



·总装部队军事训练“十二五”统编教材·

弹道特征参数 摄像测量

DANDAO TEZHENG CANSHU
SHEXIANG CELIANG

张三喜 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十二五”统编教材

弹道特征参数 摄像测量

张三喜 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

弹道特征参数摄像测量 / 张三喜主编. — 北京:
国防工业出版社, 2014. 3

总装部队军事训练“十二五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 09271 - 4

I. ①弹... II. ①张... III. ①弹道参数-摄影测量-
教材 IV. ①TJ012. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 033546 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 10 $\frac{7}{8}$ 字数 314 千字

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

总装备部军事训练统编教材
编审委员会
(2012)

主任委员 于建平

副主任委员 陈志敏 栗根文 蔡洙虎

委 员 王家伍 张海洋 李恒年

王泽民 姚志军 闫章更

白凤凯 康建勇 姜世忠

黄伟强

秘 书 石根柱 余敬春

弹道特征参数摄像测量

主 编 张三喜

编写人员 张伟光 李宏凯 胡小丽

吴海英 王维强 周志强

吴 健

主 审 姚 敏 柳 斌

前 言

针对常规靶场动态目标而开展的摄像测量是靶场测试的重要手段之一。飞行体的特征参数是火箭发射装备、发射火药及国防工程设计、定型、验收和故障诊断等过程的主要参数,准确地测量这些参数对提高武器效能和国防工程的防御能力意义重大。摄像测量技术是以几何光学为基础,融合成像技术、图像处理与分析技术、计算机技术等科学技术为一体,组成光机电一体化测量系统,通过获取被测物体在一定范围内的运动数字图像或数字图像序列,得到一幅或多幅认知周围环境信息的图像,并解算出被测物体的空间几何尺寸以及运动状态参数的技术。因摄像测量具有非接触性、测量精度高及速度快等特点,在测量和运动分析中具有广阔的应用前景。

本书从作者多年实践获得的经验与研究的成果中汲取营养,较全面系统地对现在以及将来靶场可能开展的摄像测量工作进行了阐述。全书介绍了摄像测量理论基础、2D 特征参数的高速摄像机测量、3D 特征参数的高速摄像机测量、3D 特征参数的光电经纬仪测量、高速数字狭缝摄像测量、立靶坐标测量、流场可视化测量以及运动图像目标特征信息提取等相关技术与方法;同时书中也介绍了作者同相关院所合作开发的摄像测量系统及运动分析系统。

全书由张三喜撰写和统稿,参与编写工作的还有张伟光(第 6 章)、李宏凯(第 7 章)、胡小丽和吴海英(第 8 章)、王维强(第 10 章)。周志强完成了本书的部分绘图、文字录入以及校对工作,吴健为本书查阅并提供了大量相关的文献材料,姚敏和柳斌对全书进行了审阅并提出了很多有益的建议。

在本书编写过程中,得到了很多人士的大力支持和帮助。感谢国防科学技术大学于起峰院士、文贡坚研究员、张小虎研究员和回炳伟博士,西安交通大学梁晋教授和肖振中博士,以及南京理工大学顾金良教授等,在同他们进行的项目合作中受益匪浅,许多学术构思和思想都得益于他们的研究成果。

编著者

2013年8月29日

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 弹道特征参数	1
1.2 摄像测量技术	5
1.3 摄像测量的特点与发展趋势	16
第 2 章 摄像测量理论基础	19
2.1 中心透视投影及常用的坐标系	19
2.2 共线方程与共面方程	22
2.3 相对定向	25
2.4 绝对定向	27
2.5 空间前方交会	33
2.6 光束平差	35
第 3 章 2D 特征参数的高速摄像机测量	43
3.1 概述	43
3.2 高速摄像机基本参数确定	45
3.3 数据处理	52
3.4 位移测量	56
3.5 速度测量	60
3.6 角度测量	64
3.7 坐标测量	66
3.8 稳瞄精度测量	71
3.9 引信性能测量	73
第 4 章 3D 特征参数的高速摄像机测量	80
4.1 测量原理	80
4.2 测量系统硬件与软件构成	84
4.3 摄像机标定	93
4.4 立体匹配及三维重建	107

4.5	测量系统精度分析	115
第5章	3D特征参数的光电经纬仪测量	125
5.1	概述	125
5.2	基于多特征点的姿态处理技术	130
5.3	基于目标中轴线的处理技术	133
5.4	基于目标模型的姿态测量	142
5.5	姿态测量精度分析	157
第6章	高速数字狭缝摄像测量	168
6.1	概述	168
6.2	高速数字狭缝摄像测量系统构成及工作原理	171
6.3	数字狭缝摄像系统测量原理	178
6.4	狭缝摄像系统自动测量实现方法	190
6.5	线阵摄像机内外方位元素标定	204
6.6	非同步条件下弹丸运动参数测量	207
第7章	立靶坐标测量	211
7.1	概述	211
7.2	立靶坐标测量系统构成	213
7.3	测量原理与数学模型	225
7.4	测量精度分析	228
7.5	目标提取	232
7.6	影响捕获率的因素	235
第8章	流场可视化测量	240
8.1	概述	240
8.2	膛口流场	243
8.3	流场可视化技术	248
8.4	阴影摄影技术	250
8.5	纹影测量系统	259
8.6	干涉摄影系统	267
第9章	运动图像目标特征信息提取	273
9.1	概述	273
9.2	人工标志	277
9.3	亚像素图像定位技术	281
9.4	人工标志点提取技术	286

9.5 中轴线提取技术	291
9.6 运动目标跟踪算法	296
第10章 运动分析系统	302
10.1 AutoTRACK 运动分析系统	302
10.2 视频图像判读系统	314
10.3 3D/6D 分析处理系统	325
10.4 高速运动分析系统	328
参考文献	335

第1章 概 论

在常规兵器试验中,通常采用摄像测量技术对发射机构及飞行目标的弹道特征参数进行记录和测量,观测目标的运动变化情况,对运动目标进行定性分析和弹丸运动参数的定量测量。由于靶场测量的对象都为高速运动目标,摄像测量常采用高速摄像系统来完成运动图像的获取。因为摄像测量是非接触测量,所以相对于在运动目标上安装传感器测量等其他测量技术而言,光学测量技术具有简单、方便、可靠、价格低等优势。选用摄像测量,只需用摄像机将运动目标的运动过程拍摄下来,再通过对所拍摄图像进行分析和处理,就可以得到目标运动时的动态参数。

摄像测量是利用各种摄像机,获取三维物体的二维图像,通过多个摄像机从不同方向拍摄的两幅或两幅以上的二维图像,利用交会原理,以及相对定向与绝对定向等技术综合获得物体的三维坐标,进而给出刚体目标的运动轨迹和姿态参数,也可重构出目标的曲面轮廓,完成对非刚体目标的测量。通过对摄像得到的图像进行的各种几何参数和其他参数的测量,都可认为是摄像测量的范畴。

1.1 弹道特征参数

1.1.1 适用范围及定义

1. 适用范围

摄像测量是常规兵器试验靶场中主要采取的测量技术之一,试验时将系统进行合理的布设,可记录武器系统的发射、初始段弹道和终点段弹道的运动过程。通过对记录的图像进行测量分析,可以获得有关

弹体本身各机构的变化、弹道诸元、命中率和威力等参数。主要应用方面有:

(1) 在火炮的动态测试中,可以用来了解装弹机构的工作情况和测量装填速度、击发机构的运动、平衡机构的运动、射击时后座运动和冲击振动;观测自行火炮车体的稳定性与射击振动对人员和设备的影响,以及测量射击时炮架的位移、炮口的跳动等。

(2) 在火箭弹、导弹等武器系统的飞行试验测试中,可以测量弹丸的攻角、偏航角、下沉角、旋转角速度、飞行速度和加速度等参数;观察尾翼张开和弹托分离情况;测量火箭的点火时间、离轨时间、离轨姿态、离轨速度、火箭二次点火的时刻、位置、速度等其他弹道数据。

(3) 在终点弹道段测试中,测量弹丸的着靶姿态角、弹丸爆炸碎片的数量、速度、脱靶量;引信的瞬发度、靶后作用距离;无线电引信的装订时间、炸点位置、近炸引信的炸高,以及爆炸冲击波等参数。

2. 弹道特征参数定义

本书中弹道特征参数是指弹丸特殊运动段的空间运动量(x, y, z)、姿态角(俯仰角、偏航角、攻角、滚转角或下沉、摇摆与旋转)、漂移量、变形量、发射机构或特殊装置的变形及其运动参数。如炮口的动力学响应,即其在三个方向的运动量和角度,弹丸的飞行姿态、流场的形状尺寸以及非刚体目标的变化过程等。所有这些运动参数统称为目标的特征参数。

飞行姿态是指弹轴在空间的方位。通常可以用俯仰角 φ 和偏航角 ψ 来表示^[1],或用章动角 δ 和进动角 γ 来表示。复攻角可用复数来表示,且

$$\bar{\xi} = \psi + i\varphi, \quad i = \sqrt{-1}$$

借助一个坐标系可以将 ψ 、 φ 、 δ 、 γ 的关系表示出来,如图 1-1 所示。

对于火箭、导弹及无人机等目标的三维姿态除图 1-1 所给的定义外,其姿态参数包括俯仰角、偏航角和滚转角的另一种定义如图 1-2 所示:

俯仰角(Pitch) φ : 目标中轴线与坐标系水平面 oxz 的夹角。

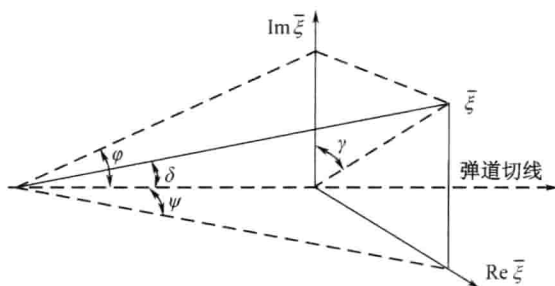


图 1-1 描述飞行体姿态角的坐标系

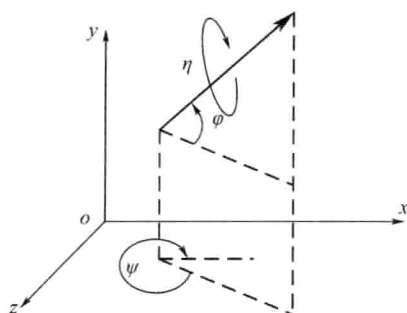


图 1-2 三维姿态参数的定义

偏航角(Yaw) ψ : 目标中轴线在坐标系水平面 oxz 上的投影与 ox 轴的夹角。

滚转角(Roll) η : 目标绕其中轴线旋转的角度。

以上定义的弹道特征参数的摄像测量技术,需要多种测量设备完成测量任务。在实施中,一般采用高速面阵摄像机和光电经纬仪来完成质点的坐标以及位移量、俯仰角、偏航角和滚转角的测量;采用数字狭缝摄像机测量弹丸的攻角参数和立靶坐标测量;采用一些特殊的成像技术完成特殊瞬态过程的可视化测量。这些内容将在各章节中分别介绍。

3. 数据的表述

由于测量和处理的方法不同,获取的目标特征参数分别由 2D、3D 及 6DOF(6 Degrees of Freedom)数据来表述。

(1) 2D 运动参数: 利用单目摄像机获取目标的二维数据,如位置

(x, y) 参数。

(2) 3D 运动参数: 利用双目或双目以上摄像机从不同的方向获取同一目标的运动信息, 计算目标的三维空间位置 (x, y, z) , 其他的运动参数由目标的位置信息来确定。

(3) 6DOF 运动参数: 利用单目摄像机获取刚体目标的位置和姿态 6DOF 参数[6D: (x, y, z) 、方位角、俯仰角和滚转角]。

本书中给出的弹道特征参数为: 目标的三个位置坐标 (x, y, z) 、刚体目标的三个姿态角(方位角、俯仰角、滚转角)和攻角。

1.1.2 弹道特征参数测量的目的及意义

飞行体的特征参数是火箭发射装备、发射火药及国防工程设计、定型、验收和故障诊断等过程的主要参数, 准确地测量这些参数对提高武器效能和国防工程的防御能力意义重大。常规武器靶场试验是研究火炮、火箭、导弹和无人机等武器系统的各种运动规律并提供其性能参数的一种科学手段。试验中需要应用各种仪器设备以及人为创造条件, 让武器系统在发射过程中的各种现象及其内在的关系在试验者的面前充分暴露, 通过各种测量数据的分析和处理, 帮助人们认识其基本规律和特性。可以认为靶场试验是一种目的性和计划性均很强的试验, 而试验的实施通常依赖于武器弹药系统的各种运动参数测试, 而这些参数的测试要依赖技术先进、性能可靠的测量设备, 尤其是光学设备。

完整描述一个刚体的运动需要三维位置和姿态组成的六维参数 $(x, y, z, \varphi, \psi, \eta)$ 。虽然在弹道分析和落点分析时, 经常采用简化的质点运动模型, 仅考虑三个位置参数 (x, y, z) , 但实际上目标在运动过程中必须保持正确的姿态才能保证按照预定的轨迹运动。例如火箭、导弹的飞行过程, 必须保持一定的姿态才能正常飞行; 炮弹必须以一定的射角和自旋射出炮膛才能稳定飞行到达预定落点。不仅如此, 保持正确的姿态还是飞行器执行飞行以外的任务所必须的。例如飞机飞行时保持一定的姿态不仅是稳定、安全飞行的需要, 也是机载导弹等武器正常发射的必要条件。许多新型武器为了保证对目标的打击效果, 不仅对落点精度有较高的要求, 还要求以一定的姿态攻击目标, 例如新型的反机场跑道导弹就必须以一定的角度射向跑道, 才能达到对跑道的最

佳毁伤效果。卫星在轨运行时为了完成特定的任务,对其姿态都有一定的要求。比如,通信卫星需要使其天线始终对准地面,对地观测卫星要求使其观测仪器的窗口始终对准地面。

保持姿态的前提是要能精确地测量姿态,因而特征参数测量在航空、航天、航海、工业等各个领域受到极大的重视。在航空航天领域,飞机、卫星、飞船的飞行过程,工业生产中机器人、自动导引车的动作过程等,都需要进行特征参数测量。在靶场试验中,准确获取飞行目标的三维姿态参数对于武器系统的设计、试验和定型等工作有重要的价值。尤其是在故障情况下,对目标特征参数的异常变化分析是故障定位的重要依据。另外,在导弹、载人飞船等发射过程中进行安全控制时,不仅要判断其弹道数据偏离理论弹道的程度,还要判断目标特征参数是否出现异常,据此决定启动自毁或航天员逃逸程序的时机,所以靶场安控也要求对目标特征参数进行测量。

1.2 摄像测量技术

1.2.1 摄像测量的概念

摄像测量(Videometrics 或 Videogrammetry)^[2]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(Photo-grammetry)、光学测量(Optical Measurement)与视觉测量(Vision Measurement)^[3]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。它的处理对象以数字(视频)序列图像为主。

摄像测量是研究利用摄像机、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,简称光测。

摄像测量的内涵^[4]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、高精度识别定位于匹配上。它与常规图像处理的不同在于更侧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。

具体而言,摄像测量至少要达到以下几个目标:

(1) 根据一幅或多幅图像,计算目标物体的几何参数,如物体的高度、宽度、远近距离及姿态等;

(2) 根据一幅或多幅图像,计算出目标物体的运动参数,如物体的运动速度、加速度及运动方向等;

(3) 根据一幅或多幅图像,计算出目标物体的表面物理特性,如光滑与粗糙及纹理等;

(4) 根据多幅二维图像,恢复出更大空间区域的图像,如根据不同角度拍摄的一组相互间存在重叠部分的目标图像,恢复出包含各图像序列信息的、完整的、高清晰的整个场景图像。

目前靶场开展的摄像测量主要有两种模式。一是采用非量测高速摄像机(内外参数都未知的摄像机)作为图像记录系统,定量进行测量;二是采用量测摄像机(内外参数都已知的摄像机)进行定量测量,即高速摄像机架设在经纬仪转台上,摄像机的内外参数已知。

利用非量测摄像机进行测量,需对摄像机的内外参数进行标定,事后对获取的图像进行处理,其原理类同与光电经纬仪的图像处理。利用光电经纬仪图像进行目标俯仰角、偏航角测量的一种最直接的

方法就是在点判读的基础上,根据摄影测量线交会确定空间点的原理,计算目标首尾两点的空间坐标,根据目标首尾两个空间点所确定的空间直线得到目标的俯仰角、偏航角。但是,对不同经纬仪图像上目标首尾点在判读时会产生较大的定位误差,导致较大的交会误差并最终影响俯仰、偏航角的测量精度;而且,当多台经纬仪拍摄到的不是目标的同一部分时,就不能形成两个以上点的交会,从而使该方法不适用。实际上,图像上目标的轮廓边界提供了更丰富的目标姿态信息,只是传统判读方法基于模拟图像、手工处理的模式难以高效、高精度地提取目标的轮廓边界,而随着数字图像及相应的处理技术的采用,图像上目标轮廓边界的自动、高精度提取已成为可能,利用目标的轮廓边界代替首尾两点测量目标三维姿态应更具有优势。于起峰院士等提出了中轴线面面交会测量目标三维姿态的方法以及文贡坚研究员等提出的基于目标模型的处理方法,已在靶场及国防工业部门的光学测量中得到应用。

1.2.2 摄像测量同其他学科的关系

摄影测量、光学测量和视觉测量是摄像测量的重要根基。

1. 摄影测量

摄影测量是测绘学科的一个分支,主要对摄影机提取的影像(二维)进行量测,测定物体在三维空间的位置、形状、大小、乃至物体的运动状态。摄影测量在近百年的历史中经历了:模拟、解析与数字摄影测量三个阶段。

所谓摄影测量^[5]利用对测量物体摄影所获得的图片来解求被摄物体的空间坐标和绘制设计图的理论、技术的测量方法。即利用各种摄影机,获取三维物体的二维图像,通过多个摄影机从不同方向拍摄的两幅或两幅以上的二维图像,利用交会原理,以及相对定向与绝对定向等技术综合获得物体的三维曲面轮廓。通过对摄影得到的光学图像进行的各种几何参数和其他参数的测量,都可认为是摄影测量的范畴。此法对被测物体上的采样点的非接触的三维数字化摄影测量的精度很高,而且很通用。摄影测量是光学图像处理的最重要和最普遍的应用之一。从传统意义上说摄影测量主要指对用各种照相机拍摄的可见光