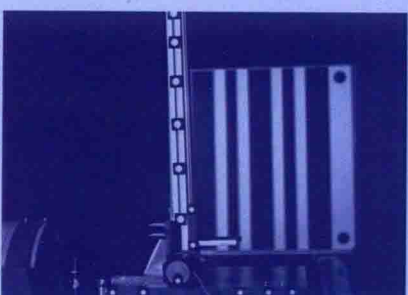
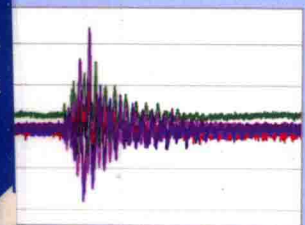
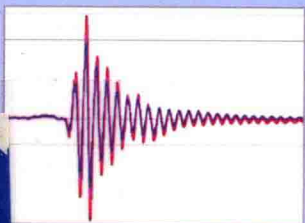
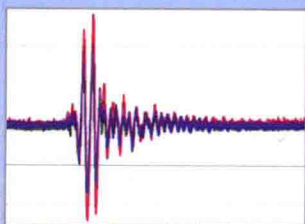




地球观测与导航技术丛书

高速视频测量理论方法与工程应用

童小华 刘祥磊 陈 鹏 高 颀 刘世杰 卢文胜 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

地球观测与导航技术丛书

高速视频测量 理论与工程应用

童小华 刘祥磊 陈 鹏 高 颀 刘世杰 卢文胜 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

高速视频测量是以非接触的形式获取高速运动目标的海量影像序列数据,并根据近景摄影测量理论和方法分析每张或每对像片中物体目标点的三维空间坐标变化,以确定物体的整体运动状态,具有非接触、三维测量和密集测量的优势,已广泛应用于土木工程、材料测试、考古学、航空学和工业制造等领域。本书通过理论方法、软硬件系统和工程应用三篇详细介绍了高速视频测量的原理与技术方法及其在土木工程中的应用,从原理以及实际应用的角度给出相应的高速视频测量解决方法。

本书不仅可为国内高速视频测量科研工作者提供参考、进一步推进高速视频测量的深入发展,而且还可作为摄影测量学与近景摄影测量学的补充教材,以及为土木工程、车辆工程、材料工程等其他相关领域的师生、工程技术人员和研究团队提供学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速视频测量理论方法与工程应用/童小华等著. —北京:科学出版社, 2019.6

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-060688-4

I. ①高… II. ①童… III. ①视频系统—测量技术—应用—土木工程—工程测量 IV. ①TN94 ②TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 039360 号

责任编辑:朱 丽 石 珺 / 责任校对:何艳萍

责任印制:吴兆东 / 封面设计:图阅社

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张:21

字数:500 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”规划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年规划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

序

我非常高兴看到关于高速视频测量理论方法与工程应用的著作出版。高速视频测量是摄影测量的最新发展,其是利用高速相机获取运动目标的海量影像序列来精密测量被测目标的位置、形状和运动参数等,具有非接触、三维测量和密集测量的优势。到目前为止,国内外尚未有系统全面介绍高速视频测量理论、方法与工程应用的书籍。该书的出版,填补了这个领域的理论方法和工程应用空白,对于完善和发展摄影测量理论方法、推动高速视频测量在土木工程等领域的应用,具有重要的理论意义和实用价值。

童小华教授及团队一直致力于测绘遥感与空间信息理论方法的研究。本书系统总结了过去 10 多年来他们在高速视频测量理论方法和工程应用方面的主要研究成果。全书共三篇 11 章。第一篇是理论方法篇,主要介绍高速视频测量理论、视频序列影像处理方法、结构形变参数计算与分析;第二篇是软硬件系统篇,主要介绍高速视频测量分布式系统、硬件系统、软件系统;第三篇是工程应用篇,主要介绍高速视频测量在振动台实验、结构倒塌实验和结构表面场形变监测中的应用。

纵观全书,该书具有以下特点:

科学性: 该书为高速视频测量的发展奠定了理论基础。该书所提出的一系列新的理论方法和数学模型均建立在严密的数学理论上,如影像序列椭圆形目标点的识别与跟踪方法、影像序列编码目标点的自动识别与跟踪算法模型、基于可信度引导的左右影像立体匹配策略、基于相位相关的前后序列影像亚像素级匹配方法等。

系统性: 该书系统构建了高速视频测量理论方法体系,包括高速视频测量传感器网络的构建与检校、目标点识别与定位、左右影像目标立体匹配、前后序列影像目标跟踪、目标点时序三维坐标计算、结构形变参数计算、结构表面形变场计算、结构损伤识别与分析等。

创新性: 该书内容在多个方面体现了创新性成果,如高速视频测量海量影像序列快速处理方法,提高了其处理效率;提出了可信度引导的左右影像立体匹配方法,提高了序列影像立体匹配的效率和精度;提出了基于相位相关的亚像素级匹配方法,提高了前后序列影像目标点跟踪的精度;建立了高速视频测量结构形变参数计算与分析方法等。

实用性: 该书基于高速视频测量理论方法,面向土木等工程实验的精密测量需求,构建了高速视频分布式测量系统,自主研发了高速视频测量软硬件集成系统,并应用于实际工程和实验,如在地震振动台实验、结构连续倒塌实验和结构表面场形变监测中的应用,解决了传统测试手段在结构精密测量中存在量程有限、测量区域小、安装费时费力、增加模型质量、单一维度监测、需稳定安装平台等问题。

高速视频测量理论方法的深入研究将加快非接触式结构测量技术的发展、满足结构精密测试的需求，是一个值得深入研究的课题。该书体现了高速视频测量理论方法及工程应用方面取得的重要进展，希望未来可以有更多的研究人员在高速视频测量领域开展研究，努力推动高速视频测量理论和实践的进一步发展。



清华大学土木工程系教授
2019年3月16日于清华园

前 言

高速视频测量 (high-speed videogrammetry) 是近景摄影测量 (close-range photogrammetry) 的一个分支, 研究对象是处于运动状态的物体, 其优点是在非接触的状态下, 以视频或影像序列的形式瞬时记录运动物体的空间位置和状态, 并通过摄影测量解析处理, 获取运动物体特征点的高精度三维空间坐标, 分析每张或每对像片中物体目标点的三维空间坐标变化, 从而对运动物体的特征进行定性和定量分析, 描述物体的运动轨迹和运动参数, 以确定物体的整体运动状态。

随着现代科学技术的发展, 生产过程正在不断向高速化和复杂化方向发展, 人们逐渐开始关注处于高速运动状态中物体的空间信息变化, 但是普通相机的低帧频很难满足需求, 迫切需要高帧频、高分辨率的相机以实现对高速运动状态下物体的视频测量。随着数字传感器技术的发展, 尤其是电荷耦合器件 (charge coupled device, 简称 CCD) 和互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, 简称 CMOS) 传感器的飞速发展, 促使高速工业相机诞生。高速工业相机配以高精度同步控制器和高速数据采集卡等设备, 为研究高速运动状态下物体变化而进行的高帧频、高精度视频测量提供了硬件条件。高速视频测量也逐渐成为一门新兴学科, 其具有非接触、高帧频、三维密集测量的优势, 可以监测处于高速运动状态下的物体, 并获取运动物体的三维动态响应。高速视频测量已经在土木工程、考古学、航空学、外科学和工业检查等领域展开了较为广泛的应用。

本书系统介绍了高速视频测量系统构建及影像序列处理与分析的关键问题, 并重点介绍了高速视频测量在土木工程中的应用, 希望从原理以及实际应用的角度给出相应的解决方法。本书通过理论方法、软硬件系统和工程应用三篇详细介绍了高速视频测量的原理与技术方法及在土木工程中的应用, 主要包括以下内容:

(1) 理论方法篇。介绍了高速视频测量原理、高速视频测量坐标系和高速视频测量空间解析等基本理论; 介绍目标点识别与定位、左右影像目标立体匹配、前后序列影像目标跟踪等视频序列处理方法; 介绍目标点时序三维坐标计算、结构形变参数计算、结构表面形变场计算和结构损伤识别与分析等结构形变参数计算与分析方法。

(2) 软硬件系统篇。介绍高速视频测量分布式系统构建、传感器网络检校和高速视频测量精度分析等; 介绍高速相机传感器网络、同步控制系统、高速采集系统、高速传输系统、高速存储系统和光源照明系统等硬件系统; 介绍高速视频测量软件系统和分布式高速视频测量软件系统。

(3) 工程应用篇。主要介绍高速视频测量在地震振动台实验中的应用、高速视频测量在结构倒塌实验中的应用和散斑高速视频测量在结构表面场形变监测中的应用。

本书在研究和撰写的过程中, 得到了课题组各位老师和学生的大力支持和帮助, 叶

真博士、博士研究生郑守住、硕士研究生汪本康参加了部分章节的撰写。值此书稿完成之际，感谢谢欢教授、许雄副研究员、金雁敏博士、柳思聪博士、魏超博士提供技术指导，感谢栾奎峰博士、李凌云博士、梅华丰硕士、胡欧玲硕士等提供的技术支持和实验协助；感谢同济大学顾祥林教授、陈以一教授、何敏娟教授、赵宪忠教授、石振明教授、赵程副教授、陈素文副教授、曹文清高级工程师、葛雪老师、宋晓滨副教授等的大力支持帮助，提供实验建筑物模型对象；感谢同济大学黄宝峰博士、李毅博士、闫伸博士、律清博士、陈越时博士、华晶晶博士、占兵硕士、李秋云硕士、吴亚杰硕士等同学协助完成高速视频测量实验数据采集；感谢同济大学土木工程防灾国家重点实验室、中国科学院西安光学精密机械研究所、凌云光技术集团有限责任公司和北京科天健图像技术有限公司等提供高速视频测量实验的支持。还有很多老师、同学和单位提供了支持帮助，在此，向他们致以衷心的感谢。本书的研究得到了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点和面上项目等资助，在此一并表示感谢。

希望本书的出版，能为国内同行科研工作者提供便利与参考，进一步推进高速视频测量的深入发展。由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者不吝赐教。

著 者

2019年1月

目 录

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

序

前言

第1章 概论	1
1.1 高速视频测量的定义	1
1.2 高速视频测量的发展	2
1.3 高速视频测量的用途	5
1.4 高速视频测量的国内外研究现状	7
1.4.1 高速视频测量技术的国内外研究现状	7
1.4.2 高速视频测量应用的国内外研究现状	10
1.5 高速视频测量的关键问题	13

第一篇 理论方法

第2章 高速视频测量理论	17
2.1 高速视频测量原理	17
2.1.1 高速视频测量传感网络构建原理	17
2.1.2 高速视频测量海量影像序列处理原理	21
2.2 高速视频测量坐标系	23
2.2.1 高速视频测量像素坐标系	23
2.2.2 高速视频测量像平面坐标系	23
2.2.3 高速视频测量像空间坐标系	24
2.2.4 高速视频测量像空间辅助坐标系	24
2.2.5 高速视频测量地面摄影测量坐标系	24
2.2.6 高速视频测量内外方位元素	25
2.3 基于共线条件方程的高速视频测量空间解析	26
2.3.1 高速视频测量共线条件方程	26
2.3.2 高速视频测量后方交会-前方交会	28
2.3.3 高速视频测量直接线性变换	31
2.3.4 高速视频测量序列影像整体光束法平差	33
2.4 基于共面条件方程的高速视频测量空间解析	37
2.4.1 高速视频测量共面条件方程	37

2.4.2 高速视频测量相对定向-绝对定向	38
2.5 高速视频测量传感器网络检校	43
2.5.1 高速相机传感器网络检校	43
2.5.2 高速相机传感器网络同步性检校	55
第3章 视频序列影像处理方法	56
3.1 目标点识别与定位	56
3.1.1 椭圆目标点识别与定位	56
3.1.2 目标点自动识别与定位	67
3.1.3 编码目标点识别与定位	71
3.1.4 散斑目标点识别与定位	88
3.2 左右影像目标立体匹配	96
3.2.1 左右点集配准	96
3.2.2 基于灰度相关的立体匹配策略	99
3.2.3 基于核线约束的立体匹配策略	99
3.2.4 基于可信度引导的立体匹配策略	101
3.3 前后序列影像目标跟踪	103
3.3.1 基于灰度的亚像素级匹配方法	103
3.3.2 基于相位相关的亚像素级匹配方法	108
3.3.3 序列影像目标点跟踪策略	113
第4章 结构形变参数计算与分析	116
4.1 结构形变参数计算	116
4.1.1 位移参数计算	116
4.1.2 变形参数计算	116
4.1.3 速度参数计算	117
4.1.4 加速度参数计算	118
4.1.5 频谱参数计算	118
4.1.6 应变参数计算	119
4.1.7 时序数据降噪	120
4.2 结构表面形变场计算	124
4.2.1 位移场计算	124
4.2.2 应变场计算	125
4.3 结构损伤识别与分析	126
4.3.1 时序序列结构损伤识别	126
4.3.2 结构表面裂纹探测	139

第二篇 软硬件系统

第 5 章 高速视频测量分布式系统	147
5.1 分布式系统组成	147
5.2 分布式硬件系统构建	147
5.2.1 高速相机网络构建	147
5.2.2 工控机-主控机网络构建	148
5.2.3 硬件系统需求分析	150
5.3 分布式软件系统构建	150
5.3.1 分布式高速视频测量解析	150
5.3.2 软件系统需求分析	151
5.3.3 系统加速并行计算	154
5.4 工程方案设计	157
5.4.1 实验流程介绍	157
5.4.2 高速视频测量精度分析	161
第 6 章 硬件系统	164
6.1 高速相机传感器网络	164
6.1.1 传感器网络设计	164
6.1.2 传感器网络构建	165
6.2 高速相机成像系统	165
6.2.1 高速相机	165
6.2.2 高速成像系统组成及描述	168
6.3 同步控制系统	169
6.4 高速采集存储系统	170
6.5 光源照明系统	170
6.6 UPS 电源系统	171
第 7 章 软件系统	172
7.1 高速视频测量软件系统	172
7.1.1 系统设计	172
7.1.2 功能模块设计	173
7.1.3 高速视频测量系统 v1.0 介绍	182
7.2 分布式高速视频测量软件系统	201
7.2.1 系统设计	201
7.2.2 新增功能模块设计	202
7.2.3 分布式系统模型	202
7.2.4 分布式高速视频测量系统 v1.0 介绍	203

第三篇 工程应用

第 8 章 高速视频测量在振动台实验的应用	215
8.1 多层框架结构抗震稳健性振动台高速视频测量	215
8.1.1 实验背景与模型设计	215
8.1.2 高速视频测量方案	216
8.1.3 数据结果与分析	218
8.2 板式橡胶支座振动台高速视频测量实验	225
8.2.1 实验背景与模型设计	225
8.2.2 高速视频测量方案	225
8.2.3 数据结果与分析	228
8.3 堰塞湖堆积坝体模型振动台高速视频测量	233
8.3.1 实验背景与模型	233
8.3.2 高速视频测量方案	234
8.3.3 结果与分析	236
8.4 高层木塔振动台高速视频测量	240
8.4.1 实验背景与模型设计	240
8.4.2 高速视频测量方案	241
8.4.3 结果与分析	242
8.5 三层框架振动台分布式高速视频测量	243
8.5.1 实验背景与模型设计	243
8.5.2 高速视频测量方案	243
8.5.3 结果与分析	245
8.6 高层建筑振动台高速视频测量	248
8.6.1 实验背景与模型设计	248
8.6.2 高速视频测量方案	248
8.6.3 结果与分析	249
8.7 卫星颤振振动台模拟测试高速视频测量	250
8.7.1 实验背景与模型设计	250
8.7.2 高速视频测量方案	251
8.7.3 结果与分析	251
第 9 章 高速视频测量在结构倒塌实验中的应用	253
9.1 钢筋混凝土框架-剪力墙结构连续整体倒塌高速视频测量	253
9.1.1 实验背景与模型设计	253
9.1.2 高速视频测量方案	253
9.1.3 数据结果与分析	254

9.2 桁架倒塌实验高速视频测量	267
9.2.1 实验背景与模型设计	267
9.2.2 高速视频测量方案	268
9.2.3 结果与分析	269
9.3 网壳结构连续倒塌高速视频测量	279
9.3.1 实验背景与模型设计	279
9.3.2 高速视频测量方案	279
9.3.3 结果与分析	283
第 10 章 高速视频测量在结构表面场形变监测中的应用	287
10.1 岩石单轴受压断裂的表面位移场量测	287
10.1.1 实验背景与模型设计	287
10.1.2 高速视频测量方案	287
10.1.3 结果与分析	289
10.2 钢筋混凝土柱抗剪试验中的裂纹检测与特征提取	290
10.2.1 实验背景	290
10.2.2 高速视频测量方案	291
10.2.3 结果与分析	291
10.3 泥石流模拟冲击下的墙体全场形变监测	303
10.3.1 实验背景与模型设计	303
10.3.2 高速视频测量方案	304
10.3.3 结果与分析	304
第 11 章 结论与展望	307
11.1 结论	307
11.2 展望	309
参考文献	310

第 1 章 概 论

1.1 高速视频测量的定义

近景摄影测量 (Close Range Photogrammetry) 是一种通过采集图像和处理图像来确定目标外形和状态的非接触式技术,可以在瞬间以图像的方式获取被测物体的物理和几何信息,其不仅可以重复使用和长期存储,而且还可以通过解析摄影测量技术获取被测物体目标点的三维空间坐标,提供多种基于三维空间坐标的产品数据,如基础图形、数字表面模型 (Digital Surface Model, 简称 DSM)、数字正射影像 (Digital Orthophoto Map, 简称 DOM) 和三维动态序列影像 (冯文灏, 2000)。不仅如此,近景摄影测量还具有可在困难条件下工作,不伤及测量目标和不干扰被测物体的自然状态的优点。随着高分辨率数码相机和新的计算模型的发展,数字近景测量技术已经成为高自动化、高精度的三维坐标测量技术,这些技术已经广泛应用于土木工程 (Niederöst and Mass, 1997; Fraser and Riedel, 2000; Whiteman et al., 2002; Ryall and Fraser, 2002; Jáuregui et al., 2003; Ji, 2007; Yoneyama et al., 2007; Kovačič et al., 2011)、建筑学 (Bräuer-Burchardt and Voss, 2001; 刘亚文, 2004; Halim and Zulkepli, 2007)、交通事故现场处理 (Fraser et al., 2005, 2008)、工业 (Pappa et al., 2000; 程效军, 2001; Pappa et al., 2002; Lhuillier and Quan, 2005; 吕乃光等, 2007)、人体运动学 (Percoco, 2011) 和环境科学 (王秀美等, 2002) 等领域。可以说,数字近景摄影测量已经成为快捷、非接触的三维空间信息主要获取方式之一。

视频测量是近景摄影测量的分支和新发展。视频测量起源于 19 世纪 80 年代,随着索尼公司推出了世界上第一台电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, 简称 CCD) 数码相机,视频测量逐渐开始得到发展和应用,但受制于帧频和 CCD 分辨率的限制,视频测量应用并不广泛。19 世纪末,随着 CCD 传感器技术的不断发展,较高分辨率和较高帧频 CCD 的诞生促进了视频测量的发展和应用。Gruen (1997) 指出视频测量是一门集成了近景摄影测量和计算机视觉的科学,综合利用二者各自的优点发展起来的一门新的学科,能够采用非接触的形式快速乃至实时地进行密集测量,并且能获得高精度、可信的结果。它最大的优点是能够在一瞬间记录下物体的空间位置和状态,能及时地对动态物体进行定量分析,并能把动态物体的整个发生过程作为档案记录。冯文灏 (2000) 指出视频测量是根据近景摄影测量理论和方法,处理动态运动目标的图像序列。20 世纪初,随着互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor 简称, CMOS) 传感器技术的迅速发展,在传感器有效像素超过百万的前提下,帧频能达到上千帧。相比于 CCD 相机,CMOS 相机具有高帧频和数据传输速率快的优点,促进了视频测量向高速方向发展,高速视频测量逐渐在各个领域展开研究和应用。Black 等 (2003) 强调视频测量是一门计算三维目标坐标作为影像序列时间函数的科学,它将摄影测量学

扩展到多时间步长,以达到可以动态获取目标的特征信息。

高速视频测量是视频测量处理高速运动目标的新发展和新技术。近年来,随着现代科技的发展,生产过程正在不断向高速化和复杂化方向发展,人们逐渐开始关注处于高速运动状态中物体的空间信息变化,但是普通相机的低帧频难以满足需求,迫切需要更高帧频、高分辨率的相机以实现高速运动状态下物体的高速视频测量。因此,本书中高速视频测量的定义如下:以高速工业相机为核心构建,配以高精度同步控制器、高速数据采集卡、高速存储卡等设备,以非接触的形式获取高速运动目标的海量影像序列数据,并根据近景摄影测量理论和方法分析每张或每对像片中物体目标点的三维空间坐标变化,以确定物体的整体运动状态。

从高速相机传感器角度来分,分为基于 CCD 传感器的高速视频测量和基于 CMOS 传感器的高速视频测量。根据传感芯片的不同,高速相机可分为 CCD 高速相机和 CMOS 高速相机。无论 CCD 高速相机还是 CMOS 高速相机,它们的作用都是通过光电效用将光信号转换成电信号(电流/电压)进行存储以获得图像。高速相机是高速视频测量系统的核心部件,不仅需要考虑到采集速度、触发方式、分辨率、体积等因素,还需要考虑到光学接口、照明方式以及计算机接口等因素。其中,采集速度、分辨率和成像质量是高速视频测量系统需要首先考虑的因素。CCD 传感器在灵敏度、分辨率、成像质量等方面优于 CMOS 传感器,而 CMOS 传感器具有低成本、低能耗、高帧频、信息读取简单和高整合度的优点。近年来,CMOS 传感器技术在保持已有的优点前提下,不断改进在分辨率和灵敏度方面的不足,其性能逐渐接近甚至超过 CCD 传感器。而且,CMOS 高速相机还继续朝着高帧频和高分辨率的方向发展,有更广阔的发展空间,逐渐成为影像传感器的主流技术。

从高速相机帧频角度来分,可以分为低高速视频测量,中高速视频测量和超高速视频测量。低高速视频测量的高速相机帧频一般为 100~200 帧/s,中高速视频测量的高速相机帧频一般为 200~1000 帧/s,超高速视频测量的高速相机帧频一般为 1000 帧/s 以上乃至更高帧频。

1.2 高速视频测量的发展

高速视频测量是近景摄影测量的分支和新发展,其处理目标从静态变为动态,且向高速运动的方向发展。近景摄影测量隶属于摄影测量的范畴,其摄影距离一般小于 100m。高速视频测量是伴随着摄影测量技术和近景摄影测量技术的发展而不断创新和推广应用。摄影测量的历史可以追溯到 1839 年尼尔普斯和达盖尔发明的摄影术,距今已经有 180 多年的历史。真正意义上的摄影测量却是始于 1851~1859 年法国人 Aimé Laussedat 提出和应用的交会摄影测量,主要是针对地面建筑物进行的正直摄影测量,即近景摄影测量的一种方式。近景摄影测量是摄影测量的一个重要分支,是指摄影距离不大于 100m 以摄影手段确定目标的外形和运动状态的学科分支(冯文灏,2002)。所以从某种意义上说,摄影测量和近景摄影测量诞生于同一时刻,近景摄影测量是摄影测量各个分支的鼻祖。在第一次世界大战以前,近景摄影测量和摄影测量的发展几乎是一样的。

近景摄影测量的历史可以追溯到 1840 年法国人 Aimé Laussedat 研制的第一台摄影测量系统, 1849 年, Aimé Laussedat 首次利用地形图像进行地形图的绘制和编辑。随后 Laussedat 利用在屋顶拍摄的照片, 绘制了巴黎的平面图, 该成果于 1867 年在巴黎博览会上得到了展示。因为 Laussedat 在该领域开创性的研究, 其个人被人们称为“摄影测量之父”(Fryer, 2000; Mikhail et al., 2001; Burtch, 2004)。另一位在近景摄影测量领域做出开拓性贡献的科学家是普鲁士建筑学家 Meydenbauer, 其在 1882 年提出近景摄影测量的概念, 可以用于大到建筑摄影测量, 小到电子显微镜影像测量 (Fraser, 1998), 并在 1885 年在柏林建立国家实验室采用近景摄影测量的方式记录建筑物信息 (Fryer, 2000)。作为摄影测量学科体系中的重要分支之一的近景摄影测量, 在初始发展阶段, 由于科学技术的落后, 一直被人们所忽视。直到 20 世纪 60 年代, 当摄影测量工作者可以用廉价的、非定制的普通相机拍照采集影像数据时, 近景摄影测量这门学科才逐渐地开始被人们熟悉和了解。根据 Gruen (1997) 的有关研究, 近景摄影测量的历史主要包括四个阶段: 第一阶段 (1850~1984 年), 该阶段是近景摄影测量技术的基础理论建立和开发的阶段。这一时期的理论研究主要针对于图像处理算法、空间网络分析技术、电荷耦合元件的应用和最小二乘影像匹配方法。第二阶段 (1984~1988 年), 该阶段主要针对早期原型系统的研发, 其中包括仪器校准、CCD 数字图像系统、高速数据获取与处理系统等多个方面。当国际摄影测量学会 (International Society for Photogrammetry, 简称 ISP) 第五委员会更名为“近景摄影测量与计算机视觉”, 近景摄影测量进入了快速发展时期。第三阶段 (1988~1992 年), 在这一阶段近景摄影测量的研究得到了广泛的认同和改良。这一时期近景摄影测量得到了快速的发展、产生了各种各样的应用系统, 近景摄影测量的相关研究和应用得到了加速发展。随着全自动摄影测量系统的研制, 高精度近景摄影测量技术趋于成熟。第四阶段 (1992 年至今), 这一时期数字近景摄影测量得到了稳定的发展。其中很好的例子就是图像传感器的发展。在这一时期高密度、大格式和小像元的图像传感器得到制造。无支架、消费型数码相机的分辨率达到 140 万像素, 而且价格并不昂贵 (Eastman Kodak Company, 2004)。此外, 摄影测量系统中用到的其他元件的成本也有大幅度的降低。这种变化带来的结果是大范围、宽领域的工程研究的实现成为可能。

在 20 世纪 90 年代, 随着计算机技术的迅速发展和数码时代的到来, 高速视频测量逐步成为研究的热点问题。从传感器角度分辨率和帧频的角度, 高速视频测量的发展可以分为如下三个阶段:

第一阶段 (1970~1989 年), 该阶段是视频测量研究探索阶段。1970 年美国贝尔实验室的 Boyle 和 Smith 开发出固态成像器件和一维 CCD 模型器件以来, CCD 技术以图像质量的优势成为成像器件中的主导技术。1981 年, 索尼公司推出了世界上第一台 CCD 数码相机马维卡, CCD 尺寸为 $10 \times 12 \text{mm}$, 有效像素仅为 27.9 万, 马维卡的诞生, 标志着相机正式进入数码时代, 视频测量也逐渐开始得到发展和应用。该阶段高速视频测量的高速相机的传感器以 CCD 传感器为主, CCD 传感器有效像素较低, 帧频较低, 视频测量的应用并不广泛 (Bales, 1985; Li and Yuan, 1988)。

第二阶段 (1989~2002 年), 该阶段是视频测量的主要发展阶段。20 世纪 90 年代