

基于 Atrous-HIS 变换的多光谱遥感 影像多核并行融合方法

范明虎¹, 薛昊润², 臧文乾³, 张旭升¹, 谢毅¹

(1.河南大学 河南省大数据分析与应用重点实验室,河南 开封 475004;2.北京邮电大学 国际学院,北京 100876;
3.中国科学院 空天信息创新研究院,北京 100101)

摘要:为适应遥感影像高效融合的应用需求,提出了一种基于 Atrous-HIS 变换的多光谱与全色影像并行融合方法.首先设计了一种结合了 Atrous 和 HIS 变换的遥感影像串行融合算法,分析了它的详细处理步骤.随后在该算法中引入 OpenMP 并行技术,并且制定了并行策略,优化了处理流程,最终实现了一种高效的并行影像融合算法.实验结果表明,该方法可以实现多光谱与全色影像的快速融合,具有良好的加速比,可扩展性好,并行效率高.

关键词:遥感图像融合;Atrous-HIS 变换;并行计算;OpenMP

中图分类号:TP79

文献标志码:A

遥感技术的迅速发展为我们提供了越来越多的数据源,充分利用它们,则可以互补所长,提高遥感应用的质量^[1].在基于多源遥感影像的应用中,多光谱与全色影像融合是一种常见应用,它可以充分利用两种影像的优点,生成高空间分辨率的多光谱影像,从而弥补单一图像上信息量的不足,提高遥感影像解译精度和可靠性^[2],广泛应用于遥感影像的目视解译^[3]和特征增强^[4].影像融合由低到高分分为 3 个层次:数据级融合、特征级融合、决策级融合.相对于后两个层次,像素级的融合可以保留更多的原始信息,更高的准确度,有利于图像后期应用于地表覆盖分类和目标识别.目前,常用的像素级遥感影像融合方法有:加权平均法^[5]、HIS (Hue-Intensity-Saturation)变换法^[6]、Brovey 变换法^[7]、主成分分析 PCA (Principal-Component-Analysis) 法^[8]等等.

本文的研究采用了一种结合了 Atrous 和 HIS 变换的改进算法,可以很好地保留多光谱影像的光谱信息和高分辨率影像的空间细节表现能力.在遥感影像融合应用中,早期的 Atrous 变换采用的是无抽取离散小波变换^[9],可以有效减少小波变换中的信息丢失,并改善 HIS 变换的光谱扭曲程度.进一步的改进算法有在边缘检测过程中采用 Sobel 算子^[10],以有效增强融合影像高频部分的边缘特征;使用高提升滤波进一步减少小波分解中的细节丢失和融合结果的模糊问题^[11].本文算法的改进则是使用非抽样二进小波变换替换了无抽取离散小波变换.二进小波变换只是对尺度参数进行了离散,在时间域上的平移参数仍保持连续取值,所以其具有离散小波变换数值计算简化和理论分析简便的特点外,还具有连续小波的时移共变性,这是其较离散小波的独特优势.因此,这种方法进一步减少了小波分解中的信息丢失,从而提高了融合影像中的信息量.

传统的图像融合采用串行算法,处理速度受限于单 CPU 的指令执行速度,无法充分利用目前的主流多核心 CPU,严重影响大规模遥感影像的处理速度,难以适应对响应时间要求较高的应用.近些年来,并行计算技术的快速发展为提升遥感影像处理速度提供强有力的支持.例如,使用 GPU 对图像融合处理进行加速^[12],取得了不错的效果.OpenMP 是实现多核心并行的常用方法之一,简单易用,可在不大幅修改算法的基

收稿日期:2021-05-15;修回日期:2021-06-24.

基金项目:国家自然科学基金(62176087);民用航天技术预先研究项目(Y7K00100KJ);河南省科技厅科技攻关项目(202102210368).

作者简介:范明虎(1974—),男,湖北荆门人,河南大学讲师,博士,研究方向为遥感图像并行处理.

通信作者:谢毅,E-mail:xiexi@henu.edu.cn;张旭升,E-mail:15993617315@163.com.

础之上,充分利用多核心 CPU 对计算进行加速.本文的研究针对遥感影像融处理的速度问题,提出了一种基于 Atrous-HIS 变换的多光谱与全色影像融合的并行计算方法.通过在算法中融入 OpenMP 并行计算技术,并进行适当优化,可以实现多光谱和全色影像的快速融合.

1 基于 Atrous-HIS 变换的融合方法

本方法是一种像素级融合方法,同时,本文的讨论只针对多光谱影像(MS)和全色影像(PAN)的融合.在融合处理之前,先要对这两种影像进行一定的预处理,如几何校正、配准等.因为这些处理不是本文研究的中心问题,这里不做介绍.随后,将多光谱影像(MS)和全色影像(PAN)分别进行处理,利用非抽样二进小波变换提取各像素的高低频信息.最后,选用适当的融合规则,将两幅影像对应像素的提取信息通过一定的策略进行融合计算,得出新的像素值.由这些新像素值组成图像就是融合图像.

基于非抽样二进小波变换提取信息的过程是:首先将原始影像分解成近似图像和小波系数(平面)图像,然后从小波面提取细节信息,可以通过计算两个连续小波面的差值得到,最后将细节信息添加到多光谱影像的近似分量中,从而获得融合图像.

基于 Atrous-HIS 变换的融合算法的大致过程如下:首先对高分辨率图像和多光谱图像进行小波分解,提取分解后的多光谱影像的低频分量和全色影像高频分量,在最佳的融合条件下进行融合,最后再进行小波变换重构出融合图像(图 1).本算法的具体步骤如下:

步骤 1 图像预处理:对 MSS 影像和 PAN 影像进行配准,并将 MSS 影像进行重采样,使之与 PAN 影像具有相同的空间分辨率.

步骤 2 通过 IHS(Intensity Hue Saturation)变换将 MSS 影像从 RGB 空间变换到 IHS 空间.选取 MSS 影像 3 个波段 B_1, B_2, B_3 分别分配给 R, G 和 B 通道,

$$(B_1, B_2, B_3) \xrightarrow{\text{RGB to IHS}} (I, H, S). \tag{1}$$

步骤 3 将 PAN 影像与 MSS 影像的强度分量进行直方图匹配.目的是为了消除两幅图像存在的光谱差异.当两幅图像的拍摄条件不同时,会存在光谱差异.

步骤 4 分别对 PAN 影像和 MSS 影像的亮度分量进行小波变换,得到两个影像相对应的分辨率较低的影像和分辨率较高的细节影像.

步骤 5 舍弃来自 MSS 影像分量的细节部分(即高频分量)和来自 PAN 影像的近似部分(即低频分量),将 PAN 影像的高频分量添加到 MSS 影像的低频分量中.

步骤 6 使用小波逆变换得到影像融合后的亮度分量,该亮度分量影像和 IHS 变换的亮度分量影像有着大致相似的灰度值,并且拥有和原 PAN 影像相同的空间细节.

步骤 7 使用新的亮度分量图像、色度分量图像和饱和度分量图像进行 IHS 逆变换,从而转换回 RGB 空间,即得到最终的融合图像,

$$(I', H, S) \xrightarrow{\text{IHS to RGB}} (F_1, F_2, F_3). \tag{2}$$

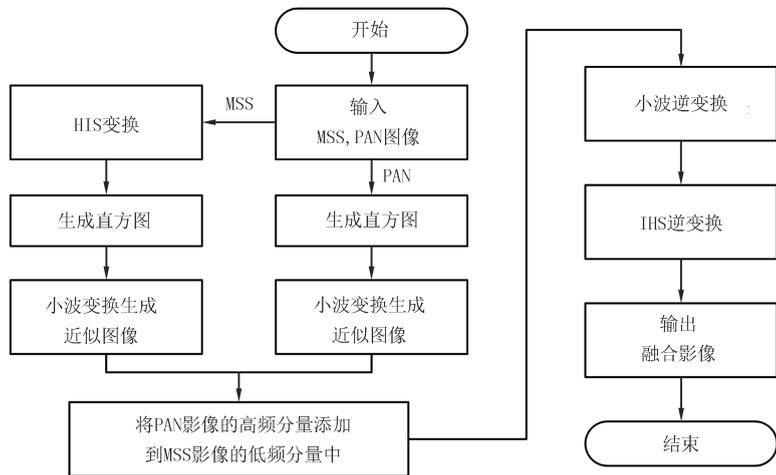


图1 基于Atrous-HIS变换的影像融合步骤
Fig.1 Image fusion steps based on Atrous-HIS transform

2 基于 OpenMP 的 Atrous-HIS 融合方法

并行计算是提高数据处理效率的常用方法,目前已广泛应用于遥感图像处理之中.在众多的并行计算实现技术中,OpenMP 是最常用的一种,它可以很好地利用主流的多核心 CPU 实现并行加速.只要优化得当,基于 OpenMP 的算法可以大幅提高数据处理效率.

在上述融合算法处理步骤的基础之上,设计和实现了一种基于 OpenMP 的 Atrous-HIS 融合方法.首先,将算法中可以并行执行的步骤提取出来,然后将 OpenMP 技术融入这些步骤之中,最后针对并行计算的特点调整数据结构和优化处理流程,从而得到一种可以融合多光谱和全色影像的并行处理算法.具体的算法步骤如图 2 所示.

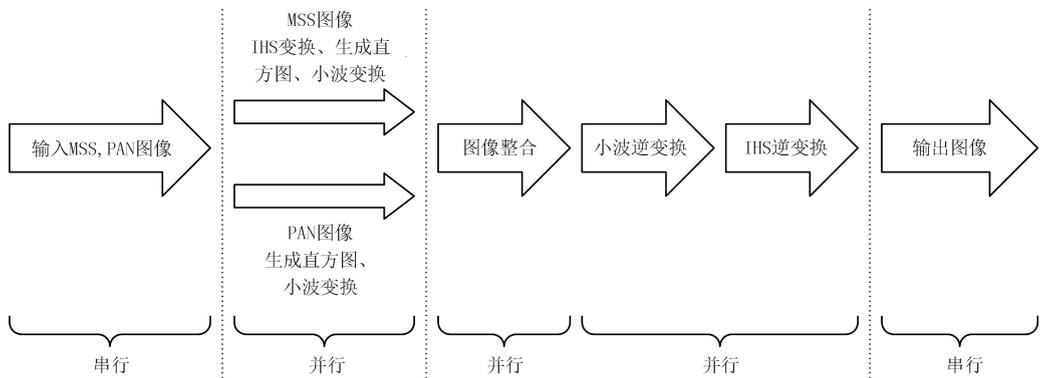


图2 并行算法实现步骤

Fig.2 Parallel algorithm implementation steps

步骤 1 输入图像之后,在图像处理开始之前,算法会根据按计算单位的内存容量来进行图像数据的瓦片划分.例如每计算单位分配 1 G 内存,则瓦片划分中要保证一次计算中用到的所有瓦片数据量之和在 1 G 之内.但是,由于所有的图像瓦片分割计算量小,主要操作是磁盘读写和内存数据块的复制,并行与串行的速度差异很小,所以不必进行并行处理.

步骤 2 HIS 变换、生成直方图和小波变换以瓦片为单位.由于各瓦片的处理是相互独立的,所以可以使用 OpenMP 实现不同瓦片的并行处理.

步骤 3 图像融合以成组瓦片为单位,即进行融合会用到多个瓦片,并且各个瓦片之间在空间位置上存在相互对应关系.但是,各组瓦片之间的处理仍然是相互独立的,所以这一步可以使用 OpenMP 实现不同瓦片组的并行执行.

步骤 4 小波逆变换和 HIS 变换又是以瓦片为单位独立处理,所以可以使用 OpenMP 实现不同瓦片的并行处理.

步骤 5 输出图像与输入图像类似,主要操作是数据的读写,并行处理不会明显提升算法的运行速度,所以不使用并行处理.

3 实验结果与分析

为了验证上述算法的有效性,进行了一系列的实验,所用的实验环境和遥感数据如下.

实验的硬件环境:CPU 型号为 Intel(R)Core(TM)i7-1165G7 CPU @ 4.70 GHz,为 4 核心 8 线程处理器,内存为 16 G.实验的软件环境:操作系统为 Window 10,算法实现使用 Microsoft Visual Studio 2017,该开发环境内置了对 OpenMP 的支持.使用的遥感影像为北京地区的 GF1 影像,预处理完成后,多光谱 MSS 影像大小为 3.74 G,全色 PAN 影像大小为 0.94 G,融合前后的影像如图 3 所示.

图 3 为融合前后的影像同一区域截图,3 幅图分辨率相同.该区域包含了一些常见的典型地物:地面、水、植被、建筑和街道.图 3(a)为多光谱影像,具有多个波段,原图分辨率较低,重采样后块状效应明显,导致地物

边缘模糊;图 3(b)为全色影像,只有一个波段,原图空间分辨率高,地物轮廓清楚,但是单色导致地物区分度不高;图 3(c)是融合后的影像,相对于图 3(a),块状效应大幅减少,地物的轮廓清晰度显著提升,较好地完成了融合的预期目标.



图3 实验所用的影像和融合结果
Fig.3 Experimental images and fusion results

并行计算实验测试了在不同线程数的情况下,使用 OpenMP 能够达到的加速比.OpenMP 技术支持指定并行计算使用的线程数.为了减少误差,每次执行的时间采用多次运行取平均值的方法进行计算.由于实验所用的数据量大,读写花费的时间长,因此将总耗时分为数据读写时间和计算时间两部分.如前文所述,并行加速主要对计算有效.为了使实验结果更加清晰,分别计算了总耗时的加速比和融合计算时间的加速比.实验结果如表 1 和图 4 所示.

表 1 并行计算的实验结果

Tab. 1 Experimental results of parallel computing

| 线程数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 总耗时/s | 189.53 | 116.25 | 107.04 | 105.55 | 101.99 | 97.34 | 93.97 | 90.46 |
| 总加速比 | 1.00 | 1.63 | 1.77 | 1.79 | 1.85 | 1.94 | 2.01 | 2.09 |
| 计算时间/s | 132.53 | 59.25 | 50.04 | 48.55 | 44.99 | 40.34 | 36.97 | 33.46 |
| 融合计算加速比 | 1.00 | 2.24 | 2.65 | 2.75 | 2.94 | 3.29 | 3.58 | 3.96 |

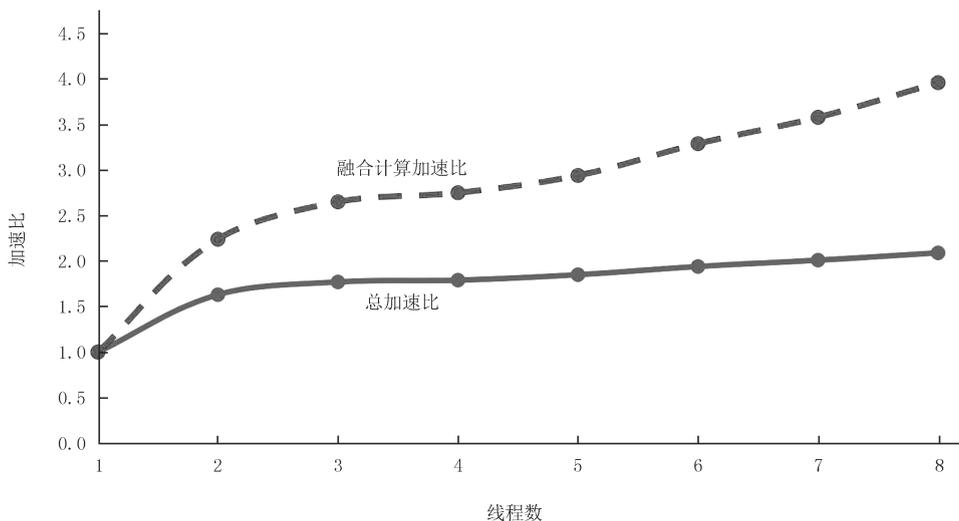


图4 不同线程数对应的加速比

Fig.4 Speedup ratio corresponding to different threads

单线程的效率等同于传统的单核心 CPU 串行执行的效率.由表 1 和图 4 可以看出,加速比随着线程数

的增加而增加,多线程对计算效率的提高随着线程数的增加而加大.可以说,在单 CPU 的情况下,图像融合效率获得了比较理想的提升.但是,整体的加速效果还是受到了 CPU 的物理核心数的限制.实验中使用的 CPU 只有 4 个物理核心,虽然理论上 CPU 通过超线程技术可以使用 8 个线程,但是加速比无法超过 4.实验中也测试了超过 8 个线程的情况,并没有获得更好的效果.显然,如果 CPU 有更多的物理核心,算法的计算效率还会进一步提升.

同时也注意到,大量数据的读写耗时相当大,这也影响了总加速比的提升.从实验结果来看,数据读写占了总计算时间的 1/3 左右,使总加速比止步于 2 附近.因为缺少高速存储子系统,未对数据读写效率的影响做进一步的研究.

4 结 论

本文以 Atrous-HIS 变换为基础,设计和实现了一种基于 OpenMP 的多光谱和全色影像并行融合算法.实现结果表明,该算法可以较好地利用多光谱影像的光谱信息和全色影像的高空间分辨率,生成高分辨率的多光谱影像,可为影像的后期应用提供更多的有用信息.同时,OpenMP 技术的融入使该算法还具有较高的执行效率.实验表明,OpenMP 是一种简单易用的高效并行技术,在遥感影像处理中具有很好的应用前景.在本文的影像融合应用中,应用 OpenMP 技术对算法的修改较小,只需要将算法中可并行执行步骤根据并行计算模式进行适当调整和优化,就能大幅提升算法效率,而且这种提升会随着 CPU 的物理核心数量增加而增加.

此外,实验测试也表明,OpenMP 并行技术对于数据密集型处理的效率提升效果差.在本文实验中,测试表明 OpenMP 技术对大量 MSS 和 PAN 数据的读写几乎没有加速作用(因为加速无效,所以文中未列出相关测试数据),这大大影响了总加速比的提升.未来可以考虑通过采用高速存储子系统提升数据读写速度,效用如何还有待进一步研究.

参 考 文 献

- [1] 牛凌云.多源遥感图像数据融合技术综述[J].空间电子技术,2005,2(1):1-5.
NIU LY.Review of Multi-source remote sensing image data fusion Technology[J].Space Electronic Technology,2005,2(1):1-5.
- [2] 闫哈哈,邢波涛,任璐,等.遥感数据融合技术文献综述[J].电子测量技术,2018,41(9):26-36.
YAN H H,XING B T,REN L,et al.Literature review of remote sensing data fusion technology[J].Electronic Measurement Technology,2018,41(9):26-36.
- [3] 包玉斌,姚建华,黄涛,等.银川市国土空间土地利用变化多源遥感人工目视解译分析[J].安徽农业科学,2021,49(16):221-229.
BAO Y B,YAO J H,HUANG T,et al.Analysis of land use change of national land space in Yinchuan based on manual visual interpretation of multi-source remote sensing images[J].Journal of Anhui Agricultural Sciences,2021,49(16):221-229.
- [4] 余艳.面向特征增强的 SAR 和多光谱图像融合算法研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
YU Y.Research on SAR and multispectral image fusion algorithm for feature enhancement[D].Hefei:Hefei University of Technology,2021.
- [5] 魏东伟.滇东北地区矿地质灾害危险性评价研究[D].昆明:云南大学,2017.
WEI D W.Study on the risk assessment of mine geological disasters in northeastern Yunnan Province[D].Kunming:Yunnan University,2017.
- [6] 后斌,乔伟峰,孙在宏.基于 HIS 变换与 atrous 小波分解的遥感影像融合[J].南京师大学报(自然科学版),2006,29(1):116-120.
HOU B,QIAO W F,SUN Z H.Remote-sensing image fusion based on HIS transform and atrous wavelet decomposition[J].Journal of Nanjing Normal University(Natural Science),2006,29(1):116-120.
- [7] MANDHARE R A,UPADHIVAV P,GUPTA S.Pixel-Level image fusion using brovey transform and wavelet transform[J].International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics & Instrumentation Engineering,2013,2(6):2690-2695.
- [8] 符娇,刘荣,林凯祥.PCA 结合非下采样 Shearlet 变换的遥感图像融合算法[J].航天返回与遥感,2022,43(1):108-119.
FU J,LIU R,LIN K X.A new fusion algorithm for remote sensing images based on PCA and non-subsampled shearlet transform[J].Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2022,43(1):108-119.
- [9] 郭良顺.一种基于不可分小波 atrous 算法的图像融合方法[D].武汉:湖北大学,2015.
GUO L S.An image fusion method of atrous algorithm based on non-separable wavelet[D].Wuhan:Hubei University,2015.

- [10] ZAIQUAN G, CHENHUI, LI P. Research on remote sensing image fusion methods based on Sobolev operator wavelet packet transform[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2013, 8(7): 300-306.
- [11] 陈小潘, 张凯, 臧文乾, 等. 基于高提升滤波与 atrous 小波分解的遥感图像融合算法[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 202-206.
CHEN X P, ZHANG K, ZANG W Q, et al. Remote sensing image fusion based on high-boost filtering and atrous wavelet transform[J]. Journal of Henan University(Natural Science), 2016, 46(2): 202-206.
- [12] 张凯. 基于改进 atrous 小波分解的遥感影像快速融合方法的研究[D]. 开封: 河南大学, 2016.
ZHANG K. Research on a rapid fusion method for remote sensing images based on an improved atrous wavelet decomposition[D]. Kaifeng: Henan University, 2016.

A parallel multi-core fusion method for multispectral remote sensing images based on Atrous-HIS transform

Fan Minghu¹, Xue Haorun², Zang Wenqian³, Zhang Xusheng¹, Xie Yi¹

- (1. Henan Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing, Henan University, Kaifeng 475004, China;
2. International School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To meet the application requirements of efficient fusion of remote sensing images, a parallel fusion method of multispectral and panchromatic images based on Atrous-HIS transform is proposed. Firstly, a serial fusion algorithm of remote sensing image combining Atrous and HIS transform is designed, and its detailed processing steps are analyzed. Then, the OpenMP parallel technology is introduced into the algorithm, the parallel strategy is designed, the processing flow is optimized, and an efficient parallel image fusion algorithm is realized. The experimental results show that the method can achieve fast fusion of multispectral and panchromatic images, having a good speedup ratio, good scalability and high parallel efficiency.

Keywords: remote sensing image fusion; Atrous-HIS; parallel computing; OpenMP

[责任编辑 陈留院 赵晓华]