



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

DIGITAL INDUSTRIAL PHOTOGRAMMETRY TECHNOLOGY AND APPLICATION

冯其强 李广云 李宗春 著

数字工业摄影测量 技术及应用



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资

数字工业摄影测量技术及应用

Digital Industrial Photogrammetry Technology and Application

冯其强 李广云 李宗春 著

测绘出版社

• 北京 •

© 冯其强 2013

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

本书针对数字工业摄影测量系统的软硬件组成、测量方式和精度要求,总结作者近几年来从事数字工业摄影测量技术研究的经验,构建了数字工业摄影测量系统的理论和技术体系。全书共分6章,第1章总结分析了研究背景及国内外研究现状;第2、3章分别研究了数字工业摄影测量系统的硬件设备及数码相机检校技术;第4、5章分别研究了标志点图像处理和摄影测量数据处理技术;第6章介绍了MetroIn-DPM系统的集成和精度测试,并结合两个天线测量项目介绍了数字工业摄影测量技术在实际工程中的应用情况。

本书的读者对象包括精密工程与工业测量技术人员,近景摄影测量及视觉测量技术人员,大中专院校在校学生,以及相关工程和研究人員。

图书在版编目(CIP)数据

数字工业摄影测量技术及应用/冯其强,李广云,
李宗春著. —北京:测绘出版社,2013.5
ISBN 978-7-5030-3009-3

I. ①数… II. ①冯… ②李… ③李… III. ①工程
测量—数字摄影测量 IV. ①P231.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 089634 号

责任编辑	贾晓林	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—83060872(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—68531160(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	9.75			字 数	185 千字		
版 次	2013 年 5 月第 1 版			印 次	2013 年 5 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1500			定 价	28.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3009-3/P·652

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

序

近年来,我国摄影测量与遥感技术飞速发展,已是世界三大国之一。在汶川抗震救灾、奥运安保以及最近的芦山抗震救灾等重大活动中,摄影测量与遥感技术均发挥了重要作用。然而,由于种种因素的影响,国内在近景摄影测量这一分支领域的研究水平与国际相比仍有较大差距。特别是在精度和自动化程度要求更高的工业摄影测量方面,基础理论与实用系统的开发工作长期以来进展缓慢,难以满足国内精密制造业快速发展的需求。

早在 20 世纪末,解放军信息工程大学的李广云教授就已意识到将摄影测量技术应用于工业测量领域的广阔前景,并于 2004 年率先引进国际先进的 V-STARS 工业摄影测量系统。近十年来,以李广云教授为首的科研教学团队对 V-STARS 系统进行了“麻雀解剖”式的系统研究,提出了一系列的创新理论,开发了实用的测量系统,极大地深化了对工业摄影测量技术的认识,研究成果已在航天、航空、通信、交通等众多领域得到广泛应用,成功实现了“引进、消化、吸收、再创造”的目标。

该书是作者近几年来研究成果的系统总结。书中系统讲述了数字工业摄影测量的基本原理和方法,深入阐述了实现高精度、自动化工业摄影测量的关键技术,介绍了作者研发的 MetroIn-DPM 工业摄影测量系统及其应用于工程实践的典型案例。在数码相机检校、人工标志图像识别、定向靶与编码标志设计识别、像片自动概略定向、像点自动匹配及自检校光束法平差快速计算等核心问题上,作者提出了一系列创新性的解决方案,取得了良好的效果。书中部分研究成果已经获得了国家专利保护,在数字工业摄影测量领域拥有了自主的核心技术。该书行文流畅,思路清晰,描述细致,具有很强的指导性和可操作性。

相信该书会为从事工业测量和摄影测量研究的同行提供宝贵的借鉴,祝愿该书早日出版。

李德仁

2013 年 4 月

前 言

数字工业摄影测量技术作为工业测量系统的重要组成部分,可以为工业产品制造提供过程指导和质量监控,在现代精密制造工业中发挥着重要作用。在国外众多顶级工业部门,例如从美国国家航空航天局到波音公司,从欧洲空中客车到纽波特纽斯造船厂,从通用动力到大众汽车,随处可见数字工业摄影测量系统的身影。它们以高效、高精度的测量数据,随时为工业产品的质量保驾护航。

遗憾的是,由于国内对该技术的研究起步较晚,能够在工业部门应用推广的高精度数字工业摄影测量系统屈指可数。在各类工业产品不断由“中国制造”转向“中国创造”的同时,其测量服务技术不得不依靠引进。作为精密工业测量技术研究人员,作者不揣冒昧将近年来的研究成果整理出版,以期抛砖引玉,为数字工业摄影测量技术在国内的推广应用略献薄力。

全书共分6章,第1章介绍了国外典型的数字工业摄影测量系统,分析了国内研究现状,以明确研究内容和思路。第2章讨论了人工标志和测量附件。首先分析回光反射材料的反光特点,并以此为基础,设计一套实用的测量标志及编码标志、定向靶、基准尺等附件。第3章研究了数码相机及其检校技术。通过对影响测量精度的相机各参数进行分析,确定量测型相机应具备的性能参数和结构特点,并为非量测型数码单反相机选型提供理论依据;同时研究相机畸变规律,实验不同畸变模型的检校效果,提出一种新的基于有限元模型和10参数模型的数码相机组合检校方法。第4章研究了标志图像中心坐标提取技术;分析反光标志图像的灰度分布规律,研究标志点图像的准确识别和精确定位算法,提出一种基于边界搜索的像点坐标提取算法;同时,利用仿真图像对影响像点坐标提取精度的各种因素进行深入分析。第5章研究了摄影测量数据处理,对测量数据自动化处理的各环节进行研究,提出基于4个非共线控制点的单张像片空间后方交会直接解算法及基于定向靶和编码标志的多张像片概略定向算法;提出基于已知点和核面约束的标志点匹配算法和基于逐点法化消元的自检校光束法平差快速计算方法。第6章介绍了系统集成与应用情况,对作者开发的MetroIn-DPM数字工业摄影测量系统组成、功能模块及精度测试情况进行介绍,并结合天线安装检测、ASKAP天线面型及馈源姿态检测等工程实践,介绍数字工业摄影测量技术在工程中的应用。

在书稿完成之际,作者特别感谢中国电子科技集团总公司第54研究所的金超研究员,本书的部分成果得益于与金超研究员的项目合作。感谢精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室对本书研究提供的基金支持。本书部分研究

内容得到国家自然科学基金项目“三维激光扫描仪系统误差建模理论与标定方法研究”(编号:41274014)支持,在此深表感谢。此外,作者还要特别感谢课题组的范百兴、张冠宇、杨振、邓勇、陈新、杨晓晖、王力、李干、卢书等同志,他们都不同程度地参与了项目研究及相关实验,他们的智慧也凝结在本书中。

由于作者水平有限,书中论点难免有偏颇之处,恳请读者不吝赐教。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字工业摄影测量技术研究现状	2
1.2 数字工业摄影测量技术发展趋势	6
1.3 本书主要内容	8
第 2 章 人工标志及测量附件	9
2.1 回光反射标志	9
2.2 编码标志设计与识别	13
2.3 主要测量附件	20
2.4 本章小结	22
第 3 章 数码相机及其检校	23
3.1 影像传感器	23
3.2 影响测量精度的主要因素	29
3.3 常用相机畸变模型	35
3.4 数码相机组合检校	42
3.5 本章小结	45
第 4 章 标志图像中心坐标提取	46
4.1 常用标志图像识别及中心定位算法	46
4.2 基于边界搜索的像点坐标提取	53
4.3 标志图像中心定位精度仿真分析	57
4.4 标志图像椭圆偏心差仿真分析	67
4.5 本章小结	86
第 5 章 摄影测量数据处理	87
5.1 像片自动概略定向	87
5.2 像点自动匹配	95
5.3 自检校光束法平差快速计算	103
5.4 本章小结	112

第 6 章 系统集成与应用	114
6.1 MetroIn-DPM 系统集成	114
6.2 精度分析与测试	120
6.3 工程应用	126
6.4 本章小结	136
参考文献	137

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Research status of digital industrial photogrammetry technology	2
1.2	Development trends of digital industrial photogrammetry technology	6
1.3	Main contents of this book	8
Chapter 2	Artificial targets and measurement accessories	9
2.1	Retro-reflective targets	9
2.2	Design and recognition of coded targets	13
2.3	Main measurement accessories	20
2.4	Summary	22
Chapter 3	Digital camera and its calibration	23
3.1	Image sensors	23
3.2	Main factors affecting the measurement accuracy	29
3.3	Typical camera distortion models	35
3.4	Combination calibration of digital camera	42
3.5	Summary	45
Chapter 4	Centring of target images	46
4.1	Typical recognition and centring algorithms for target images	46
4.2	Target centring algorithm based on the edge searching	53
4.3	Simulation analysis of the centring accuracy of target images	57
4.4	Simulation analysis of ellipse eccentric errors of target images	67
4.5	Summary	86
Chapter 5	Photogrammetry data processing	87
5.1	Automatic preliminary orientation of images	87
5.2	Automatic matching of image points	95
5.3	Quick solution for self-calibration bundle adjustment	103
5.4	Summary	112

Chapter 6	Integration and application of photogrammetry system	114
6.1	Integration of MetroIn-DPM system	114
6.2	Analysis and testing of measurement accuracy	120
6.3	Application to engineering	126
6.4	Summary	136
References		137

第1章 绪 论

精密工业测量不但要完成工业产品质量检测任务,还要为提高生产效益提供技术支持。近年来,我国的制造业尤其是重大基础装备工业得到飞速发展,作为工业制造中的重要环节,高精度工业测量技术正在发挥着越来越重要的作用。同时,先进的工业制造水平也对工业测量技术提出了许多新的要求,主要表现在:

(1)测量目标的尺寸越来越大。以天线测量为例,国家天文台密云站 50 m 口径测控天线于 2006 年建成,并在“探月工程”一期中发挥了重要作用(王保丰 等, 2006b)。上海天文台 65 m 口径射电望远镜天线于 2012 年建成,将在探月二期和三期工程中承担 VLBI 测定轨和定位任务,并执行今后各项深空探测及天文研究任务。500 m 口径球面射电望远镜(FAST 工程)项目已经奠基,预计将于 2013 年落成,该天线不仅能强有力地支持我国未来的载人航天、探月和深空探测计划,还能同时扫描上亿个频率,诊断微弱的空间窄带讯号,在国家安全方面具有重要意义(朱文白 等, 2002;佚名, 2006)。众所周知,天线的性能在很大程度上取决于精密测量的技术和能力,尤其要解决大型乃至巨型天线在安装过程和工作状态下的精密测量问题(李宗春 等, 2003b)。

(2)测量的精度要求越来越高。仍以天线测量为例,美国 GSI 公司于 2000 年至 2001 年对口径 305 m 的 Arecibo 望远镜进行了测量,面型精度优于 ± 0.2 mm (EDMUNDSON et al, 2001; GOLDSMITH, 2001)。国家天文台密云站 50 m 口径天线的设计面型精度优于 1~3 mm,面型检测的精度优于 $\pm (0.3\sim 1)$ mm。上海天文台 65 m 口径射电望远镜主反射面的设计面型精度优于 0.1 mm。可以想象,如此高的精度要求,对任何工业测量技术而言都是一项挑战。

(3)测量目标及现场环境越来越复杂,如大型星载网状天线展开后的面型展开精度测量、高温锻件测量、水轮发电机组安装测量、主动面天线工作状态下面型检测、卫星天线在热真空环境中的变形测量等(卢成静 等, 2007;黄桂平 等, 2008;原玉磊 等, 2009),单一的测量手段越来越不能满足测量需求。

作为工业测量系统的重要组成部分,数字工业摄影测量技术在现代制造业中发挥着愈加重要的作用。数字工业摄影测量属于近景摄影测量范畴,它利用数码相机对被测目标拍摄像片,通过数字图像处理 and 摄影测量处理,获取目标的几何形状和运动状态(冯文灏, 2001a)。

与其他工业测量系统相比,数字工业摄影测量具有其自身的优点:

(1)瞬间获取被测目标的大量物理信息和几何信息,特别适用于测量点众多的

目标。

(2)采用投影点作为测量点时可实现非接触性测量,不伤及测量目标,不干扰被测物自然状态,可在恶劣条件下(如高低温、高低压、有毒、有害环境等)作业。

(3)测量精度高,相对测量精度可达 $1/10$ 万 $\sim 1/12$ 万,甚至更高。

(4)适合于被测目标环境不甚稳定乃至剧烈变化的测量。

(5)适合于动态目标的外形和运动状态测量。

数字工业摄影测量系统在国外已有数十年的发展历史,其理论与技术已趋于成熟,众多厂家纷纷推出自己的测量系统。但国内在该技术领域尚处于研究阶段,对如何实现高精度、自动化测量的理论研究尚不深入,其成果难以满足国内飞速发展的工业需求。

本书研究的出发点和目的是,通过对硬件、软件等方面的深入研究,解决高精度数字工业摄影测量的关键技术,构建一款能够满足工业部门检测需求的实用化测量系统,以推动数字工业摄影测量技术在国内工业制造领域的应用和推广。

1.1 数字工业摄影测量技术研究现状

1.1.1 国外研究现状

在国外,从 20 世纪 60 年代开始便有学者对近景摄影测量的相关理论、算法及硬件进行研究,并逐步将其应用到工业测量领域。到 90 年代,随着计算机技术的快速发展和日益普及,工业摄影测量技术逐渐步入数字化时代。到目前为止,已有多家公司推出了自己的数字工业摄影测量系统,比较典型的有美国 GSI 公司的 V-STARs 系统、挪威 Metronor 公司的 Metronor 系统、德国 GOM 公司的 TRITOP 系统、德国 Aicon3D 公司的 DPA-Pro 系统等(CLARKE et al,1997;冯文灏,2000;黄桂平,2005;蒋若愚等,2005;胡小北,2007;张义力等,2005;杨再华,2008)。

V-STARs 系统目前有 S8、E4X 和 M8 等三种不同配置,以满足不同测量环境、测量精度和测量速度的要求。该系统是目前国际上最为成熟的商业化数字工业摄影测量产品,在飞机、汽车、轮船、天线等工业制造部门均有广泛应用(黄桂平等,2009)。

V-STARs S8 系统为脱机测量系统,采用 INCA3(Intelligent Camera,INCA)量测型相机作为影像传感器(图 1.1),配合回光反射标志进行测量,测量精度可达 $\pm(5\mu\text{m}+5\mu\text{m}/\text{m}\cdot D)$ 。INCA3 相机采用带制冷装置的柯达科学级单色 CCD 芯片,能有效抑制成像噪声,CCD 尺寸为 $35\text{ mm}\times 23\text{ mm}$,有效像素为 800 万。

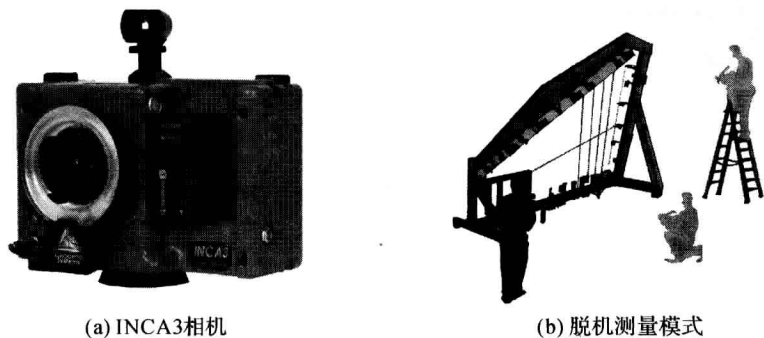


图 1.1 V-STARS S8 系统

V-STARS E4X 系统是 S8 系统的简化版,采用价格较为低廉的尼康 D2X 相机作为影像传感器(图 1.2)。该相机采用彩色 CMOS 芯片,有效像素为 1 200 万。GSI 公司对该相机主要部件进行了加固,大大提高了相机内参数的稳定性,并对整机进行精确检校,使其测量精度达到 $\pm(8\text{ }\mu\text{m}+8\text{ }\mu\text{m}/\text{m}\cdot D)$ 。



图 1.2 尼康 D2X 相机

V-STARS M8 系统是使用两台 INCA3 相机连接笔记本电脑组成固定基线的联机测量系统,使用手持式测量笔或投点器实时测量单点或点云三维坐标(图 1.3)。该系统的典型测量精度为 $\pm(10\text{ }\mu\text{m}+10\text{ }\mu\text{m}/\text{m}\cdot D)$ 。

Metronor 系统是光电式坐标测量系统(图 1.4)。该系统采用一台或两台已经预先精确检校好的红外数码相机(经 Metronor 公司专门改造)与红外测量光笔相配合,实现联机实时测量。Metronor 光笔测量系统简单、轻便,可实现长达 30 m 的精确测量,在 10 m 以内的测量精度可达 $\pm(0.01\sim 0.1)\text{ mm}$ 。该系统出色的隐藏点测量和多点同步测量功能,更使得它成为适合车间现场的大尺寸坐标测量机,主要应用于汽车制造业,完成工装夹具测量、生产线安装调试与检测、白车身及零

件测量、部件变形检测以及模具检测等测量任务(CLARKE et al,1997;SHIMIZU et al,2002;张亚伟,2007)。

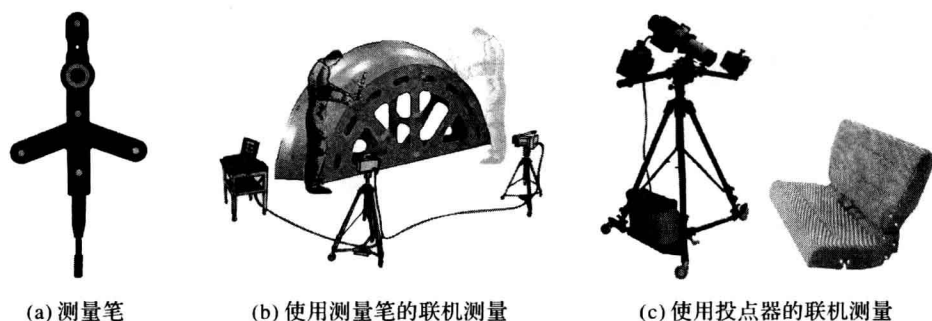


图 1.3 V-STARS M8 系统

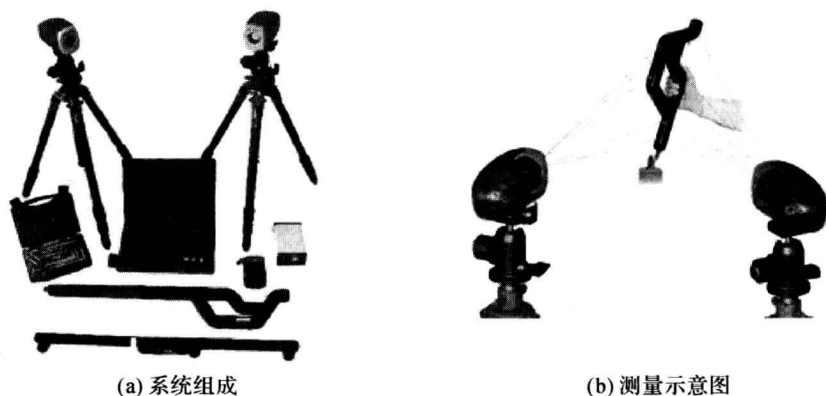


图 1.4 Metronor 系统

TRITOP 系统(图 1.5)测量方式与 V-STARS 系统相同,也分为单台相机脱机模式和多台相机联机模式。该系统仅使用普通数码单反相机作为影像传感器,测量范围可达 10 m 以上,在 10 m 以内测量误差按照 0.01 mm/m 递增,整个精度范围为 $\pm(0.01\sim0.1)$ mm(BEHRING et al,2003;HAIG et al,2006)。

DPA-Pro 系统是单相机摄影测量系统(图 1.6)。该系统采用尼康 D2X 相机作为影像传感器,配备 Nikkor 24 mm 定焦镜头和环形闪光灯,像片可通过无线网络或存储卡导入笔记本电脑。DPA-Pro 系统的测量精度为 ± 0.015 mm/m(按 VDI 2634 标准测试),三维点坐标可导入 PolyWorks、RapidForm、Metrolog 及 Metrosoft 等软件系统进行后续分析。该系统主要应用于汽车、航空航天部门以及其他大型部件领域的测量(PEIPE et al,2006)。



(a) 系统组成



(b) 测量示意图

图 1.5 TRITOP 系统



(a) 系统组成



(b) 配备环形闪光灯的D2X相机

图 1.6 DPA-Pro 系统

1.1.2 国内研究现状

国内对近景摄影测量的研究始于 20 世纪 70 年代。在其后较长一段时间内，由于工业制造水平的限制，相关工业部门对先进测量技术的依赖程度不高，从而使得摄影测量技术迟迟未能深入到工业测量领域。到 80 年代末、90 年代初，以冯文灏教授为代表的摄影测量工作者开始关注国内高精度工业摄影测量技术的发展，对国外相关理论及工程实践进行研究，并针对近景摄影测量技术如何应用到工业测量领域提出了一系列创新理论(庄俊明, 1989; LUHMA et al, 1991; 吴志忠 等, 1992; 冯文灏, 1994; 冯文灏, 2000; 冯文灏, 2001a; 冯文灏, 2001b; 李广云, 2003)。近年来，随着国内工业尤其是重大基础装备工业的飞速发展，工业部门对高精度测量技术的需求越来越迫切，国外各家数字工业摄影测量公司纷纷将自己的产品推向中国市场。与此同时，国内许多高校和研究机构也在引进、吸收国外先进测量产品、理念、技术的基础上，在相机检校、测量标志设计以及数据处理等方面进行着日益

深入的研究,并逐步推出各自的工业摄影测量系统(程效军等,2002;郑俊等,2004;王保丰等,2007;郝继贵等,2007;张德海等,2009;张胜利等,2009)。但整体而言,目前国内在高精度数字工业摄影测量领域仍处于研究阶段,现有测量系统仍难以替代国外同类产品(叶声华等,2009)。

Lensphoto 系统是武汉朗视软件有限公司推出的一款多基线数字近景摄影系统(图 1.7)。该系统由普通数码相机拍摄像片组,采用张祖勋院士提出的近景摄影



图 1.7 Lensphoto 系统

影像匹配技术,自动、快速生成可量测的区域三维数字表面模型,其点位相对精度优于 1/5 000,可广泛应用于水利电力、地质、文物保护、地理信息、城建、交通、房产、规划等全过程。虽然该系统的测量精度相对较低,难以用于高精度工业测量,但其采用的“短基线、多影像前方交会”理论已在国内外众多数字工业摄影测量系统中得到广泛应用(何秀国等,2007;张胜利等,2009)。

西安交通大学在国家 863 项目“大型复杂曲面产品的反求和三维快速检测系统研究”的基础上,推出了基于数码单反相机的 XJTUDP 三维光学点测量系统,以及相应的静态和动态变形分析软件。该系统在 4 m 范围内的测量精度为 ± 0.1 mm,可用于汽车工业、航空航天工业、船舶工业、建筑业等领域(李大成等,2009;梁晋等,2009;肖振中等,2009;张德海等,2009;张德海等,2009)。

信息工程大学测绘学院于 2005 年在国内率先引进 V-STARS S8 系统,经过数年的研究及应用,在相关理论和工程实践方面积累了一定的经验,先后完成了“探月工程”50 m 口径测控天线精密安装与校准测量、星载可展开式天线测量、星载天线真空条件下高低温检测、上海天文台 65 m 口径射电望远镜天线精密安装测量等多项高精度工业测量任务(王保丰,2004;黄桂平,2005;范生宏,2006;冯其强,2007;卢成静等,2007;王保丰,2007;王保丰等,2007;黄桂平等,2008)。

1.2 数字工业摄影测量技术发展趋势

数字工业摄影测量技术经过几十年的发展,在理论研究和产品化等方面都取得重大进步。国外成熟测量系统在现有基础上不断推陈出新,国内相关机构也在理论研究不断深入的基础上,逐步迈向实用化、产品化。纵览数字工业摄影测量技术的发展历程和现状,可以预见其今后将呈现如下发展趋势:

(1) 相机呈多样化、专业化发展。目前,用于数字工业摄影测量的相机已经有专业量测型相机、数码单反相机、红外相机、工业摄像头等多种类型。GSI 公司生

产的 INCA3 相机是专业量测型相机的典型代表,该相机基于柯达科学级 CCD 相机改装而成,具有极佳的成像性能和稳定的机械结构,而且配备 Intel 266 MHz Pentium II CPU 型微处理器,能够对摄影参数进行自动设置、对像片进行预处理并提示测量标志的成像信息。数码单反相机以其相对低廉的价格和日益强大的成像性能,正越来越成为数字工业摄影测量的常用传感器。许多学者、厂家也开始尝试对单反相机进行专业化改装,以使其更加适用于摄影测量。不难想象,随着 CCD、CMOS 等影像传感器技术的不断进步,必将会有更多类型、更加专业化的相机应用于数字工业摄影测量领域(DOLD, 1998; Li Xiaopeng, 1999; RIEKE-ZAPP et al, 2008; KAVZOGLU et al, 2008)。

(2)测量精度、自动化程度不断提高。随着工业部件的制造精度、表面复杂程度不断提高,数字工业摄影测量必然要向高精度、超高精度和高度自动化方向发展。测量精度的提高主要依赖于影像传感器性能的日益强大、对畸变差的检校精度逐步提高以及像点定位等算法的不断优化。而测量自动化程度的增强则需要更多的自动化测量附件、稳健的标志识别算法、像片定向算法和像点匹配算法(冯文灏, 1994; BROWN, 1971; GANCI et al, 1998; FRASER, 2000)。

(3)对动态测量理论的研究逐步深入和实用化。摄影测量的数据源(图像)是瞬时获取的,这一特点使得数字工业摄影测量技术特别适用于对动态目标的测量,如风洞变形实验、汽车碰撞测试、工件振动变形测量等。目前的很多测量系统,如 V-STARs M8、Metronor、Metris K600 等都具备动态测量功能,但在测量精度、范围以及采样频率等方面都有待于进一步加强。数字工业摄影测量技术用于动态目标测量需解决的关键问题主要包括:多传感器高速同步、图像快速获取与存储、海量数据快速处理及测量基准确定等(吴一戎等, 2005; 杨再华, 2008; 冯其强等, 2009; 汤廷松等, 2009)。

(4)三维数据分析软件日益专用化、精细化。获取被测目标(点)的三维坐标信息是数字工业摄影测量的基本功能,同时,对三维坐标数据进行深入分析也是其重要功能之一。测量点坐标信息在不同领域的用途不尽相同,如逆向工程中利用点云数据进行几何造型,工业制造中利用离散点坐标与 CAD 设计模型进行比对,而动态测量数据则多用于目标的动态变形分析。应用领域的多样性和复杂性决定了难以集成一套涵盖各种功能的、通用的数据分析系统,而必然是针对不同用户开发各种专用的、精细的数据分析软件(FRASER, 1998; 李耀东等, 2004; 陈基伟, 2005; 隋桂芝等, 2006; 许英勋等, 2006)。

(5)更加注重与其他测量传感器的融合。多传感器融合是测量技术的发展特点,也是数字工业摄影测量技术发展的必然结果。通过不同测量系统融合,能够充分发挥摄影测量自动、快速、精确的优点,极大的提高其他测量系统的性能,如电子经纬仪系统、全站仪系统和激光扫描仪系统等(BERALDIN, 2004; 景冬等, 2007;