

文章编号 :1001 - 2486(2004)02 - 0056 - 06

## 遥感图像自动配准的串行与并行策略研究\*

周海芳,刘光明,郑明玲,杨学军

(国防科技大学计算机学院,湖南长沙 410073)

**摘要** 面对数据量呈指数增长的全球遥感图像,研究快速、有效、高精度的自动图像配准算法成为遥感领域迫切需要解决的问题。综述了遥感图像自动配准算法的研究现状和关键技术,且从新的角度分类总结了已有算法的特点及适用情况,并给出了综合的解决方案,同时研究并提出了三种新的并行策略,获得了较好的实验结论。由于算法采用粗粒度的数据并行方法,因此可扩展性和可移植性较好,无论在理论上还是在实践上都能为实际的遥感应用提供有益的指导和借鉴。最后提出了有待进一步研究的问题。

**关键词** 遥感;自动图像配准;点匹配;全局配准;数据并行

中图分类号:TP391.41;TP75;TP301.6 文献标识码:A

## A Research on Serial and Parallel Strategies of the Automatic Image Registration for Remote Sensing

ZHOU Hai-Fang, LIU Guang-ming, ZHENG Ming-Ling, YANG Xue-Jun

(College of Computer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** The amounts of remote sensing images of global coverage will grow exponentially. To study and achieve fast and effective automatic registration of these digital data with high accuracies has become a critical problem in remote sensing. The status of the research on automatic registration of remote sensing images is presented firstly, and some relevant key techniques are discussed. And then, the existing registration algorithms are classified and analyzed from the point of a novel view, and an integrative solution is given. At the same time, three new parallel strategies are proposed with the good experiment results. Because the proposed algorithms are based on the data parallel model of coarse grain, their salability and portability are good, which can be a valuable reference for practical applications in remote sensing. Finally, the problems and challenges of the future research are pointed out.

**Key words** automatic image registration; remote sensing; point-to-point registration; global registration; parallel strategy; data parallel

数字图像配准是指确定在相同或不同时间、通过相同或不同传感器拍摄的两幅或多幅图像之间最佳匹配关系的过程。数字图像配准的用途十分广泛,在遥感领域中的应用包括:数据融合,新传感器校准,变化检测,地球资源调查,地理导航,飞行器或行星探测,基于内容的搜索或目标搜索,地图更新,等等<sup>[1,2]</sup>。

目前,卫星遥感系统能提供大量的全球覆盖和重复测度数据,这些数据是多时向的或者多传感器的。随着航天任务小型化的趋势,大多数的传感器将安装在不同的平台上,这就导致了有大量数据需要拼接或融合。因此,在许多遥感应用中,图像配准不仅是一个关键的步骤,而且需要配准的数据量呈指数增长的趋势,其中的一些例子还要求配准工作必须实时地完成且不能人工干预。这两方面的因素迫切需要我们关注卫星遥感图像自动配准技术的研究,同时研究适合在并行处理系统上执行的自动配准算法,也为应付大数据量的处理提供了有效的途径。

\* 收稿日期:2003-10-06

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(69825104);军口 863 基金项目(2002AA714021);国家 863 基金项目(2002AA1Z201)

作者简介:周海芳(1975—),女,博士生。

# 1 卫星遥感图像自动配准算法

## 1.1 遥感图像畸变原因与配准方法

造成两幅图像在空间和亮度上存在差异的原因是复杂的,与图像获取的方式密切相关。较其他类型的图像而言,遥感图像的畸变原因更为复杂和多样化。遥感图像数据通常包括两种类型的畸变:辐射(亮度)畸变和几何畸变。辐射畸变一般可以通过传感器模型得到校正,通常不归于图像配准的范畴;几何畸变的原因比较复杂。因此,找到两幅图像空间的或者几何的变换是配准问题的关键。几何畸变主要来源于地球自转、全景效应、地球曲率、扫描线速不匀、遥感平台高度、速度、姿态和纵横比的变化等。现有两种主要的技术来校正这些几何畸变,一是根据误差来源建立校正公式完成这些误差的校正。另一种校正方法是将得到的图像与已有的地图坐标系统进行配准达到校正的目的,称为“图像到地图的配准”。在这种情况下,输出结果是每个像素相应的地理坐标。由此延伸,如果应用中并不关心地理坐标,则可以将新获得的图像与已有的图像进行配准,这种配准称为“图像到图像的配准”。在此情况下,仅关心的是两幅图像的相对位置和形态的变换关系,输出的结果是一组变换或一个映射函数。称新获得的需要配准的图像为输入图像,地图或者已有的基准图像为参考图像。由此可见,遥感图像的配准,就本质而言属于几何校正的范畴,是从输入图像到参考图像的校准;同时由于应用目的的不同,又呈现出自身的特点。

## 1.2 图像配准的四个要素

根据文献[1]的分类方法,一个图像配准算法  $RA$  可以表示为包含四个要素的四元组:

$$RA = (S_1, S_2, S_3, S_4)$$

各参数意义如下:搜索空间(Space of search)  $S_1$ :一类或一组用于描述输入图像和参考图像之间空间关系的变换或映射函数所构成的解空间;特征空间(Space of feature)  $S_2$ :一组来自输入图像和参考图像且用于配准的特征;搜索策略(Strategy of search)  $S_3$ :在搜索空间中搜索最优解所采用的策略;相似性测度(Similarity metric)  $S_4$ :用于估计输入图像与经搜索空间中某给定变换处理后的参考图像之间相似程度的指标。

由此,  $RA$  可以概括性地描述为:在特定的搜索空间中,根据某种图像特征,按照一定的搜索策略,计算输入图像和经映射函数变换后的参考图像的相似性,输出相似程度最大的映射函数即为配准的结果。根据这四个要素内容的不同,可以得到不同的配准方法。

### 1.2.1 搜索空间的设定

基于平面表面模型和一些先验的知识,图像的几何变换可以归纳为以下几种:平移、旋转、比例尺变化(或伸缩)、纵横比变化、切变<sup>[3]</sup>。根据这些变换的性质不同,可以得到以下几类不同的搜索空间:

(1) 刚性变换:图像中的目标在变换中能维持相对的形状和大小,含平移、旋转和比例尺变化。

(2) 仿射变换:比刚性变换更一般化的变换,能容忍更复杂的畸变类型。

(3) 透视变换:一个三维景物经一个理想光学成像系统投影得到的图像发生的变形,这是从 3D 到 2D 的映射。

(4) 多项式变换:如果上述这些变换都不能描述图像的畸变,或者传感器几何特性的信息不充分,那么配准可以用多项式变换来描述连续的非线性的变换关系。通常选择较为简单的二阶或三阶多项式。

(5) 局部变换:上述几种都属于全局变换,但对于复杂 3D 景物的透视变换或者某些非线性变换,采用局部变换是必要的。这种变换可以通过分段插值来构造,比如当匹配特征已知时利用样条函数或者基于模板的技术。

可见,根据具体应用的不同和先验知识的多少,可以确定不同的变换空间来描述输入图像与参考图像的映射关系。比如目前常用的控制点配准方法多采用多项式变换,文献[4]给出了一种针对透视变换的图像配准算法。

### 1.2.2 特征空间的确立

在设定了配准的搜索空间后,必须确定某种图像特征作为相似性测度的基础。可用的特征包括以

下几类(1)原始的亮度值(2)边缘信息,如轮廓线(3)某些突出的特征,如边角、线的交叉点、轮廓线的拐点、闭合区域的中心等(4)统计特征,如不变矩、质心等(5)高级的结构特征或句法描述以及语义网的应用(6)模板匹配,如一些已知的对象模板。

各类特征都有其优缺点和适用面,原始亮度值包含了图像的所有特征,但运算量较大;利用特征的算法,效率高,但对噪声十分敏感;其余的几类则一般面向特定的应用;另外特征提取引入了额外的计算复杂度。文献[3]根据提取特征的类型介绍了12种近期提出的配准方法。

### 1.2.3 搜索策略的设计

如果没有任何先验知识,搜索空间在理论上是无穷大的,即使有一定的约束,需要计算的解的数量也是巨大的,那么设计高效的搜索策略是实现高性能配准算法的关键之一,因为好的搜索策略可以有效地缩小搜索空间。已有的搜索策略包括(1)线性搜索(穷举法,此时搜索空间即解空间),一般用于性能比较(2)松弛匹配(3)动态规划(4)广义的Hough变换(5)线性规划(6)逐层求精技术(7)树/图匹配。

### 1.2.4 相似性测度的选择

相似性测度是估计输入图像和变换后的参考图像之间相似程度的指标,相似性测度值最大的变换(或映射函数)即为配准的输出。文献[1]介绍了一些相似性测量的技术,包括一般相关函数、标准化的协方差函数(常称为相关系数)、统计相关、匹配滤波器、相位相关、绝对差和、平方根及掩模相关。

## 1.3 自动点匹配与全局配准

自动图像配准是指在配准的过程中不需要人工的干预。

配准中最常用的方法是:先提取参考图像中一些有突出特征的像素,称为控制点,然后搜索这些控制点在输入图像中的对应点(称为同名点),生成一组同名点对,最后利用这些相互匹配的同名点对计算和拟合两幅图像的变换关系或映射函数。在实际应用中,映射函数通常选择一阶、二阶或三阶多项式,多项式系数通常是利用同名点对,通过最小二乘拟合的方法求得。称这种方法为“点匹配”,它是一种从微观细节入手、以点带面的方法。

目前大多数的遥感图像处理系统都采用点匹配的方法,以交互的方式选择必要的控制点,但这些系统不能很好地适用于自动处理大量的数据,原因就是多项式的计算要么需要少量十分精确的控制点,要么需要大量次精确但分布均匀的控制点。显然,在这两种情况下,控制点的选取都是一项耗时、耗力的工作,无法适应大数据量的需求。同时,在要求实时处理的应用(如导航)中,这种方法也是不现实的。同时自动配准要考虑的是精度问题。因为在卫星遥感图像中自动地确定有效、精确的控制点有时是困难的,太少的点、不准确的点或者分布不均匀的点被选取都可能导致配准误差,而且这种情况是经常发生的。

为此,我们从自动配准的需求出发,提出一种新的图像配准的分类方法,这种分类方法特别适用于遥感图像的处理。自动配准方法可以分为两类:一类是模仿手工的方法,自动选取控制点,进行点到点的配准,即自动的点匹配方法;另一类称之为全局配准,即从宏观的变换入手,利用整图的信息直接搜索最佳的映射函数。

全局配准的基本思想是:在确定了搜索空间后,按照某种搜索策略依次取出搜索空间中的映射函数,先对参考图像进行该映射函数对应的几何变换,然后提取变换后的参考图像与输入图像的指定特征,并根据这些特征计算二者之间的相似性测度值,相似性测度值最大的映射函数即为配准的结果。

两类方法本质的区别在于:点匹配算法的焦点集中在对控制点的搜索,映射函数是利用搜索得到的同名点对解算出来的,而全局配准则是利用整幅图像直接对映射函数进行搜索。因此全局配准的方法更加直接有效,回避了控制点选取难的诸多弊病,更适用于自动处理,在仿射变换等情况下能获得很高的精度。全局配准的缺点是无法描述多项式等复杂的变换,因为这些变换无法构造如上例一样确定的几何变换空间。

这两类方法在已有的成果中都有所体现,而点匹配的研究相对成熟。在自动点匹配的方法中,最常见的控制点是取区域灰度值的中心<sup>[5]</sup>,同时带有区域的属性,如面积、周长、椭圆曲率、仿射不变矩等。

而近来许多应用<sup>[6]</sup>则利用小波分解提取的特征,例如最大或最小的小波系数、局部曲率不连续性。还有一些方法<sup>[7]</sup>利用 Delaunay 三角测量方法来逐步地增加精确的控制点的数量。在全局配准方法中,搜索空间建立在空间域或频率域中,多数通过相关性或最优化计算求得。相关性和最优化计算可以基于原始数据,也可以基于边缘梯度数据。而近期的研究<sup>[8]</sup>致力于将小波用于全局图像配准。此外,相关系数被证明可以用于自动图像配准<sup>[9]</sup>,尽管计算量较大,但它能在没有传感器先验知识和控制点的情况下获得最佳映射函数的估计。

为了解决点匹配过程中遗漏控制点和伪控制点的问题,同时弥补全局配准方法难以描述复杂变换的局限性,针对一些精度要求很高的复杂应用,我们提出一种综合的解决方案,方案分为两个步骤:①用全局配准的方法计算映射函数,而不是匹配个别的控制点。这一步可以给出映射函数的初步估计,本文中以刚性仿射变换为例,即平移和旋转的组合。②从整幅图像中提取显著的、分布均匀的特征,并用①中得到的映射函数进行同名点对的匹配。如果得到的同名点对的数量远大于计算最终形变模型所需要的控制点对数量的下限,那么最终的配准结果就可以得到进一步的精化,并可能获得子像素级的精度。

## 2 并行策略

除了研究自动配准技术以外,由于图像配准算法计算密集的特点,一些研究试图利用并行处理来加速配准的过程。并行化成为另一个获取高性能配准算法的手段。

设计并行算法的第一步是问题的分解。分解的方法有功能分解(控制并行)和域分解(数据并行)两种<sup>[10]</sup>。无论是点匹配方法还是全局配准方法,各处理步骤之间是强相关的,无法设计有效的控制并行,从而只能开发数据并行算法。

### 2.1 粗粒度与细粒度并行

按照任务粒度的大小来划分,已有的并行图像配准算法大多采用细粒度的并行策略。

文献[11]提出了一种基于遗传算法的细粒度并行图像配准算法,该算法采用全局的遗传模型来实现并行图像配准,但在实验中仅仅使用了一幅医学图像数据,应用范围较窄。基于多分辨率小波技术,LeMoigne 提出了一种细粒度的并行算法<sup>[12]</sup>,这种算法适合于 SIMD 结构的并行系统,如 MP-2,但它并不适用于当前主流的 MIMD 结构的系统。Turton<sup>[13]</sup>提出了一种基于硬件的并行图像配准算法,它借鉴了利用遗传算法进行配准的思想,该算法也是开发了细粒度的并行性,并直接用硬件实现,性价比很低且灵活性差。而 El-Ghazawi<sup>[14]</sup>和 Chalemwaf<sup>[15]</sup>先后提出了一种粗粒度和细粒度相结合的方法,并在 Beowulf 和 CrayT3E 上实现,两者的区别是选取的特征空间不同和搜索策略不同,算法没有进行通信优化,且没有给出定量的复杂度分析。

总之,在大规模遥感图像自动配准的应用领域,对并行算法的研究是十分有限的,尤其是对粗粒度的并行算法研究比较欠缺,无论是自动点匹配方法还是全局配准方法,都尚未系统地针对当前通用高性能并行计算机开发的高效并行图像配准算法,对算法的应用特点、适应性、可扩展性和并行效率等方面的研究都有待进一步深入。针对这一情况,从新的角度提出了三种粗粒度数据并行策略,并与文献[15]中的结果进行了比较。

### 2.2 参数并行与像素并行

为了便于比较,以基于多分辨率小波的全局配准算法为例设计相应的数据并行策略。由于在每一小波级处理过程中,各个相关系数的计算相互独立,且图像中各个像素参与计算是与顺序无关的,因此根据数据划分类型的不同,提出三种数据并行方案,第一种称之为参数并行,第二种称之为像素并行,第三种是两者结合的分组混合并行策略。

参数并行的基本思想是“复制图像,划分参数”。假设处理机数为  $N$ ,需要计算的相关系数的解参数个数为  $R$ ,则将  $R$  个参数平均分配给  $N$  个处理机,每个处理机对整幅图像分别计算所分配到的参数,求取最佳估计,然后发送给系统的主处理机,由主处理机计算最后的配准结果。而像素并行的基本思想是“划分图像,复制参数”。将图像平均分为  $N$  块,每个处理机仅对一个图像块计算所有参数对应的相关系数,但由于相关系数的最终结果是需要全部的像素信息,因此每个处理机需要向主处理机发送  $R$

个中间结果,由主处理机最终完成  $R$  个相关系数的计算,再比较得出配准结果。实验结果表明,多数情况下参数并行方法的并行效率高于像素并行方法,但是参数并行的可扩展性有限,且存在负载不平衡的问题,相反,像素并行虽然执行时间较长,但可扩展能力强,并行负载的平衡度高,在图像规模较大时也能获得接近线性的加速比。为了充分发挥二者的优势,我们提出了分组混合并行策略。该策略的基本思想是:“先参数并行,后分组进行像素并行”。首先将相同个数的参数分配给各个处理机,然后按照剩余分配不均的参数的个数将处理机分组,每组处理一个参数,组内进行像素并行。这样不仅增强了算法的可扩展性,而且使得第二阶段“像素并行”所处理的解参数尽量地少、而所处理的图像分块尽量地大,尽可能地拉大并行计算负载和全局计算开销之间的差距,进一步提高算法的并行效率。

基于小波的全局配准并行算法的详细设计和实验结果将在另文中讨论,这里仅给出相关的比较结论。图1、图2给出了三种粗粒度并行策略的加速比曲线,实验结果表明三种策略的加速比都随着数据规模和系统规模的增大而增长,其中像素并行方案的加速比随数据规模增长的幅度十分显著。像素并行方案虽然引入的通信量和冗余计算较多,性能较参数并行明显偏低,但随着数据规模的增大,算法执行过程中串行分量和通信所占的比例迅速减小,使得加速比增幅较大。这里,当图像规模增大到3072时,加速比已经接近参数并行。从上述分析来看,当图像规模较大时,三种并行方案都能获得较好的并行性能。这一结论对于大规模的遥感图像自动配准处理业务是十分有益的。算法选取的特征空间和相似性测度与文献15较为接近。表1给出了性能比较,可见,本文的算法获得了更高的并行加速比。

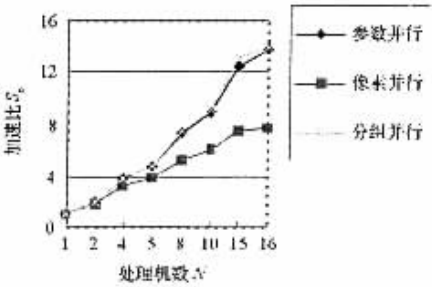


图1 三种并行策略的加速比(图像大小 1024 × 1024)

Fig.1 The speedup of three parallel methods (image size is 1024 × 1024)

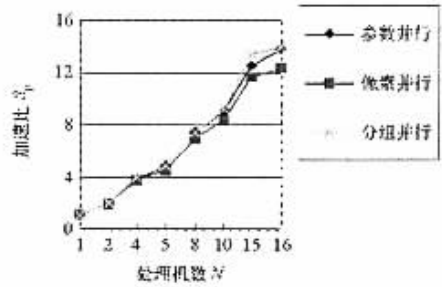


图2 三种并行策略的加速比(图像大小 3072 × 3072)

Fig.2 Three speedup of three parallel methods (image size is 3072 × 3072)

表1 与已有算法加速比的比较(图像大小)

Tab.1 The comparison of the existing algorithm and our algorithm (image size is 512 × 512)

算法	文献 [15]		分组混合并行
平台	Beowulf: Pentium Pro 200MHz, 384MB Memory, Fast Ethernet 100Mbps/s, Linux	Cray/T3E-900: DEC Alpha26124 450MHz, 256MB, 3DTorus 122Gbits/s, Unicos	Pentium-4 1.7GHz, 1GB Memory, Fast Ethernet 100Mbps/s, Linux
单机处理	约 400s	约 90s	约 100s
8 处理机	7.04s	7.33s	7.51s
16 处理机	10.49s	12.80s	13.76s

### 3 结语

面对数据量呈指数增长的全球遥感图像,研究快速、有效、高精度的自动图像配准算法成为迫切需要解决的问题。本文综述了遥感图像自动配准算法的研究现状和关键技术,并从新的角度分类总结了已有成果的特点及适用情况,同时研究并提出了新的并行策略,获得了较好的实验结论,由于算法采用粗粒度的数据并行方法,因此可扩展性和可移植性较好,无论在理论上还是实践上都能为实际的遥感应用提供有益的指导和借鉴。

图像配准领域虽然已有大量的研究成果,但仍然存在一些亟待解决的问题:

- (1) 自动搜索精确的控制点仍然是研究的热点;
- (2) 针对特定应用,面向通用分布式并行处理系统,研究高效的自动点匹配、全局配准并行算法;
- (3) 子像素级精配准技术的研究,目标是获得精度和速度的良好折衷。

## 参考文献:

- [1] Brown L. A Survey of Image Registration Techniques[J]. ACM Comput. Surv., 1992, 24(4).
- [2] Le Moigne J, Campbell W J, Cromp R F. An Automated Image Registration Technique Based on the Correlation of Wavelet Features[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8).
- [3] Fonseca L M G, Manjunath B S. Registration Techniques for Multi-sensor Sensed Imagery[J]. Photogramm. Eng. Remote Sens. J., 1996, 62(9).
- [4] Wolberg G, Zokai S. Image Registration for Perspective Deformation Recovery[A]. In Proc. SPIE, Automatic Target Recognition X, Orlando, FL, 2000.
- [5] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. A Contour-based Approach to Multisensor Image Registration[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1995, 4(3).
- [6] Zhang X, Burlina P, Zheng Q, Chellappa R. Automatic Image to Site Model Registration[A]. In Proc. ICASP, Atlanta, GA, 1996, 4(5).
- [7] Devereux B J, Fuller R M, Carter L, Parsell R J. Geometric Correction of Airborne Scanner Imagery by Matching Delaunay Triangles[J]. Int. J. Remote Sens., 1990, 11(12).
- [8] Thévenaz P, Ruttimann U E, Unser M. A Pyramid Approach to Sub-pixel Registration Based on Intensity[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1998, 7(1).
- [9] Pratt W K. Correlation Techniques of Image Registration[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, 1974, AES-10(3).
- [10] 周海芳, 蒋艳凰, 杨学军. 流域变换的串行与并行策略研究[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(6).
- [11] Ozkan M, Fitzpatrick J M, Kawamura K. Image Registration for a Transputer-based Distributed System[A]. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial & Engineering Applications of AI & Expert Systems (IEA/AIE-89), 1989, 6: 908-915.
- [12] Le Moigne J. Towards a Parallel Registration of Multiple Resolution Remote Sensing Data[A]. Proceedings of IGARSS '95, Firenze, Italy, 1995.
- [13] Turton B, Arslan T, Horrocks D. A Hardware Architecture for a Parallel Genetic Algorithm for Image Registration[A]. In Proceedings of IEEE Colloquium on Genetic Algorithms in Image Processing and Vision, 1994, 10: 111-116.
- [14] El-ghazawi T, Chalermwat P, LeMoigne J. Wavelet-based Image Registration on Parallel Computers[A]. In SuperComputing '97: High Performance Networking and Computing: Proceedings ACM/IEEE, 1997.
- [15] Chalermwat P. High Performance Automatic Image Registration for Remote Sensing[D]. George Mason University, Fairfax, Virginia, 1999.



