性是遥感数据固有的特性,多源遥感信息融合在优势互补的同时也意味着多数据源中不确定性的积累和叠加。研究融合中的不确定性需要以融合的物理机理、理论基础和数学模型为基础。

4 遥感图像融合研究发展趋势

研究者已经意识到遥感图像融合问题是一个病态问题,也是一个系统工程的问题,不能依赖单一角度或单一理论算法解决不同数据或不同应用环境的融合。目前的理论基础、应用成果和存在问题为遥感图像融合理论的发展,及其面向各个领域的应用研究提供了分析依据。

从遥感图像融合的三个层次来说,像素级融合能够挖掘多源遥感信息的关联和隐含信息,充分应用原始信息的互补优势,提供其他两个融合层次不具有的细节信息,这些是特征级和决策级融合所不具备的特点,因此在未来一定时间内,像素级融合始终是研究热点之一。但是,随着遥感数据源和应用的发展,特征级融合、决策级融合的研究将越来越受到研究人员的重视。

虽然说遥感图像融合研究目前处于瓶颈发展

期,但是随着硬件条件的提高和数学工具的发展,从研究目标来看,图像融合研究已经脱离了主要以空间增强为目标阶段,融合结果将逐渐以光谱信息提取和空间细节信息保持为目标^[44],因此具有明确物理意义的融合理论正成为研究的热点。同时,融合方法的研究不再停留在算法的组合和复加上,而是将侧重理论体系和统一框架的研究上。相应的,图像融合数据源尺度选择也会得到一定的关注。

面向应用的遥感图像融合研究会随着遥感应应用领域拓展而深入进行,同时将加深遥感图像融合方法选择依据的研究。目前的面向分类、变化检测、目标识别的融合研究还不足,未来将进一步针对具体的数据源,结合遥感新技术进行更广范围的融合研究,突出应用目的性和特殊性。因而,能够提供更丰富信息的多角度融合研究也将是未来融合的研究热点之一。另外,随着遥感数据源的不断增加,单一融合方法难以适用于不同的数据源和不同的应用需求,集成化的遥感图像融合系统在遥感应应用中的重要性日益增加。

作者希望以上的工作能为遥感图像融合理论和方法的研究提供借鉴作用,推动图像处理技术和遥感技术的发展。

参考文献

- [1] 郁文贤,雍少为,郭桂蓉.多传感器信息融合技术述评[J].国防科技大学学报,1994,16(3):1-11.
- [2] 韩玲,吴汉宁,杜子涛.多源遥感影像数据融合方法在地学中的应用[J].地球科学与环境学报,2005,27(3):78-81.
- [3] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [4] Daily M I, Farr T, Elachi C. Geologic interpretation from composited radar and Landsat imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1979, 45(8): 1109- 1116.
- [5] Pohl C, Van Genderen J L. M multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5): 823- 854.
- [6] Wald L. Some terms of reference in data fusion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1190- 1193.
- [7] Vrabel J. Multispectral imagery band sharpening study[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(9): 1075- 1083.
- [8] Chavez Jr P S, Sides S C, Anderson J A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991, 57(3): 295- 303.
- [9] Haydn R, Dalke G W, Henkel J. Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement[C]. 1982.
- [10] Shettigara V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1992, 62(9): 561- 567.
- [11] Campbell N A. Towards more quantitative extraction of information from remotely sensed data[C]. 1993.
- [12] Li C, Liu L, Wang J. Comparison of two methods of the fusion of remote sensing images with fidelity of spectral information[C]. 2004.
- [13] Chavez Jr P S, Kwarteng A Y. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1989, 55(3): 339- 348.
- [14] Ranchin T, Wald L. Merging SPOT-P and KVR- 1000 for updating urban maps[C]. 1996.
- [15] Alparone L, Facheris L, Baronti S. Fusion of multispectral and SAR images by intensity modulation[C]. 2004.

- [16] Ranchin T, Wald L. The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(3): 615– 619.
- [17] Deng L, Chen Y H, Li J. Controllable remote sensing image fusion method based on wavelet transform[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(1) : 34– 38.
- [18] Germain M V M B J. Fuzzy statistical classification method for multiband image fusion[C]. 2002.
- [19] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi resolution, object oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS ready information[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 58(3– 4) : 239– 258.
- [20] Matsopoulos G K, Marshall S, Brunt J N H. Multiresolution morphological fusion of MR and CT images of the human brain[J]. *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings*, 1994, 141(3) : 137– 142.
- [21] Bonnefon R, Dh  r  t  p, Desachy J. Geographic information system updating using remote sensing images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(9) : 1073– 1083.
- [22] Sveinsson J R, Ulfarsson M O, Benediktsson J A. Cluster based feature extraction and data fusion in the wavelet domain [C]. 2001.
- [23] Challa S, Koks D. Bayesian and Dempster Shafer fusion[J]. *Sadhana*, 2004, 29(2) : 145– 176.
- [24] Atkinson P M, Tatnall A R L. Introduction neural networks in remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(4) : 699– 709.
- [25] Mallat S G. Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7) : 674– 693.
- [26] Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*[M]. SIAM, 1993.
- [27] Myungjin C, Rae Young K, Myeong Ryong N. Fusion of multispectral and panchromatic Satellite images using the curvelet transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2) : 136– 140.
- [28] Choi M, Kim R Y, Nam M R. Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the curvelet transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2) : 136– 140.
- [29] Xiao G, Jing Z L, Li J X. Optimal image fusion method based on fuzzy integral[J]. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/ Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(8) : 1312– 1316.
- [30] Shutao L, Kwok J T Y, T I W H. Fusing images with different focuses using support vector machines[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, 15(6) : 1555– 1561.
- [31] Li Z H, Jing Z L, Yang X H. Color transfer based remote sensing image fusion using non separable wavelet frame transform[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005, 26(13) : 2006– 2014.
- [32] González Audicana M, Saleta J L, Catalan O G. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(6) : 1291– 1299.
- [33] Li Z, Jing Z, Sun S. Remote sensing image fusion based on steerable pyramid frame transform[J]. *Guangxue Xuebao/ Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5) : 598– 602.
- [34] Petrovic V S, Xydeas C S. Gradient based multiresolution image fusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(2) : 228– 237.
- [35] 奚闻, 陈云浩, 何辉明. 光学遥感影像像素级融合的理论框架[J]. *测绘学报*, 2009, 38(2) : 131– 137.
- [36] Ranchin T, Wald L. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000, 66(1) : 49– 61.
- [37] Tu T, Su S C, Shyu H C, et al. A new look at IHS like image fusion methods[J]. *Information Fusion*, 2001, 2(3) : 177– 186.
- [38] Baronti S, Aiazzi B, Alparone L. Pair sharpening of very high resolution multispectral images via generalised Laplacian pyramid fusion[J]. *Bulletin Societe Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection*, 2002(169) : 17– 25.
- [39] Otazu X, González Audicanam, Fors O, et al. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet based methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10) : 2376– 2385.
- [40] Wang Z, Ziou D, Armenakis C, et al. A comparative analysis of image fusion methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(6) : 1391– 1402.
- [41] Dou W, Chen Y, Li X, et al. A general framework for component substitution image fusion: An implementation using the fast image fusion method[J]. *Computers and Geosciences*, 2007, 33(2) : 219– 228.
- [42] Albertz J, Tauch R. Mapping from space cartographic applications of satellite image data. [J]. *Geo Journal*, 1994, 32(1) : 29– 37.
- [43] 贾永红. 多源遥感影像数据融合技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2005.
- [44] Alparone L, Aiazzi B, Baronti S, et al. Spectral information extraction from very high resolution images through multiresolution fusion[M]. *Image and Signal Processing for Remote Sensing X, Bruzzone L*, 2004: 5573, 1– 8.