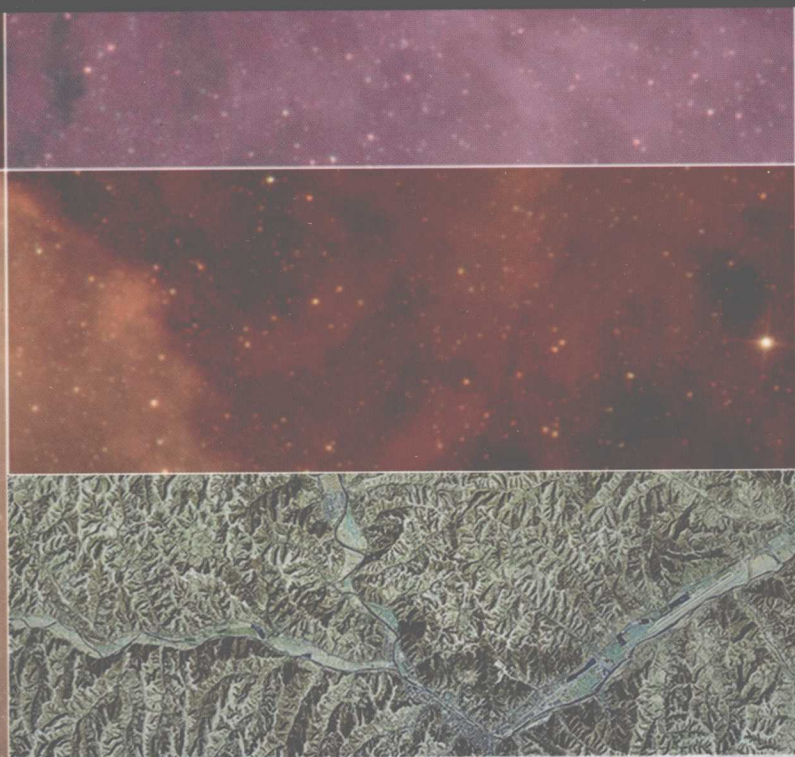


摄像测量学原理与应用研究

Videometrics: Principles and Researches

于起峰 尚 洋 著



科学出版社

www.sciencep.com

摄像测量学原理与应用研究

Videometrics: Principles and Researches

于起峰 尚 洋 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

摄像测量学是近十几年来国际上迅速发展起来的新兴交叉学科,主要是由传统的摄影测量学、光学测量与现代的计算机视觉和数字图像处理分析等学科交叉、融合,取各学科的优势和长处而形成的,具有高精度、非接触、动态测量等诸多优点.本书在系统介绍、凝练摄像测量学基本原理和方法的基础上,着重围绕作者所在研究组二十多年来的教学科研实践,系统总结了摄像测量学的经典和前沿理论、方法,以及作者所提出的一系列新方法、新技术和最新应用成果.

本书可作为摄影测量、光学测量、计算机视觉、精密仪器等专业研究生或高年级本科生的教材,也可供从事相关领域工作的科研和工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

摄像测量学原理与应用研究 = Videometrics: Principles and Researches/
于起峰,尚洋著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024189-4

I. 摄… II. ①于… ②尚… III. 摄影测量法—研究 IV. P23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 029563 号

责任编辑:鄢德平 张 静 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 3 月第一次印刷 印张: 18 3/4

印数: 1—2 500 字数: 358 000

定价: 66.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前言

1. 摄像测量学的内涵和发展历史

1) 摄像测量学的内涵

摄像测量学 (Videometrics 或 Videogrammetry) 是近十几年来国际上迅速发展起来的新兴交叉学科. 它主要是由传统的摄影测量学 (Photogrammetry)、光学测量 (Optical Measurement) 与现代时尚的计算机视觉 (Computer Vision) 和数字图像处理分析 (Digital Image Processing and Analysis) 等学科交叉、融合, 取各学科的优势和长处而形成的^[1~6]. 它的处理对象以数字 (视频) 序列图像为主.

摄像测量学是研究利用摄像机、照相机等对动态、静态景物或物体进行拍摄得到序列或单帧数字图像, 再应用数字图像处理分析等技术结合各种目标三维信息的求解和分析算法, 对目标结构参数或运动参数进行测量和估计的理论和技術. 国内外许多人也把摄像测量的技术方法称为光学测量或简称光测.

摄像测量学的内涵主要包括两个方面: 一是物体的空间三维特性与成像系统间的成像投影关系, 即二维图像与对应三维空间物体之间的关系, 这主要是测量学方面的知识; 二是从单幅和多幅图像中高精度自动提取、匹配图像目标, 这主要是计算机视觉、图像分析方面的知识. 随着摄影测量的三角测量理论和计算机视觉的多视几何理论的日趋发展成熟, 目前摄像测量的研究越来越多地涉及第二个方面, 即图像目标的自动、高精度识别定位与匹配上. 它与常规图像处理的不同在于更注重于目标的提取定位精度.

将三维空间中的景物成像到二维图像上是一个退化过程, 摄像测量学研究如何通过分析二维图像来重建目标的三维信息. 为了进行二维、三维定量测量, 摄像测量必须将图像与成像系统及其参数紧密联系起来, 而普通的图像处理一般与成像系统参数无关. 因此, 摄像系统的高精度标定是摄像测量的重要特点. 传统摄影测量涉及的大多是专业的摄影测量型相机, 通常具有专门的标定设备和方法. 而摄像测量大多采用的是普通的摄像机、照相机, 经过多种不同的标定方法, 可以使非测量型摄像机、照相机达到测量的要求, 用于高精度测量.

2) 摄像测量学的发展历史

摄影测量学、光学测量和计算机视觉是摄像测量学的重要根基.

自从 1839 摄影术诞生起, 就开始了用照片进行各种测量的应用与研究. 围绕

着提高精度这一测量中的永恒主题,摄影测量学经过模拟摄影测量、解析摄影测量阶段,现在已进入数字摄影测量阶段,有非常完备的高精度测量的理论和方法体系。由于传统摄影测量要求的硬件设备繁杂、昂贵,测量算法复杂、计算量大,摄影测量学的研究和应用主要集中在国家、军事和大结构层面上,特别是航空摄影测量和卫星照片测量,并且这种航测和卫测已形成了庞大的测绘产业;而在普通民用领域的中近景摄影测量开展的却少得多。

光学测量既有广义的含义,也有较狭义的含义。利用各种波段的光,包括可见光、红外光、紫外光进行各种测量的方法技术都可以称为光测,它主要是与雷测、遥测、卫测等其他不同质类型的测量相区别。摄影测量、摄像测量、计算机视觉测量等都可以归入光测大类。而在狭义上,光学工程专业中常将各种利用光学专用设备、技术进行的测量,如经纬仪、各种透镜、棱镜、平行光管、各种干涉技术、激光技术等进行的测量称为光测,光测强调精度。在光学工程、光测实验力学等学科中,将通过光学图像进行的测量称为光测图像技术。

计算机视觉(或称机器视觉)作为一门学科成形于20世纪80年代,至今仍可以说是一门新兴学科。计算机视觉以及与之紧密相关的数字图像处理、图像分析、图像理解等现代学科是信息时代信息科学的重要代表。计算机视觉自形成以来从其基本理论、算法到相关的硬件,特别是应用上都得到了迅猛的发展,有了许多成熟、成功的应用。计算机视觉领域大多数是以目标识别、图像理解以及显示、监控等应用为主,有丰富的图像处理、分析算法,具有简单、灵活、快速、适应性强等特点,但通常对于测量精度的要求不高。

在学科发展的历史中,摄影测量学主要在地学测绘领域中发展,是地理学科的重要分支;光学测量则是在光学工程、实验力学等学科中发展;而计算机视觉、机器人视觉、图像处理分析等主要是在计算机科学、人工智能领域中发展。三者的形成和发展相对独立,早期交流较少,在所采用的理论方法、面向的应用对象和研究人员归属等许多方面都有较大的区别,形成了各自的特点、优势和理论体系。

国际摄影测量与遥感协会给摄影测量与遥感的定义为:“利用非接触成像传感器和其他传感器系统,通过记录、量测、分析和表达等处理来获取地球及其环境,以及其他物体的可靠信息的科学、技术和工艺”^[7]。光测的内涵是利用各种光学手段实现测量目的,其中占很大比重的是利用光学图像进行测量。而计算机视觉的内涵是:“试图用像机获取环境图像并转换成数字信号,用计算机实现对视觉信息处理的全过程”,“从信息处理的层次研究视觉信息的认知过程,研究视觉信息处理的理论、表达与计算方法”^[8]。

对于上述多学科交叉融合形成的摄像测量学,测绘界称其为 Videogrammetry,而光学工程和计算机视觉界称其 Videometrics。根据含义侧重不同,国内还有学者称其为视频测量学或视觉测量^[9]。事实上,这些学科大方向都是通过图像来定量观

察和认识客观世界, 其研究任务在本质上是—致的。

随着学科的发展以及各种观察和测量任务的不断涌现, 摄影测量、光学测量和计算机视觉等领域的研究人员越来越深刻地了解和体会到相互借鉴、融合的必要性和重要性, 三个领域研究人员的交流越来越密切。特别是近十几年来, 无论是摄影测量领域的会议还是光学工程、计算机视觉中的有关测量、三维重建等的分会议上, 通常都有另两个领域的人员参加, 并都占有很大的比例。近年来多数相关的国际会议都有意安排会议的主席、副主席分别由不同领域的人员交叉担任, 以促进这种交流和融合。

作为这种交流的自然结果, 国际光电工程协会 (SPIE) 于 1993 年在美国硅谷召开的 Photonics West 年会上第一次设立了 Videometrics 分会场, 并在其后每年或每两年召开一次 Videometrics 分会议。

正是由于摄影测量、光学测量与计算机视觉测量在本质上并无严格的区别和界限, 因而三者能够很好地融合。只是传统的摄影测量学更强调精度, 偏重于航测、卫测等传统的遥感和测绘领域; 光学测量偏重于中近景测量; 而计算机视觉更偏重于数字图像处理、图像分析、图像理解、多视图几何等方面。Videometrics 在体现三者—in理论、方法、算法以及应用方面的互通和互补的基础上, 更加强调动态测量和实时测量。我们推荐采用“摄像测量学”作为 Videometrics 这一交叉学科的中文命名。

2. 摄像测量学的应用领域

摄像测量涵盖了摄影测量、光学测量和计算机视觉等三个学科领域, 因此它的应用范围也应覆盖着三个学科的应用领域。由于具有诸多的优点, 摄像测量技术已经广泛应用于各种精密测量和运动测量, 涉及航空航天、国防试验、勘察勘测、交通运输、建筑施工、体育运动等各个领域^[10,11], 例如, 零部件加工质量检测、三维表面重建、工业反求工程、建筑工程测量、铁路公路质量检测、飞行器弹道姿态等运动参数测量等等。

摄像测量的一个重要特征是已进入了动态实时测量时代。实时摄像测量的实现为摄像测量学开辟了广阔的、新的研究和应用领域, 例如, 实时监测、视觉导航、工业质量实时检测和监控等。

目前国际上在许多应用领域中已有很多摄像测量方面的商品化产品。摄影测量学的发源地德国在这方面仍处于领先的地位。例如, 在对轿车三维外形进行高精度检测时, 他们的做法是在轿车的表面贴上大量的合作标志, 然后用普通数码相机随意从四周拍摄轿车的十几至几十幅图像, 通过自动地对这些图像进行处理分析, 包括识别、提取合作标志、重建三维结构、优化处理结果等步骤, 可以现场得到整

车的三维外形数据, 精度达到 $0.02\sim 0.05\text{mm}$. 还有诸如商用化的摄像测量产品已从多点测量发展到任意形状的管道等连续形状的测量; 利用结构光技术可以快速、高精度地测量复杂外形的表面形状等.

3. 摄像测量学的优势和发展前景

1) 高精度、非接触是摄像测量的首要特征

摄像测量通过分析目标图像实现测量目的, 属于非接触测量, 因而不会对目标的结构特性和运动特性带来任何干扰, 测量结果客观、可视、可信.

精度是测量中的永恒主题, 摄像测量学方法及其应用系统具有场(面)目标测量精度高的优点. 除了完备的光束法平差保证了三维解算的高精度, 数字图像分析中各种亚像素方法也使得目标的图像定位精度能够达到十分之一甚至百分之一像素的量级, 有效保证了测量结果的精度.

正是由于摄像测量高精度的特点, 在武器靶场试验等许多应用中常将摄像测量(在这些场合通常称为“光测”)作为标校雷测等其他测量设备的手段.

2) 运动和动态测量是摄像测量的重要优势

对于时间序列图像, 摄像测量除了对单幅图进行分析定位, 通常还将考虑运动约束, 对物体进行运动参数测量, 既测量得到物体对象的静态三维信息, 也能够测量物体对象在时空中的变化(运动、变形)信息. 这是摄像测量的最重要优势特点之一, 也是与传统摄影测量的主要区别之一.

由于时间序列图像多提供了一维时间轴信息, 比静态图像处理方法有许多优势, 可使得传统方法中一些困难的问题迎刃而解. 例如, 在传统静态处理中, 对两幅有较大立体视差的图像, 由于图像特征与背景可能有较大变化, 同名点配准的可靠性较低. 而对序列图像, 可以通过特征点跟踪锁定的方法实现同名点配准, 可靠性得到极大的提高.

3) 实时测量是摄像测量的重要发展趋势

随着计算机硬件的飞速发展, 特别是各类 DSP、FPGA 等小型处理器的发展, 以及各种先进的图像处理、分析算法软件的大量涌现和人工智能技术的发展, 使得许多摄像测量学任务可以实时或准实时完成. 摄像测量已进入了实时处理时代, 实时测量的可能与实现为摄像测量学开辟了新的广阔的研究和应用领域, 例如, 实时监测、监控、各种飞行器、车辆等运动平台的视觉导航等.

4) 易于普及更拓宽了摄像测量的发展前景

随着摄像机、计算机等的成本降低和性能提高, 使得这些硬件迅速普及, 尤其

是摄像测量所使用的一次传感器是摄像机和照相机,已得到迅速普及,几乎已经人手一台(手机相机、DC、DV等)。加之摄像测量具有实施简易、适用面广等特点,使得摄像测量技术正在从航天、国防等高端应用向普通民用领域扩展,并必将迎来更大的发展普及。

5) 摄像测量学的技术特点和发展现状

摄像测量学研究从三维场景退化、投影得到的二维图像中恢复、重构出失去的场景三维信息的问题。这是一个不适定的反问题,通常不具有唯一解。三维场景投影到二维图像的过程,不可避免地存在成像系统的投影模型误差、光强转换误差、噪声等影响因素。在对同一场景图像信息的处理和提取中,通常可以有多种方法、算法;而一种图像处理的算法通常只针对该类图像有效,没有一种万能的、普适的图像处理方法和系统。这就造成了一种测量对象,需要研究对应的、特定的方法、算法和系统,除非对不同应用对象提炼出同类的处理对象,例如,对不同类的对象有同类的特征点,或贴上相同的合作标志等。

这种问题的多样性、复杂性,决定了对问题处理的多样性。对同一问题的处理,不同的人得到不同的结果甚至不同的结论。因此摄像测量学与图像处理分析类似,更多地是一门技术和应用学科。摄像测量学的发展进步需要高素质研究者们大量的艰苦劳动。

2008年7月在北京召开的第21届国际摄影测量与遥感大会(The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing)上,国际摄影测量与遥感协会中与摄像测量密切相关的摄影测量、计算机视觉和图像分析工作组的组长、波恩大学的W. Forstner教授对近景摄影测量学技术的发展现状有一个总结,也反映了摄像测量学的发展现状和水平。这里简要引用他的总结:图像校正问题已经解决;摄像系统内外参数标定已基本解决;三维建模问题正在被解决;建议摄影测量工作者更多地与计算机视觉、模式识别方面的研究成果相结合,多参加这方面的会议,例如:International Congress on Computer Vision (ICCV)和Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)等。这说明与三维测量相关的成像几何关系问题已得到了较成熟地发展,而对图像目标的识别、提取和匹配问题是摄像测量技术发展的重点。

4. 关于本书

作者所在的国防科技大学航天与材料工程学院精密光测图像技术研究中心,长期从事基于图像的精密测量与运动测量的研究工作,已有20多年历史。以摄像机和测量物体对象是否运动来划分测量模式,我们早期主要进行光测实验力学的微小

变形测量、应变、应力测量研究,主要采用光学干涉技术,研究干涉条纹图的处理方法.这部分内容属于像机和测量对象都相对固定的静态测量模式.从20世纪90年代开始,我们重点进行国防试验靶场的基于光测经纬仪、摄像机图像测量运动目标的轨迹、姿态、速度等的运动学测量.这属于像机定点而目标运动的模式.近年来飞行器视觉导航方法和技术是我们的主要研究方向.这部分内容属于像机运动而物体对象固定的模式,或者是像机、物体对象两者都运动的模式.在这些研究中我们取得了一系列学术与应用成果.

本书在较系统地介绍、凝练摄像测量学的基本原理和方法的基础上,着重围绕作者所在课题组20多年来的科研实践,特别是近十年的科研成果展开论述.除了摄像测量学的经典和前沿理论、方法,还系统总结了作者所提出的一系列新方法、新技术和最新应用成果,包括像机参数标定的系列新方法,单像机测量目标位置姿态参数的系列新方法,像机参数在轨修正及抗扰动测量目标运动参数的新方法,目标匹配、识别和跟踪的系列新方法,飞行器视觉导航系列新方法及其应用,单目运动差交会测量新方法及其应用,折线光路像机链摄像测量新方法及其应用,干涉合成孔径雷达(InSAR)和电子散斑(ESPI)条纹图分析的系列新方法,航天和武器试验等任务中的摄像测量综合应用实例等.并且结合了课题组承担的“飞行器光测图像技术”硕士生课程和“光测图像技术专题”博士生课程的教学内容.在摄像测量学的基础原理部分,在作者《基于图像的精密测量与运动测量》(科学出版,2002年)一书部分内容的基础上进行了大量的增改.

本书各章节主要内容安排如下:

全书共分为12章.前两章介绍了摄像测量学的基本知识,包括数字图像的特性、摄像测量硬件方面的知识、常用成像模型和光束法平差、空间交会测量算法的基本原理.第3章介绍了摄像测量系统标定的原理和方法.第4章介绍了高精度提取图像特征的亚像素定位方法原理.第5章介绍了目标识别、匹配、跟踪以及数据平滑滤波的基本原理和方法.第6章和第7章分别介绍了目标位置姿态参数和表面形状结构参数的测量方法.第8章介绍了飞行器视觉导航中图像匹配测速测向、着陆引导和交会对接相对运动测量的方法和技术.第9章介绍了应用于大型结构变形测量、像机扰动修正等的折线光路像机链测量的原理和方法.第10章介绍了基于运动平台单目运动差交会测量目标运动参数的方法.第11章介绍了用于InSAR和ESPI条纹图分析的系列滤波方法和CCI算法.第12章介绍了摄像测量学在武器试验、载人航天等方面的应用实例.

国内涉及摄影测量和计算机视觉方面的文献很多,但明确介绍摄像测量的文献很少.我国在这方面的研究工作,尤其是工程、产品化方面的工作还很不够.在国际有关摄像测量的产品博览会上,各种相关产品林林总总,但是具有中国自主知识产权的应用产品却相对甚少.而这类以软件为主的应用型产品本应是我国科技

人员的强项. *Vision System Design* 杂志的编辑专门有文分析, “视觉产品展览中中国人在哪里?”, 中国的 “应用型终端产品很少”. 可见研发具有中国自主知识产权的摄像测量应用产品是我国摄像测量界的重要任务, 亟需广大科技人员的智慧和努力.

希望本书的出版能够为我国相关领域的科技工作者深入了解摄像测量学, 促进中国摄像测量学的研究和推广, 推进自主创新, 发展出有中国自主知识产权的摄像测量方面的理论、实用化科技成果和产品尽到绵薄之力.

本书内容是作者所在课题组研究成果的总结, 是集体智慧的结晶, 凝聚着课题组全体老师和学生的心血. 其中, 孙祥一副教授在三维姿态测量与试验研究方面, 张小虎副研究员在靶场目标运动学测量方法与系统方面, 雷志辉副教授在飞行器视觉导航技术的研究发展方面, 伏思华博士和杨夏博士在干涉条纹图处理分析方法研究方面, 都做了创新工作和重要贡献. 李立春博士生参加了本书第 7 章的编写, 朱宪伟、张恒、姜广文、晁志超、傅丹、张小苗、周剑、徐一丹、周翔、刘晓春、李强等博士生、硕士生参加了本书部分创新成果的研究工作. 曹动先生对图像硬件知识给予了指导. SPIE 美国摄像测量工作组主席 James Walton 博士、德国慕尼黑国防军大学的 Helmut Mayer 教授和 Juergen Peipe 先生对本书工作提出了非常有益的建议. 在此向他们致以由衷谢意!

本书的多项研究工作得到国家自然科学基金和国家 “863” 计划的资助, 在这里一并表示感谢!

由于作者水平所限, 书中难免存在纰漏及不当之处, 敬请读者不吝指教!

参 考 文 献

- [1] Legac A. Videogrammetry or digital photogrammetry: General remarks, methodology, applications[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2350: 16-21.
- [2] Jensen S C, Rudin L. Measure: An interactive tool for accurate forensic photo/videogrammetry[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2567: 73-83.
- [3] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [4] McGlone J. Manual of photogrammetry[M]. Annapolis: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- [5] 张祖勋. 数字摄影测量 30 年 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [6] Forsyth D A, Ponce J. Computer vision: A modern approach[M]. London: Prentice Hall, 2003.
- [7] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [8] 马颂德, 张正友. 计算机视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

- [9] 张广军. 视觉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] 尚洋, 李立春, 雷志辉等. 摄像测量技术在国防试验与航天器对接中的应用研究 [J]. 实验力学, 2005, 20(增刊): 91-94.

目 录

前言

第 1 章 数字图像与摄像测量硬件基础	1
1.1 数字图像的基本特性	1
1.2 数字图像硬件系统简介	5
1.3 摄像系统硬件常用参数术语	10
1.4 摄像测量系统分辨率	13
1.5 影响测量精度的几个主要因素	16
参考文献	20
第 2 章 摄像测量学基本原理和算法	22
2.1 摄像测量常用成像模型	22
2.2 二维平面摄像测量	34
2.3 空间点目标三维位置交会测量	36
2.4 光束法平差	39
2.5 空间直线和解析曲线测量法	45
参考文献	51
第 3 章 摄像测量系统标定	53
3.1 像机标定方法概述	53
3.2 基于控制点进行像机标定	55
3.3 基于控制直线的像机标定方法	61
3.4 基于光束法平差优化和约束条件的像机标定	65
3.5 二维图像畸变的标定与修正	69
3.6 像机安装参数标定方法	71
参考文献	77
第 4 章 图像目标亚像素定位技术	81
4.1 亚像素定位原理和算法设计原则	81
4.2 矩方法	84
4.3 拟合法	88
4.4 数字相关亚像素定位法	96
4.5 定位算法性能评价仿真图的制作	108
4.6 亚像素定位技术在面内转角测量中的应用实例	114

参考文献	117
第 5 章 图像序列运动目标检测与跟踪	119
5.1 运动目标检测的数字减影法	120
5.2 特征标志的自动识别跟踪	124
5.3 基于模板匹配的目标识别跟踪技术	127
5.4 Mean Shift 跟踪算法	131
5.5 基于光流的运动检测	135
5.6 目标运动轨迹预测与多目标跟踪	141
5.7 数据平滑与速度、加速度计算	148
参考文献	151
第 6 章 体目标三维位置姿态参数测量	153
6.1 PNP 问题	153
6.2 定制结构目标位置姿态测量	156
6.3 基于轮廓匹配测量目标位置姿态	162
6.4 目标位置姿态参数的双目交会测量	164
参考文献	167
第 7 章 目标表面三维结构和形状测量	169
7.1 基于多视图几何约束的图像特征点匹配	169
7.2 从未标定图像序列重建目标表面三维结构基本原理	175
7.3 从像机内参数已知的两视图测量目标表面三维结构	180
7.4 摄像测量问题求解的全局优化方法	182
7.5 结构光三维测量法	185
参考文献	193
第 8 章 飞行器视觉导航方法与技术	195
8.1 基于序列图像和测高数据的飞行器自测速方法	196
8.2 基于序列图像与基准图匹配的飞行器定位测速测向方法	200
8.3 机载飞行器视觉着陆引导方法与技术	204
8.4 地基飞行器视觉着陆引导方法与技术	208
8.5 基于机载序列图像三维地形重建的地形匹配定位导航方法	212
8.6 航天器自主交会对接视觉引导方法与技术	218
参考文献	222
第 9 章 折线光路像机链摄像测量原理与应用	225
9.1 折线光路像机链摄像测量的背景和意义	225
9.2 折线光路像机链摄像测量原理	227

9.3 折线光路摄像测量的实现与精度分析	232
9.4 折线光路像机链摄像测量的应用与验证试验	234
参考文献	237
第 10 章 测量点目标运动参数的单目运动轨迹交会法	239
10.1 单目运动轨迹交会法的基本原理	240
10.2 轨迹参数空间搜索法	241
10.3 平移交会法	242
10.4 单目三维运动轨迹交会法	244
10.5 验证实验	250
参考文献	252
第 11 章 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图 处理方法	253
11.1 系列旋滤波、等值线窗口滤波理论与方法	253
11.2 ESPI 和 InSAR 数据处理中的系列等值线相关干涉法 (CCI 法)	258
参考文献	265
第 12 章 摄像测量学应用实例	267
12.1 数字式光测图像自动分析判读系统	267
12.2 火箭待发段箭体倾倒角度实时测量图像分系统	271
12.3 “神舟六号”航天员舱内三维运动单目摄像测量	272
12.4 “华南虎”照片的摄像测量研究	276
12.5 多目标运动参数的高速摄像测量	279
12.6 机翼动态变形摄像测量	282
参考文献	284

第1章 数字图像与摄像测量硬件基础

1.1 数字图像的基本特性

数字图像是摄像测量的基本信息载体,采集记录并处理测量对象的数字图像或数字图像序列,从而识别、提取、匹配、跟踪并精确定位对象目标及其特征等,是摄像测量的关键环节之一.因此,了解、掌握和灵活运用数字图像的基本特性,是学习、掌握和使用摄像测量知识技术的基础.随着对摄像测量的深入学习研究,会越来越多涉及有关数字图像处理、图像分析、图像理解等专门课程知识的研究.本书假设读者已经学习掌握了数字图像处理分析的有关知识.鉴于数字图像知识是摄像测量的基础并考虑到本书的完整性,本节简要介绍摄像测量关注的一些数字图像基本特性.

1.1.1 图像及图像的数字化

图像是对客观世界的一种相似性的生动模仿或描述,通常说的图像是指能为视觉系统或成像传感器所感知的客观世界物体的信息描述形式.图像实质上是客观世界反射或透射的某种能量辐射的空间分布被眼睛或成像传感器记录下来的内容,能够在一定程度上反映物体的某些特性.对于人眼,这种能量形式就是可见光,而对于各种不同的成像传感器,这种能量形式则还可能是红外光(热红外图像)、X射线(CT图像)、超声波(B超图像)以及微波(微波雷达图像)等.

图像所记录的内容与辐射源的强度、波长以及物体的反射、透射能力有关.物体 p 在时刻 t 的成像:

$$I(p, t) = I\{i(p, t), r(p, t), \lambda(p, t)\} \quad (1.1.1)$$

其中, $i(p, t)$ 是反映辐射源强度的入射函数, $r(p, t)$ 是反映客体反射、透射能力的反射函数, $\lambda(p, t)$ 是辐射源的波长函数.这些因素共同决定了图像的主要度量特征:光强度及色彩的时间和空间分布.精密测量应用中通常采用光强图像,又称为灰度图像或黑白图像.一个二维光强函数可由照射和反射模型来描述

$$I(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (1.1.2)$$

即 (x, y) 处的光强由反映环境光强这一外部因素的入射函数 $i(x, y)$ 和反映景物内在特性的反射函数 $r(x, y)$ 共同确定^[1,2].而如果辐射源 $i(x, y)$ 来自对象内部,则上述 $r(x, y)$ 就代表景物的透射特性.

为了运用各种数学工具、数学算法来处理和分折图像,需要用数学函数来描述一幅图像. 由于计算机和数字成像设备的离散特性,需将上述自然界的连续光强图像进行离散化,并用离散数学函数进行描述,这就是数字图像. 数字化包括两个过程:对图像空间离散化为像素点和对图像光强值离散化为像素灰度.

如图 1.1.1, 利用一定的数字成像设备, 将连续函数 $f(x, y)$ 在空间上按一定方式离散划分为若干小区域 $(x_i, y_i) (i=0, \dots, M-1; j=0, \dots, N-1)$, 每一个小区域称为图像元素 (picture element, Pixel), 简称为像素或像点, 其中 M 和 N 是图像分别在 x 和 y 两方向的像素个数. 在实际成像系统中, 每个像素点对应传感器芯片上的一个像元.

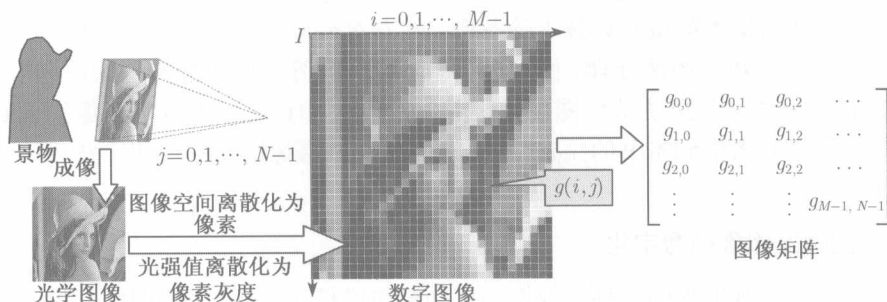


图 1.1.1 对连续光强图像离散化得到数字图像

为了描述数字图像, 需要将像素的光强灰度离散量化为有限个级别. 一般对像素灰度采取均匀量化, 即将图像灰度范围分成 G 个等间隔, G 为灰度的分割级数或量化级数, 称为灰度分辨率. 为了计算机存储方便, 灰度级数通常用二进制的位数 k (比特数) 来表示, 即 $G=2^k$. k 常取的值有 8、10 和 16, 对应于 256、1024 和 65536 个灰度级数.

经过离散后的数字图像从数学形式上看, 就是一个 $M \times N$ 的矩阵. 该数学矩阵元素排列的位置 (i, j) , 代表对应像素点在图像上的空间位置, 矩阵中元素数值 g 对应于像素点的灰度值. 将 $g(i, j)$ 用相应的亮度显示在屏幕上, 就得到与自然界图像相似的光强图像. 用二维矩阵表示数字图像后, 任何可对数学矩阵进行的加、减、乘、除、微分、积分等的数学运算也可以对数字图像进行.

1.1.2 数字图像的基本特性

与摄像测量有关的数字图像的特性主要有:

1) 数字图像是在几何位置和光强分布上对光学图像的离散化, 同光学图像一样在几何位置和光强分布上与自然界景象存在一定的相似性, 是对景象这些方面特性的一种形象描述. 其中景象的几何位置与图像近似成中心投影关系; 景象光强与

图像灰度级近似成正比关系。

2) 光学图像中景物的灰度分布是连续的。这是由于光照和同一客体本身的反射、透射特性具有一定的连续性,同时光学成像过程具有低通滤波作用,会使图像变模糊,使得景象中原本呈阶跃状的边界部分也会呈现平滑过渡。因而离散化光学图像得到的数字图像中,景物灰度变化一般会通过多级“阶梯”逐步过渡,如图 1.1.2 表示。再如纯黑背景下的纯白亮点,成像后会成为灰度呈高斯分布的亮点。数字图像的这一特性是拟合法边缘定位等目标定位提取算法的依据(第 6 章将具体介绍这些算法)。

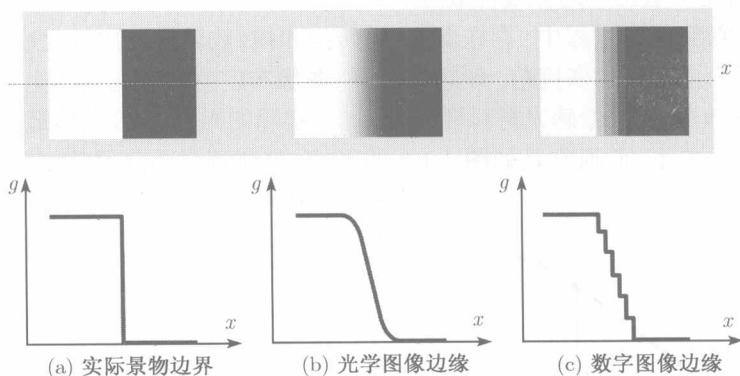


图 1.1.2 实际景物、光学图像、数字图像的边缘灰度分布

3) 数字图像的数学表示是一数字矩阵,因此对数学矩阵的各种数学运算都能够用于数字图像。这些运算包括矩阵的加、减、乘、除、微分、卷积、数学变换以及各种局域运算、分析等等。不同的运算代表着不同的物理意义,根据处理要达到的目的可以设计出相应的算法。

4) 数字图像的采样重建特性^[1,3]

数字图像是用有限的离散像素点来描述实际的连续景物。对于离散的数字图像能够在多大程度上反映实际景象空间分布信息的问题,著名的奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理给出了数字图像采样间隔,即像素空间尺度 Δx 、 Δy ,与图像所能反映的空间特征的最小细节或最高频率之间的定量关系。

奈奎斯特采样定理指出,如果连续信号的最高频谱为 ω_M ,则采样间隔小于 $1/2\omega_M$ 时,能够从离散的采样点完全恢复原信号。成像过程有低通滤波的作用,会滤除实际景象中的高频部分。因而成像信号的最高频率,等于实际场景包含的最高频率与成像系统调制传递函数 (MTF) 的截止频率两者中的小值。设成像信号 $f(x, y)$ 在对应图像水平和垂直方向的最高频率分别为 u_c 和 v_c ,则根据奈奎斯特采样定理,要求采样间隔 Δx 和 Δy 满足下式的关系,就可以由离散的数字图像来重建 $f(x, y)$ 。