



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Theory, Method and Application of
Multi-baseline Stereo Matching Technique

范大昭 纪松 雷蓉 著

多基线立体匹配理论、 方法与应用



测绘出版社

地理信息科技出版资金资助

多基线立体匹配理论、方法与应用

Theory, Method and Application of Multi-baseline
Stereo Matching Technique

范大昭 纪松 雷蓉 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 范大昭 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书主要阐述了遥感影像多基线立体匹配的理论、技术与应用情况。全书共分6章,内容包括立体影像匹配技术发展现状、立体影像匹配理论与方法、多基线立体影像预处理方法、多基线立体影像匹配模型、多基线立体影像匹配策略方法、多基线立体影像匹配优化方法、多基线立体影像匹配技术的应用等。

本书可供测绘、遥感领域内的广大科技工作者、工程技术人员参考使用,也可作为高等院校有关专业研究生和高年级本科生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多基线立体匹配理论、方法与应用/范大昭,纪松,雷蓉著. —北京:测绘出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5030-4016-0

I. ①多… II. ①范… ②纪… ③雷… III. ①遥感
图像—图像处理 IV. ①P237 ②TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 302059 号

责任编辑	雷秀丽	封面设计	李伟	责任校对	孙立新	责任印制	陈超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm			彩 插	6		
印 张	9.75			字 数	202 千字		
版 次	2017 年 1 月第 1 版			印 次	2017 年 1 月第 1 次印刷		
印 数	001—800			定 价	42.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4016-0

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

从“二维影像”中精确恢复“三维场景”一直是计算机视觉和摄影测量学界的关键问题,其核心技术为影像匹配。影像匹配的本质是在不同影像上自动量测或者获取同名点。计算机视觉和摄影测量领域对立体像对的影像匹配做了大量卓有成效的研究,但仍有很多难题没能很好地解决,如几何变形、特征相似、遮挡与地表断裂等问题。当三维场景被投影为二维影像时,由于深度和地物遮挡,同一物体在不同视角的影像中存在信息丢失;同时,不同物体可能具有相似的形状、大小或背景。因此,影像匹配不是一个简单的算法,而是一个解决上述矛盾的系统化任务。

为了降低三维场景向二维影像投影时的信息盲区,在航空领域,“多角度”、“全方位”、“轰炸式”摄影逐渐成为一种新的摄影方式;在航天领域,随着我国“高分辨率对地观测系统”的加速推进,多层次、多角度、全方位和全天候的全球立体对地观测网也正在逐步形成。在多重重叠影像数据支持下,多基线影像匹配技术已经成为一个重要的研究方向,它能够利用多视角、多重重叠遥感影像,消除二维投影时的信息盲区,将单立体影像匹配的“病态解”转化为多视匹配的“确定解”,提高立体匹配的可靠性和成功率,重建目标区精细的三维地形。然而,与单立体影像匹配技术相比,多基线立体匹配技术的研究面临许多难题,如无法直接使用传统的单立体匹配模型与策略,重叠影像数量增多且影像间几何结构难以统一,立体匹配计算量大幅提高等。为了进一步完善多基线立体匹配技术,提高该技术的实用性,需要对其匹配理论、匹配策略、匹配方法等进行改进、创新与实现。国内外在此研究方向上有不少学术论文,但迄今为止,还没有一本系统介绍多基线立体匹配的基本理论、技术方法、应用实践的专著。

本书正是针对这一现状,结合作者承担的多项与之密切相关的国家和省部级科研项目,立足于高分辨率遥感影像立体匹配技术的现有研究基础,对多基线立体匹配理论与技术体系进行了细致、深入的剖析,给出了多基线立体匹配技术相关的理论方法及实现细节,并通过典型应用来验证其正确性和实用性。相关的研究成果已得到了工程实践的检验并应用于实际生产中。全书共分6章,范大昭主要负责第2章、第4章的编写,纪松负责第3章、第5章的编写,雷蓉负责第1章和第6章部分内容的编写。另外,中原工学院屈丽娜博士也参与了第6章部分内容的编写工作,在此表示感谢。全书由范大昭统稿。

本书是作者近十年来在多基线立体影像匹配方向科研和学术研究成果的总结,在写作过程中也借鉴、参考了国内外同行的研究成果与有益经验。限于作者的学术水平,疏漏和不当之处实难避免,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 单立体影像匹配技术及其发展	2
1.2 多立体影像匹配技术及其发展	3
1.3 基于影像匹配技术的专业应用系统	6
1.4 影像匹配的难点与现有研究的不足	12
第 2 章 单立体影像匹配理论与方法	14
2.1 单立体影像匹配基本原理	14
2.2 单立体影像匹配常用方法	17
第 3 章 多基线立体影像预处理方法	29
3.1 多基线立体影像匹配常用坐标系统	29
3.2 光学传感器成像模型	32
3.3 多基线立体影像辐射预处理	36
3.4 多基线立体影像几何预处理	40
第 4 章 多基线立体影像匹配方法	43
4.1 多基线立体影像匹配模型	43
4.2 多基线立体影像匹配模型对比分析	49
4.3 多视最小二乘高精度影像匹配方法	54
4.4 多基线立体影像匹配并行优化方法	67
4.5 多基线立体影像匹配精度分析与评定方法	82
第 5 章 多基线立体影像匹配策略	84
5.1 多基线立体匹配影像质量分析与筛选策略	84
5.2 辅助数据应用策略	98
5.3 多基线立体影像匹配的约束条件及其应用策略	100
第 6 章 多基线立体匹配体系结构与应用	112
6.1 多基线立体匹配方法的体系结构设计	112
6.2 多基线立体匹配方法综合应用	119
参考文献	147

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Single Stereo Image Matching Technology and Its Development	2
1.2	Multi-stereo Image Matching Technology and Its Development	3
1.3	Professional Application System Based on Image Matching Technology	6
1.4	Difficulties in Image Matching and Problems with the Existing Research	12
Chapter 2	Theories and Methods of Single Stereo Image Matching	14
2.1	Principles of Single Stereo Image Matching	14
2.2	Methods of Single Stereo Image Matching	17
Chapter 3	Preprocessing Methods of Multi-baseline Image Matching	29
3.1	General Coordinate Systems of Multi-baseline Image Matching	29
3.2	Imaging Models of Optical Sensor	32
3.3	Radiometric Preprocessing of Multi-baseline Stereo Images	36
3.4	Geometric Preprocessing of Multi-baseline Stereo Images	40
Chapter 4	Methods of Multi-baseline Image Matching	43
4.1	Models of Multi-baseline Image Matching	43
4.2	Comparative Analysis of Multi-baseline Image Matching Model	49
4.3	Multi-view Least Square and Precise Image Matching Method	54
4.4	Parallel Optimization Methods of Multi-baseline Image Matching	67
4.5	Accuracy Analysis and Evaluation Methods of Multi-baseline Image Matching	82
Chapter 5	Strategies of Multi-baseline Image Matching	84
5.1	Quality Analysis and Selecting Strategy of Multi-baseline Stereo Images	84
5.2	Application Strategy of Auxiliary Data	98
5.3	Geometric Constraints and Its Application Strategy of Multi-baseline Image Matching	100
Chapter 6	Architecture and Application of Multi-baseline Image Matching	112
6.1	Architecture Design of Multi-baseline Image Matching	112
6.2	Comprehensive Application of Multi-baseline Image Matching	119
References		147

第1章 绪 论

从高分辨率遥感影像中获取基础地理信息,密集、可靠的同名像点及其物方空间坐标的影像匹配获取是首要解决的关键技术。

影像匹配的本质是在不同影像上量测或者获取同名点(同名特征)。计算机视觉和摄影测量领域对单个立体像对的影像匹配做了大量卓有成效的研究,但仍有诸多难题没能解决,如几何变形、特征相似、遮挡与地表断裂等问题。当三维场景被投影为二维影像时,由于深度和地物遮挡,同一物体在不同视角的影像中存在信息丢失的情况;同时,不同物体可能具有相似的形状、大小或背景。此时,传统“单立体”影像匹配方法容易出现“病态解”,大大地降低了匹配结果的精度与可靠性。因此,影像匹配不是一个简单的“算法”,而是一个解决上述矛盾的“系统化任务”。

在高分辨率对地观测系统提供的多度重叠影像数据支持下,多基线、多视点的影像匹配已经成为一个重要的研究方向,它将过去由单立体(两度重叠)的影像匹配的“病态解”转化为多立体(多度重叠)影像匹配的“确定解”。这将影像匹配技术极大地向前推进,由此,摄影测量与激光扫描一样能够产生密集的点云。与激光扫描相比,影像匹配产生的点云多位于影像特征点上,因而能够更好地反映目标的几何特征。

与单立体影像匹配技术相比,多基线立体匹配技术的优越性主要体现在利用多视角影像,覆盖信息盲区,进一步提高匹配成功率,获取更为稠密的同名像点结果;其劣势在于无法直接使用传统的匹配模型与方法,而且需要处理的立体像对数目增多,匹配计算量大幅提高。于是,为了进一步提高多基线立体匹配技术的实用性,需要对传统的匹配模型与方法进行改进,并利用并行计算手段,大幅提高匹配速度、缩短匹配周期。其中,利用并行计算技术来缩短摄影测量处理任务的作业周期,提高生产效率已经成为当前摄影测量领域的一大发展趋势,特别是利用低成本“可编程图形处理器”为核心部件搭建紧凑型并行计算平台,更呈现出良好的发展前景。相对于传统的服务器集群,图形处理器并行计算在性价比、功耗等方面的优势非常明显。

随着“高分辨率对地观测系统”国家重大专项的启动与加速推进,我国对地观测数据的获取能力将逐步增强,一个多层次、多角度、全方位和全天候的全球立体对地观测网将逐步形成。利用多基线立体匹配技术,精确、自动、快速处理这些高分辨率遥感影像数据,获取稠密的三维地理空间信息,是有效发挥我国高分辨率重大专项系统优势的基础。在此背景下,综合国内外相关技术的最新研究成果,立足

于遥感影像立体匹配技术的现有研究基础,对多基线立体匹配技术进行细致、深入的研究,具有重要的研究意义与广阔的应用前景。

1.1 单立体影像匹配技术及其发展

20 世纪 60 年代中期,Roberts 将二维影像分析扩展至三维空间分析,并初步完成了三维景物分析工作,这标志着立体视觉技术的诞生(Roberts,1965)。在立体视觉技术的基础上,20 世纪 70 年代中期,Marr 提出了首个计算机视觉领域的理论框架,极大地推动了计算机视觉的发展(Marr,1987)。同一时期,以 Marr 和 Poggio 等为代表的一些学者立足于计算机科学技术,提出了一整套视觉计算的理论来描述视觉过程,其核心是利用二维影像恢复三维物体形态,这标志着立体匹配研究的开始,具有划时代的意义(Marr et al.,1976)。

20 世纪 80 年代,立体匹配成了计算机视觉领域的研究焦点之一,其研究内容主要集中在立体重建的基本原理、评估标准和匹配算法等,主要研究成果包括大量的匹配方法,层次处理观念的引进,以及利用三目约束来降低立体匹配的模糊性等。到了 90 年代,立体匹配技术逐步发展成熟,但是大部分研究工作逐渐转向摄影测量、三维重建、虚拟现实等特定问题领域,并开始对立体匹配中的不确定性问题与遮挡问题进行研究,提出一些处理遮挡问题的方法,同时对多相机立体匹配问题方法进行了初步探讨。到了 21 世纪,随着传感器技术的发展,立体匹配技术得到了进一步发展,此时研究工作更多地投入于高分辨率影像的稠密立体匹配及其技术难题。

在摄影测量领域,立体像对量测是提取目标三维信息的基础。进入数字摄影测量时代后,影像匹配取代了传统的人工量测,并用于自动确定同名像点。影像匹配最初用于立体像对的相对定向、绝对定向、空间三角测量中的连接点提取、影像配准、数字高程模型(digital elevation model, DEM)与数字表面模型(digital surface model, DSM)的自动提取等过程(王之卓,2007)。自数字摄影测量发展的 20 余年来,影像匹配技术得到广泛的研究,但是至今还没有一个完全自动、精确、可靠,并且适用于不同类别、不同内容遥感立体影像的匹配方法。

目前,立体匹配的研究依然非常活跃,在一些著名的国际会议中都有立体匹配的最新成果报道和专题交流,例如,国际计算机视觉会议,国际模式识别会议,计算机视觉、图形与图像处理会议,计算机视觉与模式识别会议,欧洲计算机视觉会议,亚洲计算机视觉会议,图像处理国际会议,计算机视觉国际工作会议,地理科学与遥感会议,图像与信号处理会议,国际摄影测量与遥感会议和美国摄影测量与遥感年会等。此外,报道立体匹配最新研究进展的国际刊物也很多,具体有:《国际机器视觉杂志》(International Journal of Computer Vision),《模式识别》(PR-Pattern

Recognition),《模式分析与机器智能》(IEEE Transactions on PAMI),《视觉计算机》(The Visual Computer),《计算机辅助设计与计算机图形学》(Computer Aided Design & Computer Graphics),《计算机视觉与图像理解》(Computer Vision and Image Understanding),《摄影测量工程与遥感》(Photogrammetric Engineering and Remote Sensing),《ISPRS 摄影测量与遥感》(ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing),《摄影测量记录》(Photogrammetry Record),SPIE、IEEE 的论文集和期刊等,每年发表的文章有百余篇。

1.2 多立体影像匹配技术及其发展

多立体影像匹配技术的早期研究目的在于提高单立体影像匹配的稳定性,主要代表学者为 Okutomi、Kanade 和 Ku 等,其主要研究成果有:Okutomi 和 Kanade 利用一组沿着(水平)基线方向的影像序列进行立体匹配,解决了周期性重复特征所引起的误匹配问题,对多基线立体影像匹配问题做了最早的讨论(Okutomi et al., 1993);Ku 等扩展了上述方法,将相机在不同位置从不同方向对物体进行摄影,将得到的所有像片结合起来进行处理,通过使用这种方法,不仅减少了对应关系上的模糊性,而且提高了物体表面重建的精度,该方法能够在一定程度上减少由于遮挡或者噪声引起的误匹配问题(Ku et al., 1998)。这些研究成果为多立体影像匹配技术的发展奠定了理论基础,也在一定程度上引起了部分研究学者的专业兴趣。然而,由于相应研究成果的局限性(局限于固定基线、短基线的地面摄影测量),此时的多立体影像匹配技术并没有得到研究学者的广泛关注和深入应用。

直到 21 世纪,随着高分辨率、大重叠度的遥感影像获取成为可能,通过多立体影像匹配术,综合利用多幅影像信息,增加空间物体表面的可见性和多余观测量,有效提高自动匹配的可靠性和成功率,日渐成为一种新的遥感影像数据处理方式,多立体影像匹配技术得到研究人员的广泛关注,并取得了较大程度的发展,出现了针对不同传感器类型、不同匹配策略的技术方法。

1.2.1 针对不同传感器类型的多立体影像匹配方法

(1)针对航空三线阵数字传感器影像:Pateraki 和 Baltsavias 等提出了一种自适应多影像匹配方法,该方法首先计算边缘像素的互相关与相似性测度,获取匹配初值,并利用最小二乘优化方法,将匹配精度提高到子像素级(Pateraki et al., 2004);Lin 给出了一种三像匹配方法流程,该方法在影像预处理、特征提取与影像金字塔生成的基础上,将前视、后视影像分别与下视影像进行匹配,并在物方空间将匹配结果进行融合,以达到消除遮挡,提高匹配可靠性的目的(Lin et al.,

2004);Gruen 与 Zhang 提出了一种多影像匹配方法,利用三线阵影像进行了匹配实验,该方法利用格网点与特征点匹配元素,对 3 幅三线阵影像同时匹配,其中特征点匹配作为格网点匹配的补充,能够弥补格网点对于地形表示上的不足;张永生提出了一种多立体影像匹配算法,并对影像匹配中相似特征、遮挡区域的匹配等问题进行了探讨(Zhang et al., 2006),以 3 幅 ADS40 实验影像完成了多基线立体匹配实验,研究表明,该算法能够同时匹配多幅线阵影像,在减小点特征误匹配的基础上,提高了影像匹配的精度;范大昭深入探讨了多线阵影像匹配生成 DSM 的理论与算法,提出了用于线阵影像的几何条件约束的自适应多像(adaptive multi-image matching with geometric constraints, AMMGC)多视匹配模型、改进的铅垂线轨迹(modified vertical line locus, MVLL)多视匹配模型,同时与带几何约束的最小二乘匹配相结合,将匹配结果优化至于像素级,并自动生成密集、高精度的 DSM(范大昭,2007;纪松,2008)。此外,上述方法都利用了三线阵传感器模型及其定向参数,对匹配过程进行几何约束。

(2)针对航空面阵数字传感器影像:基于同一地面点在不同影像上的摄影光线相交这一特点,在传统单立体航空影像构像模型的基础上,Baltsavias 提出了一种带有共线条件的多片影像匹配方法(multi-photo geometrically constrained, MPGC),实现了航空面阵数字传感器影像的多基线立体匹配;张祖勋针对当今航空数码相机沿航线方向视场角偏小的事实,根据交会精度与影像匹配自动化的需要,阐述了大重叠、多基线摄影测量的必要性及其现实意义,同时,针对数字近景摄影测量,介绍了利用非量测相机进行多基线的正直、交向摄影方法与数据处理的特点,并对多基线交向摄影进行了实验分析(Baltsavias, 1991);Szeliski 给出了一种新的利用多幅影像提取同名像点并进行运动估计的方法,该方法与传统的两两影像分析并进行结果合并的过程不同,通过构建统一的影像分析框架,将多幅影像构成的数据集联系起来,且该方法能够针对影像遮挡与运动等实际问题,自适应选用质量较好的匹配影像(Szeliski et al., 1995; Szeliski, 1999)。

(3)针对航空航天线阵列数字传感器影像:Pateraki 研究并提出了一种自适应的多像匹配模型,该模型应用多种匹配元素(特征点、格网点、边缘),融合区域与局部影像信息,同时利用由粗至精的匹配策略来完成影像的匹配过程,该模型将在画幅式像片上存在的核线的概念加以扩充,充分利用了准核线的几何约束(quasi-epipolar constraints)来实现一维的同名像点搜索(Pateraki, 2005);Zhang 提出了一种几何约束互相关(geometrically constrained cross correlation, GC³)多视匹配模型,并在此基础上给出了一种多元素多影像匹配方法(multi primitive matching, MPM)(Zhang, 2005),该方法应用了格网点、特征点与特征线等多种匹配元素,利用多种几何约束策略和质量控制措施,通过由粗到精的多级匹配措施,实现了线阵影像数据的密集、快速匹配。

(4)针对近景数字影像:朱庆提出了一种基于自适应三角网约束的多基线立体匹配方法。该方法首先利用特征点匹配,获取准确匹配结果并构建三角网;随后针对影像纹理,在梯度定向(*gradient orientation*)和视差约束(*disparity constraint*)条件下,动态更新三角网,并为后续点匹配过程提供较强的几何约束;最后利用多幅影像,在物方空间对匹配结果的一致性进行检查,剔除误匹配结果(Qing, 2010)。

1.2.2 针对不同匹配策略应用的多立体影像匹配方法

(1)利用影像特征信息进行优化匹配:Brown等学者利用Harris角点检测算子,对兴趣特征点进行定位与提取,利用快速最近邻域算法,计算特征低频Haar小波系数,并对特征进行索引和多影像匹配,同时该算法还引入了粗差探测与剔除过程,在特征误匹配分布结果分析的基础上,对匹配结果进行随机抽样一致性(*random sample consensus*, RANSAC)优化(Brown et al., 2003, 2005);Matthew运用尺度不变特征(*invariant feature*),通过同名像点匹配与索引机制来从多幅影像上获取准确的匹配结果,该方法将多基线立体匹配看作寻找最佳匹配影像集的问题,并运用概率验证模型,寻找尺度不变特征在匹配影像上的一致匹配结果(Matthew, 2005);Maas利用兴趣点提取算子,提取影像上的离散特征点,并给出了一种基于特征点的多影像匹配算法,该匹配算法的核心思想在于计算多幅影像的核线,将这些核线投影相交,以获取最佳匹配结果,该方法成功利用了影像的成像结构,然而核线相交分析比较庞杂,且不易实施(Maas, 1996)。

(2)利用影像整体或局部灰度变化信息进行优化匹配:Zhang提出了一种混合匹配(*hybird matching*)的思想,将多幅影像数据进行质量分析与排序,通过自动影像分析引擎获取最佳质量与数量的匹配影像,同时通过格网点匹配与边缘特征匹配,结合反向匹配检查等策略,融合生成高质量的匹配结果(Zhang et al., 1997, 2006; Zhang, 2006);Kang针对多影像匹配中通常存在的灰度几何畸变问题,提出了一种可移动窗口与匹配影像动态选择方法,通过可移动窗口与匹配影像动态选择,实现多影像匹配的可靠性进一步提高(Kang et al., 1995);Kang同时发展了一种基于全局能量最小化的遮挡像素标记算法,通过遮挡像素标记算法,影像匹配的成功率得以提高(Kang et al., 2001)。

(3)利用多类型几何约束条件进行优化匹配:Hirschmüller提出了一种半整体匹配算法(*semi-global matching*, SGM),并将该方法成功应用于多幅影像的匹配,SGM算法基于影像像素之间的互信息(*mutual information*)以及全局的二维光滑约束条件,在物体边缘信息保持、匹配效果和计算效率等方面具有较高的鲁棒性,目前已经成功用于North West Geomatics公司和Leica Geosystems公司开发的软件系统(Hirschmüller et al., 2007; Hirschmüller, 2008);江万寿将基于视差格

网的整体松弛影像匹配算法推广到多基线立体影像匹配,提出并实现了基于高程平滑约束的多基线立体影像匹配的松弛法,在传统的多片最小二乘方法的基础上,提出了一种基于物方面元的单点多片最小二乘方法(江万寿,2004);D'Apuzzo 基于几何约束下最小二乘匹配算法,提出了一种多影像匹配方法,该匹配方法利用了5幅具有一定重叠度的影像数据,通过邻域滤波与多视^①最小二乘算法,获取稠密同名像点结果(D'Apuzzo, 2002);Elaksher 提出了一种基于神经网络技术的多影像匹配方法,该方法首先利用灰度相关测度,对整个匹配影像进行两两匹配,并将这些匹配结果放入神经网络分析框架,通过自适应学习过程,获取最佳匹配结果(Elaksher,2008)。此外,这些方法都在金字塔影像传递匹配上,通过更加准确的匹配初值的获取,实现了匹配方法的改进和优化。

(4)利用影像物方信息进行优化匹配:袁修孝提出了一种综合利用像方和物方信息的多影像匹配方法,该方法首先选取基准影像,分别将各幅搜索影像与基准影像进行匹配,随后对单立体像对的匹配结果进行物方空间融合,并将融合结果传递至下一层金字塔的匹配。同时,该方法融入了带几何约束条件的相关系数法匹配和整体松弛法匹配策略,与传统单立体影像匹配方法相比,影像匹配的成功率显著提高(袁修孝,2009)。

总的来说,随着多立体影像匹配技术的发展,立体影像匹配的成功率、可靠性、精度得到了显著提高,这也促使多立体影像匹配技术在计算机视觉、摄影测量、机器人、无人驾驶等行业领域发挥愈加重要的作用。但是,利用二维影像恢复三维场景始终是一种病态性的技术问题,有许多技术难点需要攻克,多立体影像匹配方法尚未(也不可能)彻底解决这些难题,影像匹配技术仍然值得深入研究。

1.3 基于影像匹配技术的专业应用系统

在摄影测量与遥感数据处理系统开发方面,法国 ISTAR 公司首先提出了像素工厂的概念并于2002年完成系统研制工作,如图1.1所示。像素工厂采用了先进的设计理念,集成了多项先进的遥感数据处理技术和自动化处理技术,并具有大规模并行处理和动态作业流程管理功能,能够快速高效地对多传感器影像进行加工并生成DSM、DEM、数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)、真正射影像图(true digital orthophoto map, TDOM)等地理空间信息产品,引起了业界的极大关注(曹敏等,2006)。像素工厂系统采用了先进的多基线立体影像匹配技术,数据处理时,系统将多张影像载入像素工厂,通过算法生成几百个立体像对,通

^① 多视(multi-view)这个名词并不统一,在计算机视觉中,称为“多目”,在数字摄影测量中称为“多影像”(multi-image)、“多光线”(multi-ray),或“多基线”(multi-baseline)等,但是它们的含义基本一致。

过同轨和异轨立体像对实现多相关,在逐点自动测量过程之后,融合形成 DSM (Bignone, 2003)。

2003 年,欧洲空间局(European Space Agency)开展了 Mars Express 任务,其中德国宇航中心为其设计了 HRSC(high resolution stereo camera)相机并获取了整个火星 10 m 分辨率的立体影像数据,而且部分地区的影像数据分辨率能够达到 2 m,如图 1.2 所示。2004 年,德国宇航中心基于 HRSC 相机数据,完成了包括从影像预处理到 DEM/DSM 生成的整个数字摄影测量处理过程。目前,在影像匹配技术方面,德国宇航中心提出并采用了 SGM 影像匹配方法,与传统的影像匹配方法相比,SGM 匹配方法具有较高的边缘保持性能,且匹配可靠性更高,如图 1.3 所示(Hirschmüller, 2008)。

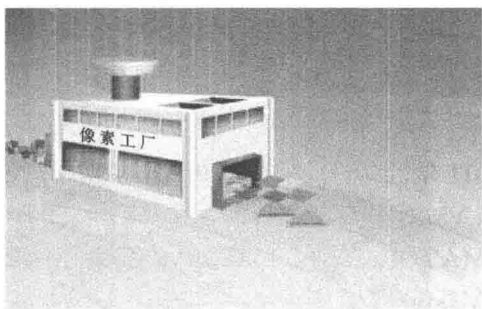


图 1.1 像素工厂系统实物

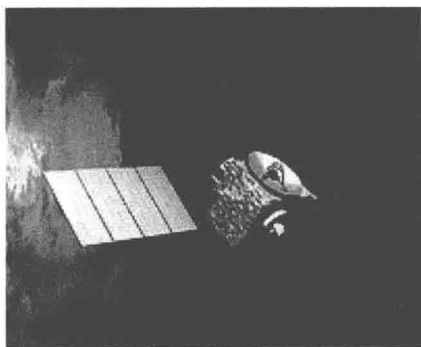


图 1.2 Mars Express 任务中的 HRSC 相机

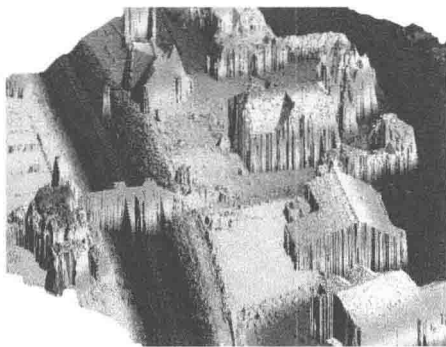


图 1.3 基于 SGM 技术获取的 DSM

2011 年,美国 BAE 系统公司推出了 SOCET SET V5.6.0 版本的数字测图应用软件系统,该系统主要用于摄影测量数据处理与地理空间分析。在地理空间信息提取方面,SOCET SET 在原先数字地面模型自动提取(automatic terrain extraction, ATE)模块的基础上,进一步研制并推出了新一代数字地面模型自动提取(next generation automatic terrain extraction, NGATE)模块,如图 1.4 所示。NGATE 模块采用了混合匹配过程,通过点特征逐像素匹配与边缘特征匹配,自动

生成密集高精度的 DEM/DSM。由于影像匹配技术的改进,与原 ATE 模块相比,NGATE 模块提取的 DEM/DSM 可靠性与自动化程度有了极大的提高,仅地形交互编辑这一作业内容,人工编辑量减小约 30%。

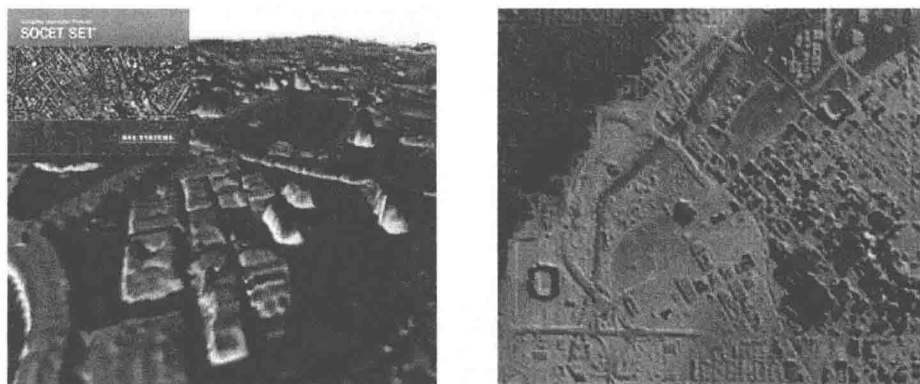


图 1.4 SOCET SET V5.5 与 NGATE 模块提取的 DSM

2011 年,德国 INPHO 公司推出了摄影测量软件产品 INPHO's Photogrammetric System V5.4 (Trimble Inpho 5.4),如图 1.5 所示。该系统包括连接点量测、区域网平差 MATCH-AT、DTM/DSM 提取 MATCH-T DSM 以及正射影像制作 OrthoMaster 等模块,同时该系统还采用了并行处理技术,缩短了数据处理时间。其中,连接点量测模块与 DTM/DSM 提取模块中采用了该公司研发的影像匹配技术。

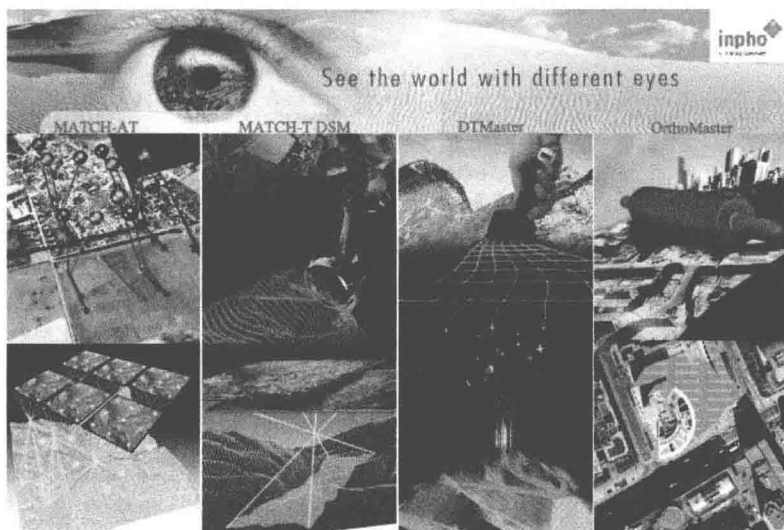


图 1.5 Trimble Inpho 5.4 及其功能模块

同年,PCI GEOMATICS 公司推出了 Geomatica 2012 与相应的 GeoImaging Accelerator(GXL)产品,该系列产品将高性能计算与 PCI Geomatica 数据处理产品紧密结合,通过优化传统的影像预处理流程,大大提高了影像处理的速度,如图 1.6 所示。在后续的开发中,该产品采用基于图形处理器(graphic processing unit,GPU)并行计算技术,增加自动镶嵌、航空影像正射纠正以及 DEM 自动提取模块。GXL 对影像匹配算法进行了并行性能分析,这对于影像匹配性能的研究具有重要的指导意义。



图 1.6 Geomatica 2012 与 GeoImaging Accelerator

2011 年,ERDAS 公司发布了 ERDAS IMAGINE 2012 系列软件,该软件包括高精度地形信息提取模块 LPS eATE(LPS 2012),如图 1.7 所示。LPS eATE 可以处理不同数据源影像,且能够生成高分辨率的点云数据。此外,该模块提供了在多核并行以及多机并行环境下处理多源遥感数据的能力,可以充分发挥多核计算机系统以及网络集群的计算资源。LPS eATE 模块在传统的 ATE 模块的基础上研制开发,采用了最新的多立体影像匹配技术,匹配可靠性与成功率得到了进一步提高,而且能够对影像数据进行逐像素处理。

同年,遥感软件、技术和服务提供商 ITT VIS(ITT Visual Information Solutions)公司正式发布了 ENVI 4.8。作为快速、便捷、准确地从影像中提取信息的软件解决方案,ENVI 4.8 完全兼容当时的主流 GIS 软件 ArcGIS 10 及 ArcGIS 9.3 版本,并将高级的影像处理与分析工具直接整合到 ArcGIS 产品体系当中,使得用户在进行影像信息提取与 GIS 数据更新时无须进行软件切换。ENVI 4.8 系统软件对 DEM Extraction 模块做了进一步的改善,该模块能够处理航空航天立体影像数据,且能够处理 ASTER、IKONOS、OrbView-3、QuickBird 和 SPOT-1~5 推扫式卫星影像,生成 DEM 等地理信息数据。然而,ENVI 4.8 中的

DEM Extraction 模块仅对单个立体像对进行分析,还没有对多基线立体匹配技术进行集成。

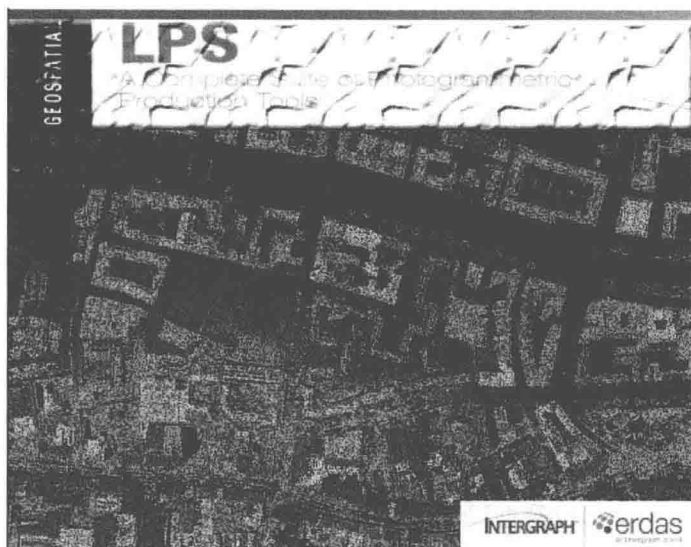


图 1.7 LPS 2012 与 LPS eATE 提取的 DSM

武汉大学开发的数字摄影测量网格(digital photogrammetry grid,DPGrid)系统打破传统的摄影测量流程,集生产、质量检测、管理为一体,合理地安排人、机的工作,充分应用先进的数字影像匹配、高性能并行计算、海量存储与网络通信等技术,实现航空航天遥感数据的自动快速处理和空间信息的快速获取,其性能远远高于当前的数字摄影测量工作站,能够满足三维空间信息快速采集与更新的需要,实现为国民经济各部门与社会各方面提供具有很强现势性的三维空间信息(张祖勋,2007;张剑清等,2008;张祖勋等,2009)。DPGrid 系统由两大部分组成:高性能遥感影像自动处理系统 DPGrid. CORE;基于网络的测图系统 DPGrid. SLM。其中,高性能遥感影像自动处理系统采用了多基线数字影像匹配技术,极大地提高了三维空间信息获取的可靠性与自动化程度。

中国测绘科学研究院研制的高分辨率遥感影像一体化测图系统 PixelGrid 以其先进的数据处理技术、强大的自动化运行能力,实现了卫星影像和航空影像的快速处理,可以利用遥感影像制作数字矢量地图(digital line graph,DLG)、DSM/DEM、DOM 等测绘产品。PixelGrid 是在满足西部测图工程需求的基础上开发的遥感影像一体化测图系统。软件首次采用了基于 RFM(rational function model)通用成像模型的大范围遥感影像稀少及无控制区域网平差、基于多基线 and 多重特征的高精度 DEM/DSM 自动提取,矢量等高线数据半自动采集、高精度影像地图制作与拼接等新技术,有效解决了大面积区域网平差过程中需要考虑的地球曲率改正和

跨投影带问题以及复杂地形条件下 DEM/DSM 的全自动提取,使得边境地区和境外地形图测绘成为可能,同时实现了基于松散耦合并行服务中间件的可运行于高速局域网络的集群分布式并行计算,使得遥感数据的处理能力大大提高。其中,系统的核心技术为线阵影像的摄影测量处理技术和基于多基线、多重特征的自动匹配技术。

此外,由于影像匹配技术的改进与革新,特别是影像匹配的可靠性、成功率、速度与自动化程度的进一步提高,传统数字摄影测量的生产流程发生了较大的变化。以日本东京的 PASCO 公司(主要提供日本国内的航空摄影测量、测绘以及地理信息服务)为例,该公司引进 ISTAR 公司的像素工厂系统后,数字摄影测量系统自动化程度大幅提高,如图 1.8 所示(PASCO & ISTAR, 2007)。图中,由于影像匹配的可靠性与自动化程度的提高,传统数字摄影测量的人工测图与编辑作业逐渐被自动化作业过程取代。

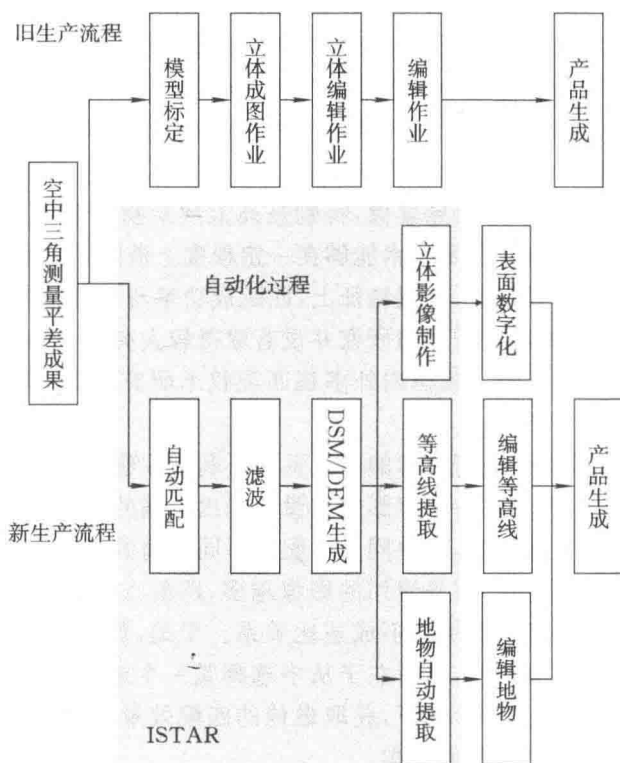


图 1.8 数字摄影测量生产流程的自动化