



测绘科技应用丛书



车载移动测量系统检校理论与方法

Calibration Theory and Methods for Vehicle-borne Mobile Surveying System

韩友美 杨伯钢 著



测绘出版社

014057803

U463.67

17

测绘科技应用丛书

车载移动测量系统检校 理论与方法

Calibration Theory and Methods for Vehicle-borne
Mobile Surveying System

韩友美 杨伯钢 著



测绘出版社

· 北京 ·



北航

C1742486

U463.67
17

© 韩友美 杨伯钢 2014

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

本书系统分析了当前车载移动测量系统的结构、原理,探讨了激光扫描仪和数码相机的检校理论和方法,对惯性测量单元 IMU 和系统综合检校理论给出了概述和具体的检校方案。主要内容包括车载三维激光扫描仪的单机检校理论、线阵数码相机的检校理论、惯性测量单元的精度检测、车载移动测量系统的综合检校以及检校后的激光扫描数据与线阵相机数据的融合方法。本书以国产移动测量系统为例,对以上内容做了详细论述,是一部对车载移动测量技术进行检校研究较为完备的理论与方法著作。

本书可供从事测绘、计算机可视化、人工智能、图形图像解译、仪器学等专业的科研、生产、开发人员阅读,也可供大专院校相关专业的高年级本科生、研究生以及教师参考、学习。

图书在版编目(CIP)数据

车载移动测量系统检校理论与方法/韩友美, 杨伯钢
著. —北京: 测绘出版社, 2014.6
(测绘科技应用丛书)
ISBN 978-7-5030-3351-3

I. ①车… II. ①韩… ②杨… III. ①汽车—测量系
统一系统校验—研究 IV. ①U463.67

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 318750 号

责任编辑	沈万君	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻 迅
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)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	三河市世纪兴源印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	8			字 数	160 千字		
版 次	2014 年 6 月第 1 版			印 次	2014 年 6 月第 1 次印刷		
印 数	0001-1500			定 价	24.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3351-3/P·703

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

车载移动测量系统 (vehicle-borne mobile surveying system, VMSS) 是一种快速移动获取三维信息的系统, 该类系统集成有激光扫描仪、线阵(面阵) CCD 相机、全球定位系统(global positioning system, GPS)、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、里程计等传感器。自 20 世纪 70 年代起, VMSS 广泛地应用于数字城市、环境监测、城市规划、文物保护、城市三维建模、工程测量等多个领域。

近年来, 随着测绘科技的发展, 三维信息获取对 VMSS 的精度提出了更高的要求。VMSS 整个系统的精度问题取决于单个传感器的精度和系统的综合检校精度。本书对我国自主研发的车载移动测量系统 SSW 集成标定之前的核心传感器激光扫描仪、线阵 CCD 相机、IMU 的单机检校和系统综合检校进行了系统的研究, 研究内容主要包括以下几点。

(1) 激光扫描仪检校。分析和比较 VMSS 采用的激光扫描仪特性, 剖析影响其测量精度的关键因素, 设计并制作检校标靶用于检校; 从影响激光扫描仪三维坐标精度的角度出发, 以国产 RA-360 系列激光扫描仪为例, 验证了该类仪器锥扫角的存在, 并设计相应的动态和静态方案对其进行测量, 从而能够消除锥扫角对激光扫描仪距离和角度测量的影响; 对 RA-360 系列激光扫描仪的测角精度进行深入的研究, 建立了一套激光扫描仪角度检校模型, 并根据现有条件提出两种测角误差检校方法, 通过实验验证这两种方法的检校精度; 对脉冲式激光扫描仪的测距原理进行剖析, 建立 RA-360 系列激光扫描仪的测距误差检校模型, 首次将反射强度纳入测距检校模型中, 设计相应的实验, 解求出相关参数, 并验证其精度。

(2) 线阵相机检校。设计并实现车载移动测量系统的平行性绑定结构, 推导其在垂直工位和倾斜工位下的实现公式; 基于平行性绑定结构, 提出一种新的线阵相机标定思想, 建立线阵相机标定模型, 设计实验, 求出标定模型参数, 并对结果进行精度评定。

(3) 惯性测量单元 IMU 的检测。从 IMU 的测量原理出发, 给出 IMU 的检测内容, 针对每一项检测内容给出检测方法。

(4) 系统综合检校。阐述综合检校的原理, 设计综合检校作业流程, 通过实验数据展示综合检校前后点云精度的变化。

(5) 激光扫描数据与线阵相机影像数据的融合。在车载移动测量系统数据融合研究方面, 基于设计的平行性绑定结构, 提出利用激光扫描仪数据与线阵相机影像数据相融合的方法, 得到彩色激光点云数据, 为后期点云数据处理、分类、建模和

测图奠定基础;将车载移动测量系统应用于实际生产,得到相关的实验精度数据和经验,通过实例验证了系统的精度。

本书细致地剖析了影响车载激光扫描仪精度的因素,据此建立起激光扫描仪角度测量误差和距离测量误差的检校模型,设计相应的方案解求出模型参数,对检校结果进行精度评定。设计了激光扫描仪和线阵相机的平行性绑定结构,并在此基础上提出了一种新的线阵相机检校的方法,建立起相应的线阵相机检校模型,设计出相关实验方案求解模型参数并进行精度评定。概要叙述了IMU检测的内容和方法,研究了综合检校的原理和方法,给出了车载移动测量系统综合检校的流程,最后通过平行性绑定结构实现了激光扫描仪和线阵相机影像的物理方法融合。

本书是在韩友美博士论文研究的基础上进行深化研究取得的成果,是韩友美在博士后期间与导师杨伯钢教授在车载移动测量系统检校技术方面研究的部分成果。本书的完成离不开中国工程院院士刘先林研究员和山东科技大学卢秀山教授的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!另外还要感谢中国测绘科学研究院王留召老师、首都师范大学钟若飞老师对本书实验数据的指导,感谢北京市测绘设计研究院领导和同事对本书写作的大力支持。

本书的出版得到了北京市科学技术协会青年科技人才基金、城市空间信息工程北京市重点实验室基金以及北京市博士后工作经费的资助,在此感谢北京市科学技术协会、北京测绘学会、北京市人力资源和社会保障局的支持和帮助。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处或错误,恳请广大读者批评指正。

作者

2013年10月

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 车载移动测量系统检校技术	1
§ 1.2 车载移动测量系统检校的意义	8
§ 1.3 本书的主要内容	8
第 2 章 车载移动测量系统 SSW	11
§ 2.1 SSW 的构架设计	11
§ 2.2 车载激光扫描仪原理	14
§ 2.3 线阵 CCD 相机的工作原理	20
第 3 章 车载激光扫描仪的检校原理与方法	25
§ 3.1 激光扫描仪检校内容及检校标靶的制作	25
§ 3.2 激光扫描仪技术指标的测定	29
§ 3.3 激光扫描仪测角误差检校	35
§ 3.4 激光扫描仪测距误差检校	47
§ 3.5 激光时间同步误差检校	60
第 4 章 线阵 CCD 相机的检校原理与方法	61
§ 4.1 线阵相机的检校内容	61
§ 4.2 线阵相机与激光扫描仪的平行性构架设计	61
§ 4.3 线阵相机的检校原理与检校模型的建立	68
§ 4.4 线阵相机检校实验设计与数据处理	72
第 5 章 惯性测量单元的检测	75
§ 5.1 测量原理及检测内容	75
§ 5.2 初始姿态精度检测	77
§ 5.3 跟踪姿态精度检测	79
§ 5.4 漂移精度检测	81

第 6 章	系统综合检校	84
§ 6.1	综合检校的内容	84
§ 6.2	综合检校的原理	85
§ 6.3	综合检校的实施	85
第 7 章	激光数据与线阵影像的融合	89
§ 7.1	点云与线阵影像的融合原理	89
§ 7.2	可行性探讨及融合前的时空同步	90
§ 7.3	融合前的数据预处理	92
§ 7.4	融合流程设计	92
§ 7.5	融合结果及其分析	93
§ 7.6	融合数据的应用实例	95
第 8 章	结束语	103
§ 8.1	本书的主要工作	103
§ 8.2	本书的突出贡献	103
§ 8.3	展 望	104
附录	点云工作站 DY-1/DY-2	105
参考文献		113

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	The calibration technology of VMSS	1
§ 1.2	The significant of VMSS calibration	8
§ 1.3	The main contents of this book	8
Chapter 2	The vehicle-borne mobile surveying system: SSW	11
§ 2.1	The construction of the SSW	11
§ 2.2	The principle of the vehicle-borne laser scanner	14
§ 2.3	The working principle of the line-scan CCD	20
Chapter 3	The calibration principle and methods of laser scanner	25
§ 3.1	The laser scanner calibration contents and the calibration targets design	25
§ 3.2	The determination of the laser scanner specifications	29
§ 3.3	The principle of the angle error calibration	35
§ 3.4	The principle of range error calibration	47
§ 3.5	The time error synchronized calibration	60
Chapter 4	The principle and methods on calibration of line-scan camera	61
§ 4.1	The calibration contents of the line-scan camera	61
§ 4.2	The parallel structrue design of the line-scan camera and the laser scanner	61
§ 4.3	The principle and the model construction for line-scan camera calibration	68
§ 4.4	The test desgin and data processing for line-scan camera calibration	72
Chapter 5	Testing of the inertial measurement unit	75
§ 5.1	The testing principle and contents	75
§ 5.2	The testing of the initial postrue	77

§ 5.3	The testing of the tracking accuracy	79
§ 5.4	The testing of the drifting accuracy	81
Chapter 6	System integrated calibration	84
§ 6.1	The contents of the system integrated calibration	84
§ 6.2	The principle of the system integrated calibration	85
§ 6.3	The impliment of the system integrated calibration	85
Chapter 7	The data fusion of laser scanner data and line-scan images	89
§ 7.1	The principle of the data fusion between laser scanner and line-scan camera	89
§ 7.2	The feasibility and the pre-fusion spatio-temporal synchronize	90
§ 7.3	The pre-processing of the laser data and the line-scan images ...	92
§ 7.4	The fusion flow design	92
§ 7.5	The analasis of the fusion results	93
§ 7.6	The application of the fusion data	95
Chapter 8	Conclusions and prospects	103
§ 8.1	Main conclusions	103
§ 8.2	Main contributions	103
§ 8.2	Prospects	104
Appendix	Point cloud workstation DY-1/DY-2	105
References		113

第1章 绪 论

§ 1.1 车载移动测量系统检校技术

随着信息技术研究的深入及数字地球、数字城市、虚拟现实等技术的进一步发展,尤其是当今以计算机技术为依托的信息时代脚步的加快,人们对空间三维信息的需求更加迫切^[1]。与此同时,三维信息获取手段也得到了一定程度的发展。目前,城市空间三维信息获取技术中最为引人注目的一项技术便是车载移动测量技术(vehicle-borne mobile surveying technology, VMST)。

车载移动测量的核心技术之一是三维激光扫描技术,也称为激光雷达技术(light detection and ranging, LiDAR),是从20世纪中后期逐步发展起来的一种主动式光电探测技术^[2,3]。车载移动测量系统具有高精度、高分辨率、操作方便、实时、可在夜间测量、作业效率高、成图周期短、能进行连续和动态测量等一系列优点,它的出现和发展为空间三维信息的获取提供了全新的技术手段,为信息数字化快速发展提供了必要的条件。它使三维数据从人工单点数据获取向着连续获取的方向迈进,不仅提高了观测精度和速度,而且使数据获取更加智能化和自动化,被称为测绘技术的一场革命^[4]。车载移动测量系统之所以能够生产具有真彩色纹理信息的三维模型,与数码相机技术的发展息息相关。数码相机有线阵和面阵之分,其中线阵相机具有采集频率高、视角宽的优点,克服了面阵数码相机不能及时存储影像以及存在影像漏洞的缺点,在快速三维信息数据获取中逐步得到了应用^[5]。随着全球定位系统(GPS)和惯性测量单元(IMU)高精度姿态确定等定位定姿技术的发展,人们得以将激光雷达、数码相机等高精度定位定姿传感器安置在地面移动载体上,从而组成了较为完备的车载移动测量系统^[6],造就了一种新型三维信息获取集成型技术系统,并在国际测量界引起广泛的关注。对于城市及特定区域的三维建模而言,车载移动测量系统比传统的机载三维信息获取系统更适合城市立面几何信息和纹理信息的采集,而且前者精度较高。即使如此,与日益增长的高精度三维信息需求相比,车载移动测量系统的精度和稳定性仍有待于进一步的改进。

20世纪90年代以来,在世界范围内涌现出众多车载移动测量系统。国外有很多国家开展了车载移动测量系统及其相关技术的研究,也有一些阶段性成果推出,典型的代表有:日本东京大学的VLMS(vehicle-borne laser mapping system)系统^[7,8],主要采用激光扫描仪和面阵彩色CCD相机、线阵相机等设备,采用的

Sick 激光扫描仪最远测距 80 m;加拿大的车载三维激光测量系统 LYNX(山猫)^[9],该系统集成了两台激光扫描仪和两台面阵相机,激光扫描仪最远测距 100 m 或 200 m,目前该设备主要用于城市三维建模和高速路改扩建测绘;加拿大卡尔加里大学和 GEOFIT 公司研制的 VISAT(video inertial and satellite GPS)^[10,11],该系统集成了视频相机和定位定姿传感器,采用的是摄影测量原理,没有采用激光扫描仪设备;英国 3DLM 公司和德国 IGI 公司联合推出的商业化移动测图系统 Street Mapper^[12],集成了 2~3 台瑞格(Riegl)LMS 激光扫描仪,每台扫描仪视角为 80°,最远测距为 150 m,同时还配有两台视频相机以及 GPS、IMU 定位定姿设备,综合测点精度达到厘米级,测程可达 300 m,扫描频率高达 200 kHz,目前已有将其用于建立三维隧道模型的案例^[13];日本拓普康(Topcon)公司推出了 IP-S2 移动测量系统,该系统集成了两台激光扫描仪,一台全景相机和相应的定位定姿传感器^[14,15],目前该设备用于街景三维数据采集。

国内很多高校、研究所及公司也在车载移动测量系统研发方面做了大量的相关研究,产品主要有武汉大学研发的 WUMMS(Wuhan University mobile mapping system)^[16],武汉立得空间信息技术发展有限公司的 LD-2000TM^[17,18],山东科技大学、武汉大学、中国测绘科学研究院和同济大学共同研发的 3Dsurs(3D surveying system)^[19,20],首都师范大学和中国测绘科学研究院联合研发的 MSMP(SSW 的雏形)^[21-23],南京师范大学和武汉大学合作研发的 3DRMS(3D road mapping system)^[24]。各类车载移动测量系统的外观如图 1-1 所示。尽管这些国内系统最初研发的方向及定位不一,但有一个共性,即大多车载移动测量系统主要集成激光扫描仪和数码相机作为三维数据获取传感器,且这两种传感器目前主要依赖进口,其中的关键技术,特别是与精度息息相关的检校技术还未公开。

综上所述,车载移动测量系统在国内已经成为三维信息获取的主流设备,国内相关研究机构也积累了一定的研究经验和成果,但是系统的精度问题仍然是制约推广和应用的瓶颈,因此对车载移动测量系统的需求很大一部分还依赖于进口。对于引进的车载移动测量系统的研究主要集中在数据后处理部分,且对这类系统的精度问题较多关注的是集成后的精度。由于进口仪器技术的保密限制,国内对单个传感器的检校以及系统的综合检校尚缺乏足够的认识和实践。

比较国内外车载移动测量系统的研究现状,可以看出,国内虽然也有车载三维信息采集系统这方面的研究,但相关技术还处在探索阶段,相对比较薄弱。国外技术相对比较先进,很多产品已经成熟,可投入生产,但是价格昂贵,高精度的产品也不供出口。要缓解我国城市三维建模及相关领域的应用需求,我国必须致力于进一步研发具有自主知识产权的三维移动测量系统,同时要特别注重提高国产化系统的精度。综合分析目前国外车载测量系统的发展情况^[25-28]发现,国外有些产品的成果和研究经验对于我国开发具有自主知识产权的车载移动测量系统具有借鉴

意义,但有些技术对我国还不够透明,其中就包括激光扫描仪的检校技术。因此,我们需要打破国际技术垄断与封锁,继续不断地探索和创新,特别是随着精细测量的推进,人们对测量精度的要求越来越高,除了要对高精度定位定姿传感器进行应用研究,对车载移动测量系统的主要传感器——激光扫描仪检校技术的研究也值得关注。在我国,激光扫描仪的生产商往往不太了解测量工作者的需求,因而对该类仪器设备的检校技术缺乏认知,这就需要我们自主地对激光扫描仪的检校技术进行研究。



图 1-1 国内外较为流行的车载移动测量系统

随着三维可视化浪潮的推进,原来的黑白激光三维点云已不能满足视觉的需求,迫切需要得到更加丰富的点云信息。车载移动测量系统 SSW 在国内首次采用先进的线阵数码相机作为纹理采集传感器,在使用之前对线阵相机进行高精度检校,然后将点云信息与影像信息相融合,即可得到信息更加丰富的彩色点云。另外,线阵相机的检校技术较面阵相机复杂得多,也需要进行相关检校的深入研究。

为了使国产化的车载移动测量系统能满足较高的精度需求,本书开展了车载移动测量系统核心传感器——国产激光扫描仪 RA-360 的检校技术研究以及线阵相机检校研究,同时对国产 IMU 和系统的综合检校技术进行了探索,在此基础上设计了车载移动测量系统激光扫描仪与线阵相机的平行性绑定结构,利用这种特

殊的结构,通过数据处理,初步实现了将数码相机的图像信息与激光三维信息的融合,得到了较高精度的彩色三维点云,成果达到国际水平。

1.1.1 车载激光扫描仪检校技术研究

激光扫描仪用于测量最初仅仅搭载在卫星和飞机上,原因在于这种仪器要么在近距离内没有数据返回,要么对人眼有伤害^[29,30],且视角比较窄(约 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$)。另外以激光扫描仪为核心传感器的测量系统在地面作业时会受到树木和建筑物等障碍物的遮挡,导致定位传感器的信号失锁,从而严重影响系统精度。近年来,随着激光技术的进步,激光对人眼的伤害风险大大降低,仪器的视角也有了很大的改进, 360° 视角的激光扫描仪在世界范围内陆续问世,GPS、INS以及里程计组合导航技术也有了很大的突破,激光扫描仪系统在地面的应用终于成为可能。

激光扫描仪根据搭载平台的不同,大致可分为航空激光扫描仪(air-borne laser scanner, ALS)和地面激光扫描仪(terrestrial laser scanner, TLS)两种。其中地面激光扫描仪根据搭载平台的不同状态,细分为固定式和移动式两种^[31]。固定式激光扫描仪类似于全站仪,扫描过程中,仪器必须固定在某一基站上^[32,33];移动式激光扫描仪可以搭载在移动平台上,借助GPS和IMU进行定位,在移动过程中获取三维数据,车载平台就是其中最为盛行的一种^[34,35]。

高精度激光扫描仪的生产在国内尚不多见,这方面的需求主要依赖于进口,这是阻碍我国对激光扫描仪性能进行进一步研究的一个重要因素。激光扫描仪作为地面移动测量系统的核心设备之一,在测量原理、仪器结构等方面较经纬仪和全站仪更为复杂,精度测试工作国内无全面的先例可循,某种程度上制约了它在测量方面的广泛应用。激光扫描仪的检校问题也是影响整个车载移动测量系统精度提高的一个因素。众所周知,国外进口激光扫描仪设备的重要信息往往是个黑匣子,测量工作者只能借助国外提供的几个简单方法对进口设备进行检校,更没有明确的激光扫描技术指标作参考。因此,国内测量工作者需要自主开展激光扫描仪检校技术的全面研究。

目前,我国引进的固定式三维激光扫描仪设备主要有徕卡的HDS3000^[36,37]、天宝的GS200^[38]等。移动式激光扫描仪有LYNX附带的 360° 视角激光扫描仪,Street Mapper 360附带的瑞格(Riegl)VQ-250的 360° 视角激光扫描仪,拓普康IP-S2使用的Sick LMS 291-S05和LMS 291-S14。这些设备在引进之前就被商家检校过,因此国内工作者没有机会参与该类激光扫描仪的检校工作,只能参与系统综合精度的验证研究。对引进的固定式激光扫描仪检校所做的相关研究的学者主要有同济大学的刘春博士^[39]、郑德华博士^[40,41]、谢瑞博士,他们探讨了徕卡公司的静态激光扫描仪HDS3000的检校问题,利用徕卡自带的检校标靶对HDS3000的角度和距离进行了检校,设计相关实验验证了该设备的技术指标;北京建筑工程学

院的罗德安博士对地面激光扫描仪的精度影响因素进行了定性分析^[42,43],给出了单点位测量数据的精度估算模型。国内研发的车载移动测量系统单独引进的激光扫描仪主要是施克(Sick)和瑞格的产品,设备的检校工作一般由厂商完成,具体的检校技术对我国测量工作者保密。

综合而言,国内关于激光扫描仪的检校研究停留在国外提供的几个简单方法上,显然不够深入和全面。

国外关于三维激光扫描仪的检校研究较早的学者是德国人 W. Boehler^[44],他在 2003 年从工程应用的角度探讨了选择地面激光扫描仪(TLS)时各项参数的意义,也对多种国外较为常见的 TLS 做了相关实验,并给出了定性的分析。2004 年德国学者 A. Rietdorf 利用平面标靶(见图 1-2)对自己设计的低精度 TLS 进行了检校,给出了 TLS 常见的误差概念^[45]。对激光扫描仪进行检校和定量分析工作做得比较多的人是加拿大卡尔加里大学的 D. D. Lichti,不过他对相位式地面三维激光扫描仪 faro 所做的实验结果表明,其所建立的检校模型的参数解尚不够稳定,仍需要不断地加以实验和改进^[46-54]。

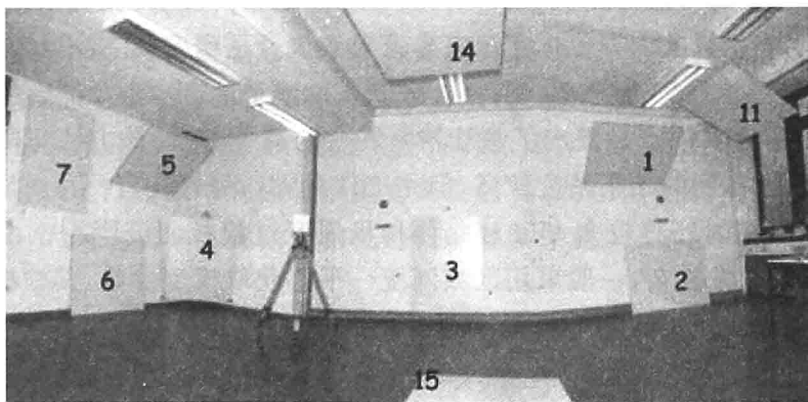


图 1-2 A. Rietdorf 制作的平面标靶

本书在前人对激光扫描仪设备进行检校研究的基础上,对我国自主研发的车载式 RA-360 系列激光扫描仪的检校进行了深入研究,系统地提出了该类型设备需要检校的内容。另外,由于激光的不可见性给检校工作带来了困扰,本书为此设计了检校需要的几种特制标靶。在详细分析激光扫描仪原理的基础上建立了检校模型,设计并实现了检校方案,解算出了相关的模型参数,实现了对 RA-360 系列 360°激光扫描仪的检校,使其在测量方面更能发挥优势。本书建立的模型以及相应的实验方案可为同类仪器的检校工作提供参考。

1.1.2 线阵相机检校技术研究现状

数字摄影测量时代首要的数据采集传感器就是 CCD 相机,CCD 相机有面阵

和线阵之分。面阵 CCD 的优点是可以获取二维图像信息,测量图像直观;缺点是像元总数多,而每行的像元数一般较线阵少,帧幅率受到限制。线阵 CCD 的优点是一维像元数可以做成很多,而总像元数较面阵 CCD 相机少,而且像元尺寸比较灵活,帧幅数高,特别适用于一维动态目标的测量。由于线阵相机具有采集频率高、视角宽等优点,故能及时存储影像且无影像漏洞,因此在快速三维信息数据获取方面开始得到应用。

无论是线阵还是面阵 CCD 相机,都是非量测性相机,如用于测量,就必须对其进行检校,得到镜头的精确主点位置和畸变参数。常见的传统面阵 CCD 相机的检校方法包括:空间后方交会法^[55]、直接线性变换法^[56]、基于多像灭点法^[57]、解析铅垂线以及自检校法^[58]等,这些方法依赖于不同位置获取的相同目标的影像,借助共线方程计算相机的内外方位元素及畸变参数。线阵相机的线阵特性需要为其探索新的检校方式,目前对线阵相机的检校方法大多是将线阵相机固定位置不动,通过调整特制标靶的位置进行检校,目标离相机的距离比较近,因此测得的精度较低。

三线阵相机与单线阵相机(本书所指的线阵相机即单线阵相机)的工作原理类似,关于三线阵相机的内方位标定已有专家对其展开了研究,主要有国内的刘金国研究员^[59]、吴国栋研究员^[60]等,国外学者 T. Chen(陈天恩)等人也给出了类似的思想^[61]。他们的共同点是提出了基于精密转台的测量方法,该方法每隔一个角度采集一次数据,得到的结果精度较高,但是工作量大。另外还有一种全景线阵相机(见图 1-3),只在国外有较多专家对此种相机展开过检校研究^[62-67]。由于全景线阵相机的模型非常复杂,一般采用区域网统一平差获取模型参数,其检校思想难以用于单线阵相机的检校。

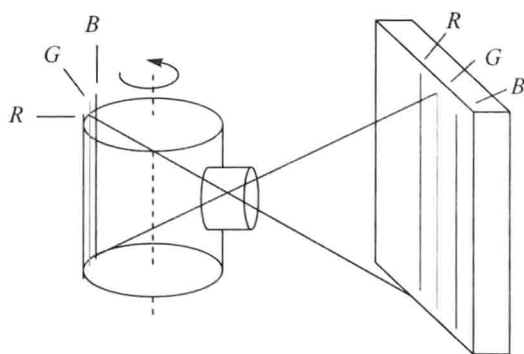


图 1-3 全景线阵相机的采集原理

关于线阵相机的检校,国外典型的代表是 1993 年 R. Horaud 等人^[68]设计的一组直线组成的图形标靶,可用于检校线阵 CCD 相机的外方位元素(见图 1-4)。

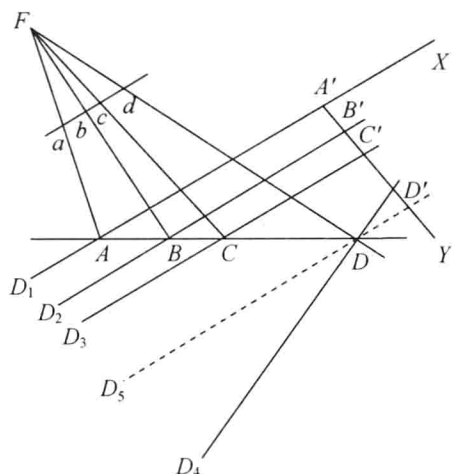


图 1-4 由 R. Horaud 设计的标靶线

国内首都师范大学的学者也做了类似的实验^[69,70] (见图 1-5)。2008 年,北京信息科技大学的学者还发明了由多条等间距竖线和两条平行横线组成的线阵 CCD 标定标靶^[71]。天津大学的学者提出的两步法线阵标定技术^[72]也基于类似原理。这些做法的共同特点是通过制作特殊线标靶,分析标靶上的特征线在线阵影像中的分布,确定标靶与相机的相对位置关系,进而标定相机方位元素。如果将标靶放在较远位置(相机成像的无穷远)进行测试,则标靶只能在 CCD 上很小的范围内成像,要在 CCD 边缘得到标靶影像则需要将标靶设计得很大,这是非常困难和不现实的。因此这几种方案标定相机的精度难以保证。

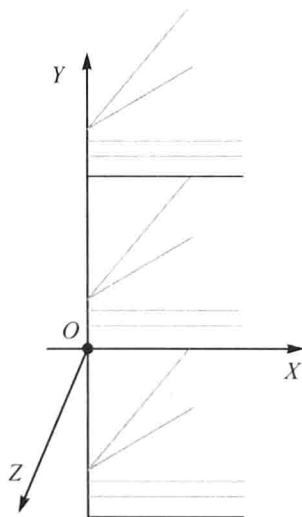


图 1-5 由首都师范大学设计的标靶线

单线阵相机由于其影像宽度只有一个像元,不便于在影像上找到地物点,所以

它的检校是一个复杂的问题;另外,车载移动测量系统 SSW 中线阵 CCD 相机应用的短焦镜头也增加了检校程序的复杂性。本书将重点研究线阵相机的检校问题,并建立相应的检校模型,求解出线阵相机的内方位元素和镜头畸变。

§ 1.2 车载移动测量系统检校的意义

现代测量仪器的国产化一直是国内业界人士努力的目标。国产车载移动测量系统 SSW 的硬件集成技术正在研究中,在经历初期的组合导航研究之后^[73-76],整个系统内部传感器的检校理论与方法的研究成为保证车载移动测量系统高精度和高稳定性的关键,对我国自主研发高精度车载移动测量系统具有重要的理论意义和实际应用价值。

激光扫描仪的制造者通常对测绘仪器应用方面的要求知之甚少,为了进一步发掘这一新技术在测绘领域的应用潜力,需要投入人力物力去评价这类仪器的特性和数据获取质量,特别是对这类仪器的误差来源进行研究,并采取有效措施进行检校,形成成熟的三维激光扫描仪检校理论体系,对今后我国生产测绘行业可直接应用的高精度激光扫描仪具有重要的意义。

车载移动测量系统 SSW 采用线阵相机作为纹理信息传感器,在我国尚为鲜见;国内对线阵数码相机的检校理论体系还不完善,检校方法也不成熟。本书对这方面的研究将有利于该类传感器在测绘领域中的应用,也有利于国产车载移动测量系统激光点云数据与数码相机影像数据融合方法的进步。

惯性测量单元(IMU)是我国自主生产的高精度导航设备,对 IMU 的检校进行研究,能让测绘工作者更好地了解该类仪器的特点,有助于车载移动测量系统多传感器的集成化。系统的综合检校是生产高精度车载移动测量系统的重中之重,综合检校与单机检校理论共同构成整个车载移动测量系统的检校技术理论体系。

车载移动测量系统检校理论与方法的研究,助力于我国自主知识产权车载移动测量系统的研究,也可为国内外车载移动测量系统的系统检校研究作参照。

§ 1.3 本书的主要内容

本书在系统总结和阐述常见的几种车载式激光扫描仪特性的基础上,以国产 RA-360 的 360°视角激光扫描仪为例,详细剖析了该类激光扫描仪的测量原理和重要组成结构,找到影响其精度的几个重要因素,并由此建立了激光扫描仪的检校模型,首次将反射强度对距离的影响纳入检校模型中,设计了切实可行的标定方案,解算出模型参数,对这些影响因素进行消除以达到标定的目的;设计并实现了一种高效合理的车载多传感器集成方式——平行性绑定结构;建立了线阵相机标