

近景摄影测量 影像匹配方法 研究与应用

黄祚继 钱海明 张蕊 张曦◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

近景摄影测量 影像匹配方法 研究与应用

黄祚继 钱海明 张蕊 张曦◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书针对近景数码影像中存在弱纹理、遮挡及非线性畸变等问题,以摄影测量与计算机视觉为理论基础,研究了近景影像的稠密匹配算法。主要研究内容包括:分析并评价了影像匹配的基本理论与方法;针对近景影像中仿射畸变和非线性畸变问题,分析影像饱和度及空间结构的非线性变化;针对近景影像中存在的弱纹理、遮挡等问题及传统概率松弛匹配算法存在的不足之处,设计了一套基于局部描述和整体约束的概率松弛匹配算法;以矿山和高边坡的工程影像为实验数据,以近景影像的稀疏匹配点、稠密匹配点云和三维模型评价本文算法的可靠性及可行性。

图书在版编目(CIP)数据

近景摄影测量影像匹配方法研究与应用 / 黄祚继等著. —南京: 河海大学出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-5630-4758-1

I. ①近… II. ①黄… III. ①近景摄影测量—研究 IV. ①P234.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 064041 号

书 名/近景摄影测量影像匹配方法研究与应用

书 号/ISBN 978-7-5630-4758-1

责任编辑/江 娜

装帧设计/黄 煜

出 版/河海大学出版社

地 址/南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话/(025)83737852(总编部) (025)83722833(营销部)

网 址/http://www. hhup. com

经 销/江苏省新华发行集团有限公司

排 版/南京新翰博图文制作有限公司

刷 印/虎彩印艺股份有限公司

开 本/787 毫米×960 毫米 1/16

印 张/9

字 数/172 千字

版 次/2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价/68.00 元

前 言

随着科学技术的进步,遥感空间技术应运而生,同时降低了从二维平面影像提取三维空间信息的难度。近景摄影测量是遥感科学的重要组成部分,也是当今世界具有挑战性和引领性的高科技领域之一。未来20年,我国经济与社会发展将会对遥感科学提出现实又迫切的需求,其中,近景摄影测量技术亦肩负着重要使命,并将迎来重大发展机遇。鉴于摄影方式灵活、限制条件少等优势,三维立体模型已被广泛应用于测绘、遥感、机械制造、航空航天、医学、采矿、结构变形、海洋等领域,具备十分广阔的发展前景。

在影像三维重建过程中,获取高精度、高质量密集点云尤为重要。针对近景影像中存在视点变化、遮挡、非线性变化等畸变,以及匹配点数量少、可靠性较低等匹配难题,本书以摄影测量与计算机视觉为理论基础,以解决近景影像稠密匹配为宗旨,构建一套基于KAZE算法和DAISY描述子的近景影像稠密匹配方法,满足不同行业对于近景影像量测技术的需求,为近景摄影的广泛应用开拓空间。

全书共分为8章。第1章概述了近景影像的匹配现状及展望,由黄祚继撰写;第2章分析了近景摄影的构像畸变及校正方法,由杨海浪、李书群撰写;第3章研究了常用特征点的提取与匹配算法,并对算法性能进行了分析验证,由张曦、孙金彦、董丹丹撰写;第4章研究了近景影像的稀疏匹配算法,提出了抗仿射畸变的KAZE算法,并验证了该方法的优越性,由张蕊、周杰撰写;第5章分析了近景影像的稠密匹配,研究出一套基于DAISY局部描述和概率松弛整体约束的稠密匹配算法,并验证了该方法的可行性,由钱海明、宋强撰写;第6章分析了三维模型重建方法,构建了复杂工况下的三维模型,由张蕊、钱海明撰写;第7章研究了利用复杂工况影像验证算法的可行性和实用性,由钱海明、张蕊撰

写;第8章对近景摄影测量影像匹配方法进行总结和展望,由王春林撰写。

全书统稿和校对由钱海明、张蕊及张曦共同完成,由黄祚继续统稿。

本书在编写过程中,得到了安徽省(水利部淮委)水利科学研究院、河海大学李浩教授、合肥工业大学高飞教授、安徽省大禹水利工程科技有限公司、安徽省引江济淮工程有限责任公司、合肥学院的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

本书适用于从事测绘、计算机视觉等领域的科技人员使用,亦可作为大学、科研院所相关专业人员学习和参考的书籍。

由于编者水平有限,书中难免出现不当之处,敬请读者批评指正。

作者

于2017年2月

目 录

| | |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 近景摄影测量技术 | 1 |
| 1.2 近景影像匹配研究现状 | 4 |
| 1.3 近景影像匹配方法的展望 | 9 |
| 第 2 章 近景摄影的构像畸变 | 12 |
| 2.1 非量测型普通数码相机 | 12 |
| 2.2 影像畸变差模型及畸变校正 | 13 |
| 2.2.1 影像畸变差检校原理 | 13 |
| 2.2.2 近景影像解析处理方法 | 14 |
| 2.2.3 影像畸变差模型及校正 | 18 |
| 第 3 章 特征点提取与匹配算法 | 21 |
| 3.1 匹配基元 | 21 |
| 3.2 常用特征点提取算法 | 23 |
| 3.2.1 Forstner 算子 | 24 |
| 3.2.2 Harris 算子 | 25 |
| 3.2.3 SUSAN 算子 | 27 |
| 3.2.4 MSERs 算子 | 28 |
| 3.2.5 SIFT 算子 | 30 |
| 3.2.6 SURF 算子 | 34 |
| 3.3 影像匹配相似性测度 | 39 |
| 3.3.1 平方差和绝对差 | 39 |
| 3.3.2 相关系数 | 40 |
| 3.3.3 信息论 | 40 |
| 3.3.4 距离测度 | 41 |
| 3.3.5 基于非参数局部变换的测度 | 43 |
| 3.3.6 Birchfield 测度 | 44 |

| | |
|-------------------------|-----------|
| 3.4 影像匹配关键技术 | 46 |
| 3.4.1 影像匹配难点 | 46 |
| 3.4.2 影像匹配约束 | 48 |
| 3.4.3 影像匹配评价标准 | 49 |
| 3.4.4 影像匹配搜索关键技术 | 49 |
| 3.4.5 匹配点误差剔除 | 54 |
| 3.5 算法性能分析 | 55 |
| 第4章 近景影像的稀疏匹配 | 60 |
| 4.1 非线性尺度空间 KAZE 算法 | 60 |
| 4.2 抗仿射畸变的 KAZE 算法 | 63 |
| 4.2.1 近景影像的预处理 | 64 |
| 4.2.2 仿射稳定区域椭圆拟合 | 64 |
| 4.2.3 非线性尺度空间构建 | 66 |
| 4.2.4 非线性特征点检测 | 68 |
| 4.2.5 特征点主方向改进 | 69 |
| 4.2.6 特征描述子计算 | 70 |
| 4.3 算法实验及分析 | 71 |
| 第5章 近景影像的稠密匹配 | 76 |
| 5.1 稠密匹配预处理 | 76 |
| 5.1.1 影像定向参数 | 76 |
| 5.1.2 非水平核线模型 | 79 |
| 5.2 基于局部描述的概率松弛匹配 | 80 |
| 5.2.1 整体约束概率松弛匹配 | 80 |
| 5.2.2 局部描述 DAISY 描述子 | 82 |
| 5.3 改进 DAISY 描述子的概率松弛匹配 | 85 |
| 5.4 算法实验及分析 | 90 |
| 第6章 三维模型重建 | 95 |
| 6.1 DEM 数据来源 | 95 |
| 6.2 DEM 插值算法 | 96 |
| 6.2.1 整体内插方法 | 96 |

| | |
|-------------------------|------------|
| 6.2.2 局部分块内插方法 | 97 |
| 6.2.3 逐点内插方法 | 99 |
| 6.3 DEM 表面建模方法 | 102 |
| 6.4 基于三角网的数字地面模型(TIN)构建 | 104 |
| 6.5 三维模型可视化 | 107 |
| 第7章 复杂工况影像匹配应用实例 | 110 |
| 7.1 基坑无人机影像实例分析 | 110 |
| 7.1.1 测区详解 | 110 |
| 7.1.2 实例成果图 | 110 |
| 7.2 高边坡影像应用实例 | 113 |
| 7.2.1 测区详解 | 113 |
| 7.2.2 实例成果图 | 113 |
| 7.3 水工建筑应用实例 | 115 |
| 7.3.1 测区详解 | 115 |
| 7.3.2 实例成果图 | 116 |
| 第8章 总结与展望 | 118 |
| 8.1 总结 | 118 |
| 8.2 展望 | 119 |
| 参考文献 | 120 |

第 1 章 绪 论

1.1 近景摄影测量技术

摄影测量与遥感是一门以传感器采集地物的空间信息,通过数字方式记录和感知的科学和技术。数字摄影测量以摄影测量、计算机视觉、模式识别、图像处理等学科为理论基础,是以数字来表达空间信息的摄影测量学。将近距离采集目标影像的数字摄影测量视为数字近景摄影测量,简称为近景摄影测量。在国内的工程应用中,近景摄影测量是一种新兴的测量手段,该技术现已被广泛应用于机械制造、航空航天、建筑工程、医学、采矿、结构变形、海洋、粒子运动等领域,具备十分广阔的发展前景。科学技术的发展和更严密的数据处理方法的出现,为近景摄影测量奠定了稳定的理论和技术基础。

近景摄影测量自产生到现在已有数十年的历史,一直处于不断的发展中。自 20 世纪 70 年代以来,国内外摄影测量技术有了很大的提高。1882 年,德国的 Meydenbauer 曾根据两张有一定重叠区域的建筑物影像进行了影像的量测化实验,此次实验被认为是近景摄影测量的首次尝试。王之卓著有《摄影测量原理》一书,该书详细阐述了摄影测量的基本方法和原理,奠定了我国摄影测量的理论基础。李德仁院士在 1982 年提出的粗差定位验后方差选权迭代法,被国际测量界称为“李德仁方法”,该方法比传统的“丹麦法”更为优越;1985 年他提出用包括误差可发现性和可区分性在内的基于两个多维备选假设的扩展的可靠性理论来处理测量误差,科学地“解决了测量学上一个百年未解难题”。该成果获得 1988 年联邦德国摄影测量与遥感学会最佳论文奖和“汉莎航空测量奖”。今天,全世界都在用李德仁的理论去矫正自己的航测平差系统。

数字近景摄影测量自产生到现在大致可以分为五个发展时期:近景摄影测量的萌芽期;成长发展期;全面发展、初有成果期;深入研究及推广应用期;成熟期。数字近景摄影测量的萌芽期处于 1964—1984 年之间,这一阶段为数字近景摄影测

量理论体系的形成奠定了坚实的理论基础,其中包括模板匹配算法、图像处理算法、器件的研究及应用、误差理论与多张像片的同时处理技术等,因此该时期也被称为数字近景摄影测量的婴儿期。成长发展期处于 1984—1988 年之间,在此期间,数字近景摄影测量系统开始出现并有所发展,尽管当时这些系统的实用性很差,但为后期系统模块的设计、研发、高效利用等方面打下了坚实的基础。1986 年 6 月,在加拿大渥太华召开的国际摄影测量与遥感大会(ISPRS)上,数字近景摄影测量成为第五委员会的主题之一。以此为界限,近景摄影测量步入了发展期,许多关于它的研讨会也相继召开。1987 年 6 月在瑞士的 Interlaken 第一次单独召开了以数字摄影测量为主题的国际性会议;1988 年在第 16 届国际摄影测量与遥感大会(ISPRS)上,第五委员会研讨的主题被正式更改为“近景摄影测量与机器视觉”,在此会议上绝大部分文章都是关于数字近景摄影测量的。这一时期近景摄影测量呈现出以下的发展特点:第一,近景摄影测量在国际 ISPRS 大会上正式成为各方研讨的热点和重点;第二,有关近景摄影测量的相关研究出现了大量的新成果和新发现。在全面发展、初有成果期,数字近景摄影测量成为广大测绘研究人员研究的热点,许许多多的研究人员在这个方向上进行探讨和系统研发,大批研究成果的实用性变得更强,并逐渐向全社会推广。数字近景摄影测量的深入研究及推广应用期是处于 1992—1996 年期间,此阶段出现了大量的论文、文献等,此时数字近景摄影测量技术的研究趋于成熟,发展较为稳定。例如,美国光学研究院的 K. Bi Edermam 曾介绍了变形观测全息摄影测量系统;英国的 Rolls Royce 介绍了关于“试验中的汽轮机近景 X 光摄影测量”的论文。此阶段虽然较前几个阶段新成果、新发现较少,但是许多成型近景摄影测量系统成功被研制,并向社会推广应用,使得近景摄影测量系统能够应用于实际生产中。从 1996 年开始,数字近景摄影测量的研究及应用逐渐迈向了成熟期。此时许多摄影测量系统已经能够满足一些领域的应用要求,如对精度要求不高的变形监测;医学领域满足对图像实时性、几何高精度方面的要求,可用于人体测量学、人类行为动作的监控测量;对于古文物(古建筑)的三维立体重建等。这一时期研究的方向是怎样快速、全自动化、高精度和测量结果的深加工(三维重建与虚拟现实)等。激光扫描技术的快速发展,使得多传感器数据采集及数据融合等问题备受关注,从而也使数字近景摄影与计算机视觉的关系越发密切。

近景摄影测量工作早期获取影像采用的是光学量测相机(如 WILD 公司的 P31 陆摄仪)。它是在测图仪上对获取的光学影像进行数据处理,光学量测相机能够获取高精度的影像,但是高精度是和价格相匹配的,昂贵的价格致使一般生产部门无力购买,专业型量测相机需要专业人员进行操作,数据处理过程比较烦琐。

20世纪90年代以后,数码相机的生产制造技术日趋成熟,数码传感器技术、数字摄影技术、图像处理技术以及机器视觉技术发展势头迅猛,自此近景摄影测量逐渐被广泛采用。摄影测量技术除了被传统摄影测量领域的专家学者研究外,计算机视觉领域的研究者也对基于立体像对的三维重建技术进行了大量探索工作,他们研究的目的是使计算机能够具有从二维图像认知三维环境信息的能力,这种能力不仅使计算机能够感知三维环境中物体的几何信息,包括它的形状、位置、姿态、运动等,而且能对它们进行描述、存储、识别与理解。Hartley和Mundy在1993年对摄影测量与计算机视觉进行了比较研究,认为它们主要的应用领域不同:摄影测量中的航空摄影测量主要用于测绘地形图,近景摄影测量主要用于建筑、工业、考古等测量领域,而计算机视觉主要用于目标识别、机器人导航、目标三维建模等领域;但它们在基本理论和应用的诸多方面是一致的。如今,数字近景摄影已经成为快捷、非接触的三维空间信息主要获取方式之一,广泛地应用于各个行业领域。研究内容主要集中在采用非量测相机进行摄影测量的解算方法、近景像对的相对定向和绝对定向方法、定向的自动化、摄影方式的优化、解算的精度和可靠性等方面。

近景摄影测量相较于其他测绘技术存在着诸多优势。第一,该技术可瞬间记录下被测物体的大量几何和物理信息。拍摄的影像或像片能够获取被测物体大量的视觉信息,由于被摄物体上存在着诸多点位信息,因此采用近景摄影测量可以极大地提高测量效率,减少工作量,此外还可由近景影像衍生出各种测量成果。第二,近景摄影测量技术在获取影像时不需接触被摄目标本身,属于非接触式测量,不会破坏物体固有属性,而且当在一些不适宜人类进入的场所(如放射性强、有毒缺氧、噪音环境、水下等)进行测量时,可以采用此技术。由此可见近景摄影测量对于复杂恶劣环境具有很强的适应性。第三,随着科技的进步,摄影仪器生产技术得到提高,计算机视觉领域得到发展,数字近景摄影测量理论也在不断完善和更新,技术手段的提高以及资金投入的扩大促使测量精度大大提升,技术的进步促使资金投入与产出之间的性价比得到大幅度提升。第四,近景摄影测量基于相机曝光的瞬时性,可以量测物体实时运动状态和变化,并记录任意感兴趣物体的实时影像,然后通过影像反演感兴趣的信息,是适于获取较远目标和微观世界信息的量测方法。第五,近景摄影测量亦可瞬间获取大量物体的三维信息,经过近景摄影测量系统处理,可以获取各类空间数据、图形、图像、三维构型以及三维动态序列影像等。

传统的近景摄影测量方法是利用专业的光学量测相机(非数码相机)进行测量,光学量测相机的几何构像精度高,但是价格昂贵且仪器笨重,不利于外业影像采集工作的展开;同时,外业采集影像时,需严格设计摄影基线和交角,步骤烦琐

复杂;内业影像处理时,需专业人员进行目视立体观测,过程烦琐且形式单一,专业技术水平要求高且无法共享数据及产品。随着摄影测量软件及影像数字化的发展,光学影像被转化为数字影像,并被应用到相关摄影测量软件中。但是在光学影像转化为数字影像的过程中,步骤烦琐、复杂,且存在一定的误差,不利于量测精度的提高。

随着普通数码相机(非量测型相机)的研发,影像处理技术正式走上了数码阶段。随着数字摄影测量、计算机视觉等学科的迅速发展,在信息记录与处理、数据存储与管理等方面,数字近景摄影测量技术走上了新的台阶。普通数码相机具有摄影方式灵活、使用起来便捷、价格低廉及受限制条件少等优势,普通数码相机的量测化应用成为数字摄影测量及计算机视觉等领域的研究热点。这类相机包括普通数码单反照相机,这些仪器可任意调焦,摄影角度相对灵活,甚至可以手持使用,轻便且操作灵活,价格远远低于量测型相机,对于生产和研究来说,仪器成本是非常低的。目前,市场上一些价格适中的单反相机的性能已能达到技术要求,这主要得益于近景摄影测量数据处理技术的不断发展。目前对于一般的数码相机来说只需确定其组成结构的内、外方位元素,便可以进行后续的数据处理工作。

计算机技术特别是计算效率的提升以及各种电子设备的发展,使得用于近景摄影测量图像处理设备的性能得到了很大的提升。国际市场上早已出现各种数字近景摄影测量系统,把摄影测量理论与图像处理技术和自动化技术结合起来,不仅大大提高了摄影测量的实时性和自动化程度,更促进了我国传统测量行业的变革,为国民经济建设做出了一定的贡献。近景摄影测量从软件系统和理论层次上来说已经达到了先进水准。

1.2 近景影像匹配研究现状

随着社会的迅速发展,空间三维信息的需求量越来越大,科学技术及生活应用对空间三维信息的提取能力提出了更高的要求,对从二维平面影像提取空间三维信息这一传统难题提出了新的挑战。

目前针对空间三维数据的获取方式有多种,它们各有优缺点。数字摄影测量主要基于摄影测量和数字影像的基本原理,利用普通数码相机获取的数字影像或者航空影像,通过影像匹配获取地面的高程信息、纹理数据等,是三维数据获取的主要方式之一。车载移动测量在3S、机械、电子计算机等技术发展的基础上逐渐兴起,适用于条带状地带的建模,是当今测绘界的前沿科技知识,但其相关技术有

待完善,而且车载移动设备通常价格昂贵,给其发展带来一定的局限性。三维激光扫描技术是利用激光测距原理,以每秒数万乃至百万次的测量速度,快速获取物体表面点的三维坐标值、反射率和纹理等信息;该技术适用于小区域范围内的复杂地物精细建模,其数据获取精度高,但仪器较为昂贵。机载激光扫描适用于大范围三维模型数据获取,它能够获取高精度、高空间分辨率的数字地面模型,进而获取地表物体的垂直结构形态,在三维地理空间信息的数据采集方面具有广阔的发展前景;它能够极大地提高工作效率,加快工作进度,检测并获得可靠的精度,但其成本更高,难以普及应用。

从二维影像提取空间三维信息存在两个方面的难题:其一,立体像对的空间位置解算难题;其二,立体像对同名像点匹配难题。在计算机视觉与数字摄影测量领域,空间位置解算难题已经被完美地解决,同名像点匹配难题则是目前提取空间三维信息的关键与核心所在。同名像点的匹配即为影像匹配,在不同视角、拍摄条件下获取同一监测物体的两幅或多幅影像,并自动或半自动检测同名地物点及特征的过程。若同名像点被正确检测,则构建影像间的几何位置关系,通过空间位置关系反算出监测物体的空间三维坐标,即为影像的真实三维重建。近年来,随着真实三维重建在虚拟现实、文化遗产保护及重建、医学模型构建及三维电子地图等领域中的应用,影像真实三维重建技术成为了广大学者的热门研究方向。

影像真实三维重建技术的关键或基础问题为影像匹配,是影像拼接、三维重建、地物识别等研究领域的关键技术之一。影像匹配精度将直接影响最终产品的质量,该技术最早应用于20世纪70年代的飞行器的辅助导航、导弹系统的目标识别等领域。20世纪末期,该技术已经逐渐应用到各个领域。虽然影像匹配经过多年的研究与发展,技术水平得到了很大的提升,但匹配结果中仍然会有粗差的存在,目前在各个不同领域上还没有一种特定的匹配方法能较好地处理包含不同场景的影像,特别是近景影像更加难以获取大量可靠同名像点。按照匹配类型分为两类:基于全局特征和基于局部特征的匹配算法。基于全局特征的影像匹配可以构建密集视差图,但是算法需迭代计算,运算速度很慢,实时性较差。基于局部特征的影像匹配可以构建稀疏视差图,算法具有简单、直观且计算速度快、精确度高等优点,应用较为广泛。

在影像匹配方面,影像匹配技术是指经过特征点提取、匹配及融合等处理步骤后得到一幅包含完整场景信息的影像的过程,它是一种获取高质量全景影像的有效方法。随着全景影像在虚拟现实和医学图像分析等方面的广泛应用,影像匹配技术成为了数字图像处理和计算机视觉的热点研究问题。而影像匹配主要是根据相邻影像之间重叠部分像素的相似性得以实现,其核心内容是精确求得立体像对

中相似性最大的像素点坐标,因此影像匹配在该技术中占有不可忽视的重要地位。目前已出现了很多研究图像匹配的新算法,其中不少算法是在提取对尺度、旋转及噪音等变化具有较强稳定性的特征后进行匹配,再利用随机采样一致性算法求得变换矩阵,或是利用小波变换的多分辨率方法等,最终实现图像匹配;在影像三维重建方面,从二维影像中获取和恢复所拍摄真实场景中的三维信息一直是摄影测量、图像处理及计算机视觉的核心任务之一,这也是三维重建技术所要解决的重要问题。目前三维重建已广泛应用于物体识别、视觉导航、工业测量、虚拟现实、工程设计等领域。基于影像的三维重建是一种比三维激光扫描更为常用和经济的重建技术,其一般主要包括影像匹配、相机标定和三维重建三个部分,其中影像匹配即建立两幅影像间的对应关系,进而得到相应的视差图像,是三维重建的最关键的问题,也是一个难点。目前在重建过程中没有统一的匹配方法,要根据具体情况和要求而定,主要包括基于特征匹配的三维重建和结合区域匹配与特征匹配的三维重建。在地物检测及识别方面,数字摄影测量的重点是识别和定位物体,地物识别作为图像理解的高层分析部分,应用越来越广泛;而影像匹配是地物识别技术的基础,具有重要的研究价值,因为地物识别方法是在物体模型和影像间寻找对应关系(即匹配),而匹配建立了与现实物体和现象一致的影像数据的理解,最重要的是找到了对物体和影像都适合的表达方式。

张祖勋院士曾提出“在数字摄影测量中是以影像匹配代替传统的人工观测,来达到自动确定同名点的目的”。因此,影像匹配的质量在一定程度上决定了数字近景摄影测量数据后续处理的精度,而匹配的自动化程度则是提高数字近景摄影测量效率的关键。

近景影像匹配能够从两幅或多幅的二维平面影像中解算出对象的三维空间地理信息,一直是计算机视觉、数字图像处理、数字摄影测量等领域的研究热点之一。20世纪70年代中期,美国麻省理工学院(MIT)的David Marr从信息处理的角度出发,结合了图像处理、心理物理学和神经病理学等学科的研究成果,提出了第一个较为完善的视觉系统框架,并将三维视觉定义为“从场景的一幅或者多幅影像,推导出该场景的精确三维几何信息,并定量地确定场景中物体的性质”。它是将一种视觉计算理论应用于双目立体匹配上,使得两幅有视差的影像能够产生具有深度的立体影像,并推导出精确的三维几何信息,其工作被视为影像匹配研究的开始。随后的三十余年间影像匹配技术的使用日益广泛,且拥有了长足的发展,理论体系也日臻成熟。德国的Ackermann教授于1980年提出了最小二乘匹配,该方法充分利用了影像窗口内的信息进行平差计算,使得匹配精度能够达到1/10甚至1/100像素。1982年,Barnard和Fischler第一次系统地总结了三维视觉的研究成

果,主要集中在立体重建的基本原理、算法评价准则和对当时比较流行的算法的评述。武汉大学张祖勋院士于1988年提出跨接法影像匹配。该方法将基于灰度匹配和基于特征匹配相结合,利用特征匹配结果作为增强匹配可靠性的控制手段,再进行较高精度的灰度匹配。随后,U. R. Dhond和J. K. Aggarwal总结了20世纪80年代影像匹配方法,提出了层次处理概念,并使用三目立体约束来降低影像匹配的二义性。20世纪90年代后,立体影像匹配的研究重点开始转向三维重建、摄影测量、数字图像处理等特定领域的应用以及立体匹配中难点问题的针对性研究。

近景影像匹配被视为近景摄影测量和计算机视觉的关键问题,匹配的精度制约着影像拼接、模式识别、三维重建等领域的技术质量。随着科学技术的发展,影像匹配得到了较大的发展,但是匹配结果仍然存在一定程度的误差。在现阶段近景影像匹配算法研究中,尚未存在适应于各种影像(特别是存在较多影像畸变的近景数码影像)的匹配算法。因此,如何采集大量的可靠匹配点及提高匹配精度和可靠性是影像匹配亟待解决的重点和难点问题。

现阶段存在较多的近景影像匹配算法,一般分为基于灰度的影像匹配(简称“灰度匹配”)、基于特征的影像匹配(简称“特征匹配”)和基于理解与解释的影像匹配(简称“解释匹配”)三大类。“灰度匹配”算法相对简单,容易实现。但是算法仅依赖影像的灰度信息,难以克服影像纹理单一、光照变化、大畸变等问题造成的匹配失败。“解释匹配”算法利用影像中的结构与语义描述来检测目标像点及性质,并描述目标间的相互关系,具有极高的理论精度及可靠性。但是该算法受计算机视觉和人工智能等相关领域理论及计算机高速并行运算的限制,尚未得到较好的发展。相比于前两种算法,“特征匹配”算法有效克服了“灰度匹配”算法受影像纹理单一、光照变化、大畸变等问题影响的不足;同时利用影像局部特征代替原始影像,减少了算法处理过程中的数据量。若以适当的匹配搜索策略为辅助,将显著提高算法的匹配速度,能够适用于多种影像的匹配目的。同时,影像匹配的结果被进一步应用到模式识别和三维重建中。因此,基于特征的影像匹配算法已成为国内外学者们的研究热点与重点。

“灰度匹配”算法通过在目标影像中选取一定的子窗口,并在搜索影像中的一定区域内,以某种相似性测度来确定影像的最佳相似区域。算法通常利用局部窗口内所有像素点的灰度信息,过程直观、简单,比较适合纹理丰富的区域,对地形起伏较小或纹理特征丰富的影像具有很强的适应性。算法主要分为三种:灰度相关法、相位相关法及互信息法。灰度相关法对灰度信息进行统计分析,查找相似度最大的值,该方法通常被用于模板匹配和模式识别。将目标影像中的目标区域作为

匹配区域,以目标区域与搜索区域的灰度相似性作为匹配相似性测度,将相似性测度最大的搜索区域作为最佳匹配区域。较为典型的方法有相关系数法、平均平方差法、平均绝对差法、协方差算法等。相位相关法将数字影像从空间域转换成频率域,以频谱的复数计算近似代替目标区域与搜索区域的影像相关计算,实质是灰度相关的深层次描述。该类算法对低频噪声和频域能量变化平稳的影像具有很强的适应性,被广泛用于传感器影像的匹配。互信息法以信息理论为互信息相似性测度,将影像灰度视为空间随机分布的样本,通过灰度统计特征及概率密度函数来评价影像的统计性质。该类算法存在一定的不足之处:以概率密度为评价基础,计算量非常大;受影像间重叠度的限制,导致概率密度函数易出现病态特征及局部极值。

然而“灰度匹配”算法计算像素点邻域内所有的灰度信息,导致计算量很大,计算速度慢,且对噪声的敏感性强。当影像中存在纹理特征单一或深度不连续的现象时,易造成匹配失败,误匹配率高,匹配精度较差。同时存在以下不足之处:第一,鉴于灰度匹配的基础是匹配窗口存在可探测的纹理特征,若影像中存在弱纹理或重复纹理,则出现匹配错误;第二,若匹配窗口内存在视差断裂等问题,则出现匹配错误;第三,灰度匹配算法不适用于光照变化等问题。常用的灰度匹配算法以影像相关算法、匹配相似性测度及最小二乘匹配为主要内容,如序贯相似检测算法、MAD算法、归一化灰度组合相关法(NIC)和归一化互相关灰度匹配算法、归一化积相关匹配法、LSM最小二乘影像匹配、贝叶斯影像匹配、跨接法等。

影像特征是对影像内容抽象的描述,进而把握影像的整体和轮廓,来引导影像的局部特征。影像特征对构像几何畸变和辐射畸变具有较强稳定性,且对影像噪声也存在一定的鲁棒性。鉴于此类优点,影像匹配的研究热点从灰度匹配转移到特征匹配,以影像中的点、线或面为特征的影像匹配即为基于特征的影像匹配。特征匹配算法基于影像中抽象的几何特征或参数化的几何模型,而并非基于影像纹理进行相似度比较,由于影像特征存在不连续性,进而特征匹配算法只能计算出稀疏视差图。

按照影像特征将特征匹配分为点特征匹配、线特征匹配及面特征匹配。基于特征的影像匹配分为三步:第一,提取相应的影像特征;第二,利用相关模型参数描述影像特征;第三,基于某相似性测度对影像特征进行匹配。随着科学技术的飞速发展,研究发现:在影像特征中,点特征相对稳定,对影像尺度、旋转、光照变化等畸变问题具有较强的鲁棒性,且能在减小计算量的基础上,保存影像的灰度信息。因此,基于点特征的影像匹配得到了较为广泛的研究与应用,本书的研究重点也是基于点特征的影像匹配。

1.3 近景影像匹配方法的展望

常用的基于点特征的影像匹配算法有 Moravec 算子、Forstner 算子、Harris 算子、SUSAN 算子、SIFT 算子和 SURF 算子等。其中, SIFT 算子和 Harris 算子的应用较为广泛。SIFT 算子是由 Lowe 于 1999 年首次提出, 于 2004 年完善的尺度不变特征变换算法。算子对影像中存在的尺度变化、旋转、缩放、噪声等畸变问题具有很强的鲁棒性, 且特征点具有丰富的信息量及较强的扩展能力。Mikolajczyk 和 Schmid 对近景影像中经常存在的 6 种畸变问题进行了实验, 通过对十多种描述子的对比分析, 充分验证了 SIFT 点特征的稳定性及鲁棒性。但是 SIFT 算子存在算法复杂度高、内存消耗过大等问题, 限制了 SIFT 算子的广泛应用。

研究发现, 基于点特征的影像匹配对影像的畸变问题具有较强的灵活性与适应性, 有利于影像中物体的识别及三维重建。但是该类算法仍然存在一定的不足之处: ①特征匹配算法不适用于深度变化大的近景影像; ②鉴于影像中存在着很多的畸变问题, 相同目标地物不一定能被正确提取或描述; ③缺少适应性强的匹配算法, 尚未研究出适用于任意特征的匹配算法。同时, 受限于以上诸多问题, 匹配成功的特征点数目仅仅是总特征点数的小部分, 其余的特征点存在很大的浪费, 不利于后续真三维模型的精细化仿真。

由于特征匹配存在得到的匹配点数较少的问题, 因此匹配点的密集程度较低。而解释匹配算法依据匹配点集, 利用相关信息及约束条件对特征点进行描述, 针对性地筛选特征点, 将满足要求的特征点作为匹配点。现阶段常用的条件约束有几何约束和拓扑约束, 然而仅仅依靠此类约束条件, 无法满足高匹配精度的要求, 仅能作为识别及判断的依据。旨在提高影像匹配的精度、密集程度及可靠性, 学者们将灰度匹配与特征匹配组合使用, 研究出一系列影像匹配算法: 动态规划影像匹配、神经网络影像匹配、松弛法影像匹配、多点最小二乘匹配、基于影像分割的边缘约束匹配以及自适应三角形约束的影像匹配等。此类方法以计算机为模型框架, 构建真实物体与平面影像之间的空间关系, 通过影像特征将物体与影像统一在相同的架构中, 并建立相关的影像节点, 借助于语义、框架理论及图论等先验知识, 完善影像匹配中存在的问题。但是此算法复杂程度高, 迭代计算量大, 且框架结构与节点之间存在不完全描述关系, 缺乏有效的评判点集相似性程度的手段, 导致此类方法尚未有突破性的进展。

三维的场景在被投影为二维的图像时, 存在深度和不可见部分信息的丢失, 直