

基于全站仪与普通数码相机的大 型物体三维形貌测量方法的研究

Research on Three-dimensional Measurement of Large-scale
Objects Based on Total Station and Common Digital Camera

杨谢柳 梁文峰 方素平 / 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

基于全站仪与普通数码相机的 大型物体三维形貌测量方法的研究

杨谢柳 梁文峰 方素平 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于全站仪与普通数码相机的大型物体三维形貌测量
方法的研究 / 杨谢柳, 梁文峰, 方素平著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2019.5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4447 - 5

I. ①基… II. ①杨… ②梁… ③方… III. ①计算机
视觉—三维数值模拟—测量方法—研究 IV. ①TP302.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 098434 号

书 名 基于全站仪与普通数码相机的大型物体三维形貌测量方法的研究

著 者 杨谢柳 梁文峰 方素平

责任编辑 章 毅 何晓惠

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83883937 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> **E-mail:** cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 **印张** 8.25 **字数** 158 千字

版次印次 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价 33.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

三维形状测量在反求工程、精密机械制造、安全监测等领域至关重要。目前,常规尺寸的三维形状测量方法已较为完善,但由于大型物体尺寸过大难以触及、不易或不可移动、通常在光照不可控的室外进行测量等特点,较难实现高精度测量。此外,在要求保持真实性的文物数字化等应用领域,必须同时获取物体的三维形状和颜色数据,即实现物体三维“形貌”的测量。本书将采用全站仪与普通数码相机相结合的方法实现大型物体三维形貌的高精度测量。

为实现大型物体整体三维形貌的测量,通常需要在远距离处使用长焦距镜头对其进行拍摄。长焦距镜头的使用必然会减小相机的视场角、增大成像参数间的耦合程度,此时,对所有相机成像参数同时进行优化求解时将经常出现方程奇异无法求解或参数计算结果精度较低的情况。本书对图像的透视变形进行了详细分解,从透视变形的角度深入探讨了相机视场角变小导致相机标定情况恶化的根本原因,并定量分析了参数标定精度随相机视场角变化的规律。

由于坐标已知的控制点可为相机成像参数标定提供更多的约束,因此,本书也将使用已知控制点进行系统参数标定,为此,需要选择控制点的类型。由于圆形特征的易检测性及其中心定位的噪声不敏感性,常选用圆形特征作为控制点。但使用圆形控制点时,由于不正确对应关系的建立往往会引入两种偏心误差,即透视偏心误差与畸变偏心误差。鉴于当前畸变偏心误差补偿方法的不足,本书提出在控制点几何参数已知的相机标定中,使用采样点估计变形椭圆的拟合中心,从而同时对透视与畸变偏心误差进行补偿。仿真和实验数据均证实了所提方法的有效性。

为确保标定精度,通常需要使用大量的控制点进行相机标定,若人工识别各控制点,工作过于繁重且效率很低。为提高测量的自动化程度,本书设计了一种圆形彩色编码目标及相应的图像识别与定位算法。在编码目标的设计中,利用共面同心圆消除透视偏心误差实现控制点的精确定位,利用彩色码圆作为编码起始标记简化编码结构、增大可编码数目。编码目标的识别与定位算法在实验中表现出良好的准确性和鲁棒性。

对于透视变形较小的窄视场相机,由于参数间的相互耦合,对所有相机透视成像参数同时进行优化求解所得结果精度较低。相机主距参数(以像素为单位

的相机像距)往往与表示物距的相机外参数高度耦合,为提高标定精度,本书提出首先根据镜头的成像特性使用物理设备直接测量镜头的等效焦距、主平面间距等参数,然后根据实际拍摄图像时物像距离的大小及物像放大倍率,直接单独求解相机主距参数。仿真数据显示该方法在窄视场相机的主距标定中优势非常明显。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请批评指正。

作 者

2018 年 12 月

目 录

1	绪论	1
1.1	引言	1
1.2	大型物体三维形貌测量的相关系统与方法简介	2
1.3	国内外研究现状	9
1.4	研究内容和本书结构	11
2	全站仪与数码相机组合测量系统的三维形貌测量原理	14
2.1	全站仪测量的基本原理	14
2.2	立体视觉测量的基本原理	15
2.3	全站仪与数码相机组合测量的基本原理	29
2.4	本章小结	37
3	窄视场相机标定问题的研究	38
3.1	相关的基本理论	39
3.2	标定板的透视变形	41
3.3	标定板的透视变形随相机视场角的变化	43
3.4	仿真计算	47
3.5	本章小结	50
4	圆形控制点偏心误差的补偿及彩色编码目标的设计	52
4.1	圆形控制点偏心误差的补偿	52
4.2	彩色编码目标的设计	66
4.3	本章小结	74
5	全站仪与普通数码相机组合测量系统参数的标定	75
5.1	相机主距参数的标定	75
5.2	其余单测站参数的标定	84
5.3	测站间参数的标定	90

5.4 本章小结	93
6 测量实例	94
6.1 被测对象	94
6.2 单测站参数标定	95
6.3 三维数据计算	97
6.4 精度验证	101
6.5 本章小结	104
7 结论与展望	105
7.1 结论	105
7.2 创新点	106
7.3 展望	107
参考文献	108
附录	121
附录 A 列满秩齐次线性方程组的最小二乘解	121
附录 B 最小二乘估计量的精度估计	121
附录 C 旋转矩阵的欧拉角分解	122
附录 D 物平面上共面圆的透视偏心方向	123

1

绪 论

1.1 引 言

物体表面轮廓几何信息的获取过程被称为三维形状测量。三维形状测量在反求工程、精密机械制造、安全监测等领域有着广泛的应用需求^[1-4]。如,在反求工程领域,为充分借鉴优秀设计制造成果、降低新产品研发难度和成本,需获取已存实物模型的曲面轮廓数据生成 CAD 模型;在精密机械制造领域,为对产品的加工质量进行检验,需获取实际加工产品的三维形状数据,将其与设计值进行比较;在安全监测领域,为确保人类的生命与财产安全、优化结构设计,需对存在安全隐患的自然或人工载体进行变形监测。目前,常规尺寸的三维形状测量方法已较为完善,但由于大型物体尺寸过大难以触及、不易或不可移动、通常在光照不可控的室外进行测量等特点,大部分位置记录装置(如关节臂、导轨、旋转台等)无法应用,并且可用的测量方法很少,较难实现高精度测量。但随着全球经济和科技的发展,对大型物体三维形状高精度测量的需求却日益迫切^[5-10],如飞机、轮船、风力涡轮机等大型物体的大型复杂曲面的反求与检测,山体、水坝、桥梁、塔体等大型结构的变形监测与分析等。因此,大型物体三维形状数据的精确、快速获取成为精密测量领域亟待解决的难题。

此外,在要求保持真实性的众多应用领域,不仅需要获取物体的三维形状数据,还必须获取物体的颜色信息,即实现物体三维“形貌”的测量。如,在文物保护、考古等领域,为充分利用文物的历史研究、科学分析、宣传教育、欣赏等价值,需要对现存的珍贵文物进行高保真数字化保存^[11-13];在虚拟现实、虚拟演播室

等应用领域,为给予观众身临其境、360°真实世界的感知,需要获取大量具有真实感的三维彩色模型^[14-16]。

本研究以静态大型物体为目标测量对象,旨在探寻一种精确、快速获取测量对象三维形状和颜色数据的方法。摄影测量法借助从不同角度拍摄的多幅被测对象的彩色二维图像可恢复其三维形状和颜色数据,是一种“面”测量方法,测量效率高、成本低,但由于传统测量方式中每幅重构图像均需高精度控制点进行定向,需消耗大量人力、物力且测量的灵活性较差。在工业测量领域,存在许多大尺度空间点位置测量系统,能够获得空间点的高精度三维坐标,在大型天线安装、航天器推进舱测量、航空设备装配等方面^[17-19]得到了广泛应用。由于这类系统的目标仅能够获得少量离散点的三维坐标,并不适用于密集点测量。但其中部分系统不仅能够实现空间点位置的测量还非常适合高精度姿态测量,如,极坐标测量方式的全站仪系统和激光跟踪仪系统。因此,本研究拟将数码相机(若无特别指出,本书中数码相机均指彩色数码相机)与高精度位置和姿态(以下简称位姿)测量系统相结合,由位姿测量系统直接获取拍摄每幅重构图像时数码相机的位姿参数,用数码相机进行高精度、高保真摄影三维形貌测量,从而简化摄影测量过程、保留摄影测量优势。

1.2 大型物体三维形貌测量的相关系统与方法简介

形状测量是形貌测量的基础,这里首先对三维形状测量方法进行简单介绍。三维形状测量始于20世纪50年代末三坐标测量机的出现。随着电子与激光技术的不断发展,基于光电原理的各种非接触式三维形状测量方法应运而生^[2,3],例如,基于相位测量的投影光栅法,基于空间三角测量的结构光三角测量法和摄影测量法等。图1-1总结了常见的几种三维形状测量方法,其中,摄影测量法可同时获取被测对象的形状与颜色信息,可直接实现三维形貌的测量。在大型物体的三维形貌测量中通常需要:第一,确定指定空间点的三维坐标,以实现系统参数标定、不同测量块的拼接或测量块的绝对定位等;第二,被测对象单测量块的三维形貌测量。下面对几种典型的大尺度空间点位置测量系统和大型物体三维形貌测量方法进行简单介绍。

1.2.1 大尺度空间点位置测量系统

常见的大尺度空间点位置测量系统包括全球定位系统、经纬仪测量系统、室内全球定位系统(Global Positioning System,简称GPS)测量系统、全站仪系统

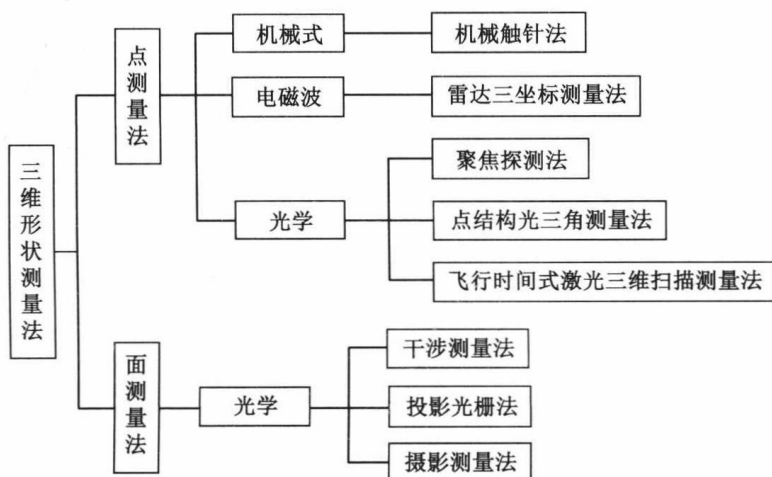


图 1-1 常见的三维形状测量方法

和激光跟踪仪系统,下面分别进行介绍。

(1) 全球定位系统

全球定位系统(GPS)^[20,21]是 20 世纪 70 年代美国研制的空间卫星导航定位系统,其主要目的是为陆、海、空三大领域提供实时的、全天候的和全球性的导航服务。如图 1-2 所示,GPS 系统把卫星视为“飞行”的控制点,根据卫星的瞬时坐标、接收机天线(即目标点)与卫星间的距离,由至少三颗卫星便可根据距离交会原理确定目标点的空间三维坐标。按照接收机天线在测量中所处状态的不同,可分为静态定位和动态定位;按照定位结果的不同,又可分为绝对定位和相对定位。绝对定位得到的是目标点在 WGS-84 大地坐标系中的绝对坐标,但精度较低,通常为米级。在高精度测绘领域最常用的是静态相对定位,其相对定位精度可达 10^{-6} 。

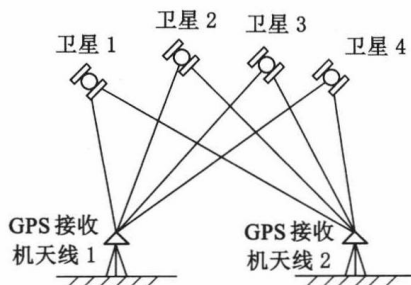


图 1-2 GPS 定位原理

(2) 经纬仪测量系统

经纬仪^[22]是一种测量水平角和垂直角的测绘仪器,主要由水平度盘、垂直

度盘、望远镜、水准器、读数系统等组成。经纬仪经历了由机械式到光学式,再到电子式的发展,成为当今地面角度测量的主要仪器。为测量目标点的空间位置,需要使用两台或多台经纬仪组成经纬仪测量系统^[23,24],根据角度交会原理计算目标点的三维坐标。以两台经纬仪构成的测量系统为例(见图 1-3),首先,通过系统定向确定两台经纬仪的基线长度 b 和高度差 h ,然后,根据瞄准目标点时经纬仪的水平和垂直角度($\alpha_A, \beta_A, \alpha_B, \beta_B$),由三角几何关系便可计算目标点 P 的三维坐标。

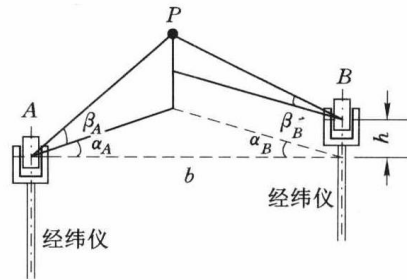


图 1-3 经纬仪测量系统的定位原理

(3) 室内 GPS 测量系统

20 世纪 90 年代,美国 Arc Second 公司成功研发了室内 GPS(iGPS)^[25],其测量示意图如图 1-4 所示。iGPS 系统利用红外激光发射器(称为基站)代替 GPS 卫星,根据光电接收器接收到的红外激光的时间特征参数,计算其相对于基站的方位角和俯仰角。与经纬仪测量系统类似,由至少两个位置已知的基站,便可根据角度交会原理计算出接收器的空间三维坐标。

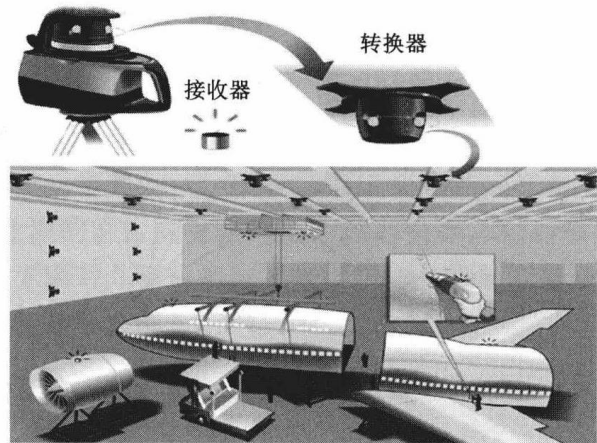


图 1-4 室内 GPS 测量示意图

(4) 全站仪系统

全站仪^[6,22,25],又称全站型电子速测仪,是一种集光、机、电为一体的高科技测量仪器。它在经纬仪的基础上加入了电子测距模块,根据飞行时间法激光测距原理实现距离测量,利用电子度盘实现水平和垂直角度测量,是一种极坐标测量系统(见图 1-5),被称为测绘领域的“三坐标测量机”。仪器设站方便灵活,且只需单次设站便可实现空间点的三坐标测量,适合较远距离的测量。全站仪测量精度较高,以日本 SOKKIA 公司的 NET05X 为代表,其测角精度高达 $0.5''$,测距精度可达 $0.5\text{ mm}+2\times 10^{-6}D$ (D 为测量距离,单位为 mm)。

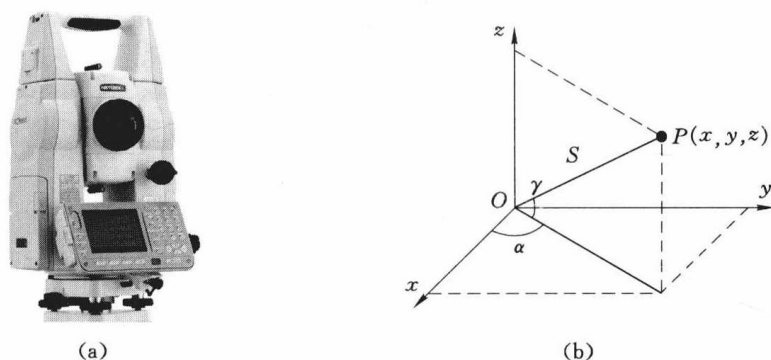


图 1-5 全站仪系统

(a) SOKKIA NET05X; (b) 极坐标测量

(5) 激光跟踪仪系统

激光跟踪仪^[22,24,26]是一种可对空间运动目标进行跟踪并可实时测量目标点的空间三维坐标的精密仪器,也是极坐标测量系统。激光跟踪仪的角度测量部分与马达驱动式全站仪类似,包括水平度盘、垂直度盘、步进马达及读数系统,但采用了激光干涉法进行距离测量,见图 1-6。由于激光干涉法只能获得相对距离,因此,需要一个距离已知的基准点作为测量起始点以获得绝对距离,鸟巢即为这样一个基准点。为避免每次意外终止测量后均必须回到鸟巢进行初始化,新型激光跟踪仪添加了绝对距离测量模块,可直接测量静态点的绝对距离,使测量更加灵活方便。与全站仪相比,激光跟踪仪的距离测量精度更高,但测程变小,价格通常也远高于全站仪。

1.2.2 大型物体三维形貌测量方法

为获取密集空间点的三维坐标,通常采用逐点扫描方式或面测量方式。适用于大型物体的密集点坐标获取方法主要有飞行时间式激光三维扫描测量法和摄影测量法。

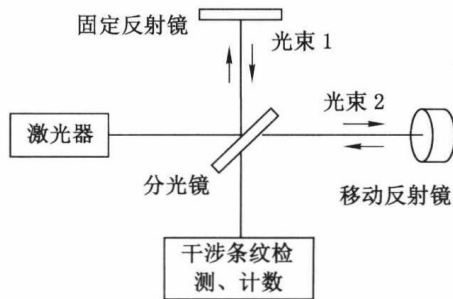


图 1-6 激光干涉测距原理

(1) 飞行时间式激光三维扫描测量法

基于飞行时间式激光三维扫描测量原理所研制的仪器称为飞行时间式激光三维扫描仪^[25,27](简称 TOF 激光三维扫描仪),其激光发射光路与接收光路同轴,通过激光发出与返回的时间差计算发射器至目标点的距离。根据时间差测量方式的不同,又可分为相位激光测距三维扫描仪和脉冲激光测距三维扫描仪,两者相比,通常后者的测量精度较低但测程较长。TOF 激光三维扫描仪也是一个极坐标测量系统,与全站仪等的度盘测角方式不同,它使用步进电机改变激光光路并获得扫描角度。其原始观测数据包括斜距、水平角、垂直角和回光强度。为实现三维形貌测量,需要将 TOF 激光三维扫描仪与数码相机配合使用(见图 1-7),由扫描仪获取被测对象表面点的三维坐标,由相机获取被测对象的彩色图像,通过相机标定确定扫描仪测站坐标系与相机图像坐标系间的转换关系后,便可得到每个扫描点的 RGB 值。TOF 激光三维扫描仪的坐标测量精度通常为毫米级,但由于采用了逐点扫描方式其测量效率较低,另外,设备价格也较高。



图 1-7 VZ-400 激光三维扫描测量系统

(2) 摄影测量法

摄影测量法是指借助从不同角度拍摄的、具有一定重叠度的、同一被测对象的多幅彩色二维图像恢复其三维形貌的测量方法,其实质为三角测量法。按起源学科的不同,摄影测量法可分为立体视觉测量法和数字近景摄影测量法。

① 立体视觉测量法

立体视觉测量^[28-30]起源于计算机学科,其仿照人类的双目视觉成像原理,利用放置于不同位置的两台或多台相机或多个位置的一台相机,对被测对象进行拍摄,根据同一物点在不同图像上所成的像计算物点的空间坐标。如图 1-8 所示,物点 P 在不同图像上的像与各相机等效中心的连线相交于物点,求得两投影直线在同一坐标系下的直线方程后,即可确定物点的三维坐标。结合相机图像传感器所获取的像点的颜色信息,便可实现被测对象的三维形貌测量。立体视觉测量无须投射特殊结构的光,在普通光照条件下即可完成,近年来出现了将带有编码信息的结构光或随机图案投射到被测对象表面制造纹理特征的做法^[31,32],旨在提高图像立体匹配的稠密度与准确度。立体视觉测量方法由于其精度高、效率高、非接触、易于自动化等特点,得到了广泛应用。

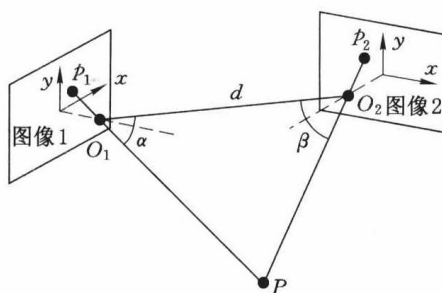


图 1-8 立体视觉测量原理

立体视觉测量有单目、双目和多目三种实现形式(见图 1-9)。单目实现形式只需要一台相机,通过改变相机位置以获取不同角度的被测对象图像,其优点是测量成本低、测量灵活,但拍摄每幅图像时的相机位姿参数均需确定,通常是在被测对象上或周围布设大量坐标已知的控制点,确保每幅图像均包含一定数目的控制点。为保证标定精度,每幅图像所包含的控制点数不可过少,这极大地增加了测量工作的难度,此外,单目形式只适用于静态目标的测量。双目实现形式需要两台相机,在实际中应用较多,其优点是,两台相机的相对位姿固定,通常整个测量系统可整体搬移,单次标定得到两台相机间的相对位姿参数后,便可在任意时间、地点对不同的被测对象进行测量,且可用于动态目标的测量,但受构

件本身尺寸的限制,基线较短,只适用于近距离小范围测量,无法进行大型物体的远距离测量。多目实现形式可以看作是双目形式的推广,其测量特点与双目形式基本一致,但由于从更多的角度获取了被测对象的图像,可减轻双目形式中图像匹配的不确定性,减小图像的误匹配及无法匹配的比例,由于三维重构时可提供更多的约束,重构精度可更高,但算法难度也会相应增加。

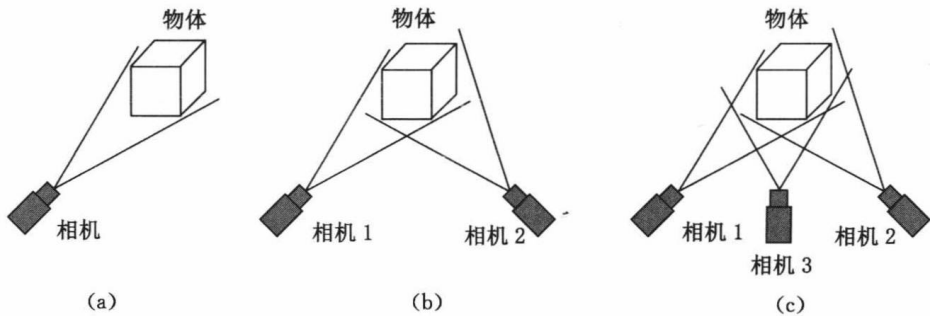


图 1-9 立体视觉测量的三种实现形式

(a) 单目;(b) 双目;(c) 多目

② 数字近景摄影测量法

数字近景摄影测量^[6,33,34]是测绘学科的一个分支,经历了模拟—解析—数字化的变革,已完全突破了传统地形测量的范围。数字近景摄影测量与立体视觉测量的测量原理基本相同,两者并没有严格的区别和界限,只因从不同的学科发展而来,两者在侧重的测量对象、过程解释与描述以及数据处理方式上存在着较大差异,但随着计算机技术的发展,两个领域正在相互渗透,关系日益密切。

在数字近景摄影测量中,相机内、外参数的标定被称为相机的内、外部定向,常用的标定方法包括传统标定和自标定两种。与立体视觉测量类似,数字近景摄影测量的传统标定方法也需要在被测对象上布设控制点(可以是人工标志点或被测对象本身的特征点,为便于辨认通常采用前者),采用测绘手段获取控制点的空间坐标,利用空间后方交会计算相机参数。数字近景摄影测量的自标定方法无须空间坐标已知的控制点,而是利用同一场景的多幅图像间的对应关系求解相机参数,通过自标定可实现被测对象的相似重构,想要进行欧氏重构仍需已知的基准长度信息。传统标定的标定精度及鲁棒性远高于自标定,因此,在高精度测量中往往采用传统相机标定方法,但每幅图像均需坐标已知的控制点进行定向,极大地限制了此方法的应用。图 1-10 给出了两套较为成熟的数字近景摄影测量系统。

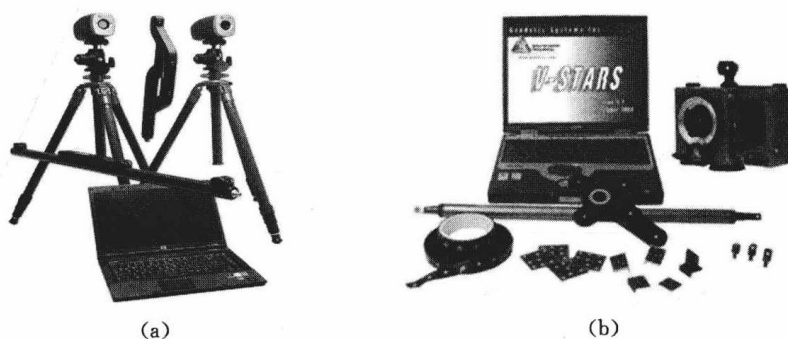


图 1-10 数字近景摄影测量系统

(a) Metronor 公司的 Duo 系统; (b) GSI 公司的 V-STARS 系统

虽然数字近景摄影测量在大型物体的测量方面历史更为悠久,但该领域的专业术语、数据处理方式等常会使非测绘专业人士困惑,因此,本书选择了从更易于理解的立体视觉测量角度进行阐述。

1.3 国内外研究现状

由于光学测量方法的高精度、非接触、无损性等特点,目前公认的最具有生命力和发展前景的大型物体三维形貌测量方法,成为国内外研究的焦点。

将 TOF 激光三维扫描仪与数码相机相结合是目前国内外最常用的大型物体三维形貌测量方法之一。哥伦比亚大学的 Allen 等人采用该方法实现了法国博韦的圣皮埃尔大教堂的三维重建^[35]。哈希姆大学的 Al-Kheder 等人采用该方法完成了约旦阿姆拉、哈拉那城堡的三维重建^[36]。东京大学的 Ikeuchi 等人采用该方法建立了奈良、镰仓大佛像的光度模型^[37,38]。武汉大学的邓非等人采用该方法实现了武汉大学图书馆古籍馆的三维重建^[39]。西北大学的刘军等人采用该方法完成了小雁塔及其主要附属建筑物的三维重建^[40]。TOF 激光三维扫描仪能够获得高精度稠密点云数据,成为大型物体三维形貌测量中不可或缺的工具,但其过高的价格限制了推广。

数字近景摄影测量法以其效率高、成本低等特点在大型物体三维形貌测量中得以广泛应用。阿克萨赖大学的 Yilmaz 等人采用该方法对丝绸之路上土耳其境内一所保存较完整的旅馆进行了三维重建^[12]。新墨西哥州立大学的 Jau-regui 等人采用该方法进行了桥梁变形测量^[9,10]。天津大学的叶声华等人使用该方法实现了大型天线模胎面型检测、星载可展开式天线型面的测量等^[6,41]。

武汉大学的张祖勋等人在该领域也进行了大量卓有成效的研究,研发了多基线数字近景摄影测量系统 Lensphoto^[42-44]。为充分利用 TOF 激光三维扫描仪与数字近景摄影测量法各自的优势,两者也经常被联合使用^[45,46]。另外,基于自标定的数字近景摄影测量法在对精度要求不高的文物建档、数字展示等领域也得到了广泛应用^[47-49]。基于传统标定的数字近景摄影测量法,要求每幅图像都必须包含一定数量的控制点进行定向,户外作业量大且对于不可设人工标志点、也无明显特征点的对象无法适用。基于自标定的数字近景摄影测量法由于测量精度低,不能满足高精度数字化、变形测量等应用需求。

将姿态或位姿测量系统与摄影测量相结合也得到了越来越广泛的应用。20 世纪 70 年代出现了将相机与经纬仪连接在一起用于地形测量的仪器,称为摄影经纬仪。2008 年,张峰等人将 GPS 接收机、电子经纬仪、量测数码相机等硬件设备集成于一体,形成了一种“三维数码摄影全站仪系统”^[50]。

加拿大拉瓦尔大学的 Gravel 等人研发了一套计算机辅助摄影测量系统 [Computer Assistant Photogrammetry System, 简称 CAPS, 见图 1-11(a)]^[51], 在该系统中相机被安装在全站仪的水平横轴支架上, 相机不能随望远镜垂直旋转, 限制了其垂直方向的空间测量范围。

武汉大学的张祖勋携其团队研发了一套摄影全站仪系统 [Photo Total Station System, 简称 PTSS, 见图 1-11(b)]^[51-54], 在该系统中量测相机被刚性连接到全站仪的望远镜上, 相机可以随望远镜水平、垂直旋转。PTSS 系统提出了一种新的测量概念, 并采用了数字近景摄影测量领域较完善的数据处理算法, 达到了较高的测量精度。PTSS 系统使用内参数已知的量测相机避开了内参数的标定, 但量测相机价格昂贵, 测量成本很高。另外, 该系统采用了测绘领域的导线法实现不同测站的转换, 专业性强, 对操作人员的要求较高。

国防科学技术大学的朱肇昆等人将非量测摄像机分别与全站仪、经纬仪、普通二维旋转平台进行组合, 搭建了多种结构的经纬相机摄像测量系统 [Theodolite-camera Videometrics System, 简称 TVS, 见图 1-11(c)]^[7,55], 其目的在于利用旋转平台的已知角度扩展摄像机摄影测量的可测空间范围, 实现大尺度运动测量和大型结构变形测量。其使用两台相机组成了不可整体搬移的双目形式的立体视觉测量结构, 但这种结构在经济性和灵活性方面并不适合静态大型物体的 360° 测量。

武汉大学的徐进军等人对普通数码相机与全站仪的结合进行了初步探讨^[56], 但目前并未发现更深入的研究报告。拓普康、徕卡等公司将数码相机与全站仪进行了整合推出了影像全站仪 Topcon IS[见图 1-11(d)], 但目前这种内置相机的图像质量无法达到专业相机的水平, 不可能完全依靠内置相机实现高