不稳定平台晃动测量与修正方法研究

张小虎^{①②}, 刘进博^{①②*}, 刘铁军^③, 杜博军^③, 冯志义^③

① 国防科技大学航天科学与工程学院, 长沙 410073;

② 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 长沙 410073;

③ 白城兵器试验中心, 白城 137001

* E-mail: liujinbo2088@163.com

收稿日期: 2014-12-01; 接受日期: 2015-01-21

国家自然科学基金(批准号: 11272347)和湖南省自然科学基金(批准号: 12JJ2003)资助项目

摘要 不稳定平台晃动的测量与修正是工程实践中的一个难题, 直接影响着安装于其上的仪器设备的测量精度. 本文提出了一种基于摄像测量原理的不稳定平台晃动测量与修正方法, 以机动经纬仪为研究对象, 利用外置基准确定其基座平台的水平指北状态, 通过位姿估计的方法实时解算基座平台测量状态相对水平指北状态的姿态晃动量, 进而修正经纬仪观测误差. 研制了机动经纬仪基座平台晃动测量与修正系统, 并通过实验验证了系统对经纬仪观测角的修正精度, 结果表明: 1) 系统姿态测量灵敏度不大于 3"; 2) 系统修正误差随晃动幅度的增大而增大, 且晃动幅度小于 13' 条件下, 系统修正误差不大于 16".

关键词不稳定平台
机动经纬仪
摄像测量
观测角修正

1 引言

测量设备一般要求安装在稳定的基座平台上, 但是在很多应用情况下, 基座平台本身处于晃动或振动的环境中, 或者由于仪器设备在测量过程中相对基座平台的运动, 使得基座平台产生位置、姿态的晃动, 从而成为不稳定平台. 由于基座平台不稳定性的存在, 使得安装于其上的仪器设备的测量结果引入了基座平台晃动引起的误差, 降低了仪器的测量精度. 实际工程应用中存在着大量的不稳定平台, 其中不落地条件下的机动经纬仪基座平台就是一种较为典型的不稳定平台.

光电经纬仪是获取飞行目标弹道数据和飞行状态的最基本的跟踪测量设备. 国内靶场主要配备有两种类型的光电经纬仪^[1,2]: 一种是固定式经纬仪,

安装于固定塔台上, 测量精度高, 但机动性受限; 一种是机动经纬仪, 可以根据试验任务灵活布站, 在靶场的应用越来越广泛. 机动经纬仪有两种工作模式: 一种为落地测量, 即到达点位后, 利用液压支腿将整个车身落于地面, 优点是精度较高, 但需要较长时间调平基座平台; 另一种为不落地测量, 即到达点位后稍作准备, 然后开始测量, 优点是最大限度发挥了经纬仪的机动性, 更好的适应靶场试验任务未来发展趋势. 但是, 机动经纬仪在不落地测量过程中还存在一些问题: 1) 由于基座本身不落地, 随着经纬仪主镜的转动, 质心相对转轴产生的偏心力矩会使基座平台发生小幅晃动, 导致安装于其上的仪器设备精度有所降低; 2) 靶场试验任务中, 经纬仪观测结果必须统一到水平指北坐标系下才有意义, 但在不落地条件下, 基座平台高精度调平难度较大. 经纬仪的

引用格式: 张小虎, 刘进博, 刘铁军, 等. 不稳定平台晃动测量与修正方法研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 471–475

Zhang X H, Liu J B, Liu T J, et al. Measuring and correcting method for shaking platform of vehicle-mounted theodolite (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 471–475. doi: 10.1360/N092014-00422

作用距离一般为几公里甚至几十公里, 而晃动引起的基座平台位置变化为毫米量级, 对经纬仪观测结果的影响可以忽略不计, 但基座平台姿态晃动经过作用距离放大后, 对经纬仪最终交会结果产生很大影响^[3,4]. 调平误差也可看作是一种基座平台晃动误差, 因此测量经纬仪基座平台相对水平指北状态的姿态晃动量是提高机动经纬仪不落地测量精度的关键.

文献[5]以现有运动载体惯性导航姿态信息作为基础支撑信息, 以液浮平面作为绝对水平参考基准, 利用与地平坐标系相对稳定的平台作为过渡基准, 通过惯性平台和水平误差检测工具进行两级精密测量, 并对数据进行实时耦合, 实现运动载体基准面相对绝对大地水平基准的实时精密测量, 液浮平面的稳定性是影响该方法的决定性因素; 文献[6]分析了基座平台变形对光电经纬仪测角误差影响的基本原理, 提出了一种基于激光自准直的非接触式测量方法, 从而对测角误差进行修正, 该方法能够补偿 $\pm 0.7^\circ$ 范围内因基座平台变形导致的测角误差, 精度优于 $20''$; 文献[7]将基座平台变形分为平移变形和旋转变形两类, 并通过数值模拟论证了基座平台旋转变形是影响经纬仪测角误差的主要因素, 在此基础上提出了一种基于莫尔条纹与倾角传感器的基座平台旋转变形测量方法, 数据分析表明, 该方法可有效修正因基座平台旋转变形带来了经纬仪观测误差; 文献[8]利用在基座平台上两个垂直安装的水平传感器测得的角度及方向, 推导出基准平面倾角及最大倾斜方向, 并据此修正经纬仪测角误差.

本文提出了一种基于摄像测量原理的机动经纬仪基座平台晃动测量与修正方法, 利用外置基准确定其基座平台的水平指北状态, 通过位姿估计的方法实时解算基座平台测量状态相对水平指北状态的姿态晃动量, 进而修正经纬仪的观测误差^[9].

文章共分4个部分: 第2节详细阐述了基座平台晃动测量方法的基本原理, 是文章的核心内容; 第3节为实验部分, 从灵敏度、晃动幅度两个方面验证了方法的正确性与可行性; 第4节对文章进行了归纳总结, 并明确了下一步研究内容.

2 测量方法基本原理

机动经纬仪基座平台晃动测量方法的基本思想

是: 在机动经纬仪外部、像机视场内放置一小型、易调平基准, 利用位姿估计方法解算基座平台测量状态相对水平指北状态的晃动量. 为说明方法原理, 首先定义以下5个坐标系.

基座平台标称坐标系 $O_s - X^s Y^s Z^s$: 原点为经纬仪水平轴和垂直轴交点, Y 轴沿铅锤方向向上, Z 轴与水平轴重合, X 轴指向大地北, 定义经纬仪基座平台水平指北状态为标称状态.

基座平台测量坐标系 $O_T - X^T Y^T Z^T$: 无晃动条件下与标称坐标系重合, 测量坐标系固连于基座平台上, 基座平台晃动时, 基座平台测量坐标系相对基座平台标称坐标系的角度变化量 $(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$ 即为平台姿态晃动量.

像机坐标系 $O_c - X^c Y^c Z^c$: 原点为像机光心, Z 轴沿光轴方向向前, X, Y 轴与图像坐标系 x, y 轴指向相同.

基准坐标系 $O_B - X^B Y^B Z^B$: 以基准上任一特征点为原点, Y 轴沿铅锤方向向上, X, Y, Z 轴构成右手坐标系.

基座平台标定坐标系 $O_T - X^T Y^T Z^T$: 原点为经纬仪水平轴和垂直轴交点, Y 轴沿铅锤方向向上, X, Y, Z 轴构成右手坐标系.

如图1所示, 像机安装于经纬仪基座平台上, 记 H^{CT} 为像机坐标系到基座平台测量坐标系的齐次转换矩阵, H^{CT} 可通过手眼标定的方法解算得到^[9], 假定已知; H^{BC} 基准坐标系到像机坐标系的齐次转换矩阵, 通过位姿估计方法计算得到. 经纬仪精确调平状态下, 基座平台标定坐标系到基准坐标系的齐次转换矩阵 H^{TB}

$$H^{TB} = (H^{CT} H^{BC})^{-1}, \quad (1)$$

图1 组合测量原理示意图

记

$$H^{\text{TB}} = \begin{pmatrix} R^{\text{TB}} & T^{\text{TB}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

对姿态矩阵进行欧拉角分解:

$$R^{\text{TB}} = R_Y(\tilde{\beta}) R_X(\tilde{\alpha}) R_Z(\tilde{\gamma}), \quad (3)$$

$\tilde{\alpha}$, $\tilde{\gamma}$ 即为基座平台标定坐标系 X , Z 轴与水平面的关系.

机动经纬仪在 0 时刻指北时, 基座平台测量坐标系到基准坐标系的齐次变换矩阵 H_0^{TB}

$$H_0^{\text{TB}} = (H^{\text{CT}} H_0^{\text{BC}})^{-1}. \quad (4)$$

姿态旋转矩阵 R_0^{TB}

$$R_0^{\text{TB}} = R_Y(\beta_0) R_X(\alpha_0) R_Z(\gamma_0), \quad (5)$$

则基座平台标称坐标系到基准坐标系的齐次变换矩阵 H^{SB}

$$H^{\text{SB}} = \begin{pmatrix} R^{\text{SB}} & T_0^{\text{TB}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中,

$$R^{\text{SB}} = R_Y(\beta_0) R_X(\tilde{\alpha}) R_Z(\tilde{\gamma}). \quad (7)$$

i 时刻基座平台测量坐标系到基准坐标系的齐次变换矩阵 H_i^{TB}

$$H_i^{\text{TB}} = (H^{\text{CT}} H_i^{\text{BC}})^{-1}, \quad (8)$$

i 时刻基座平台测量坐标系到基座平台标称坐标系的齐次变换矩阵 H_i^{TS}

$$H_i^{\text{TS}} = (H^{\text{SB}})^{-1} H_i^{\text{TB}}, \quad (9)$$

记

$$H_i^{\text{TS}} = \begin{pmatrix} R_i^{\text{TS}} & T_i^{\text{TS}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

按欧拉角分解姿态旋转矩阵 R_i^{TS}

$$R_i^{\text{TS}} = R_Y(\Delta\beta) R_X(\Delta\alpha) R_Z(\Delta\gamma), \quad (11)$$

$\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$ 即为基座平台测量状态相对标称状态的姿态晃动量.

相机内参数标定误差、合作标志个数及空间分布是影响本文方法精度的主要因素, 文献[9]对此进行了深入研究, 并得到以下结论: 1) 相机位姿测量误差随主点噪声的增大而增大; 2) 等效焦距误差仅影响相机位置的测量精度; 3) 相机位姿测量误差随合作标志点位置噪声增大而增大; 4) 相机位姿测量误

差随合作标志点像点提取噪声增大而增大; 5) 当合作标志个数由 4 增加到 7 时, 相机位姿测量精度有明显提高, 而当合作标志个数超过 7 个时, 相机位姿测量精度虽然随合作标志个数的增加而提高, 但不明显.

3 实验

在上述方法原理基础上, 研制了机动经纬仪基座平台晃动测量与修正系统, 为评价系统的测量灵敏度及对经纬仪观测角的修正精度, 设计了两类实验: 灵敏度实验和固定目标观测角比对实验.

3.1 灵敏度实验

理论上, 当像机与基准标志物相对静止时, 系统测量得到的基座平台晃动变化量应为 0. 但是实际情况并不是这样的, 受制造工艺的限制, 像机在对特征点成像的同时不可避免的引入图像噪声, 使得特征点提取不稳定, 进而导致系统测量得到的基座平台晃动变化量在零上下波动, 波动幅值的统计结果可以作为系统灵敏度的衡量标准.

实验硬件布置如图 2 所示, 像机与基准标志物放置于地面上, 基准标志物在像机视场中可清晰成像, 统计系统晃动变化量的 RMS 值即为灵敏度, ΔAX 表示像机俯仰方向, ΔAY 表示像机偏航方向, ΔAZ 表示像机滚转方向(图 3). 实验结果表明: 系统姿态测量灵敏度不大于 3"(表 1).

3.2 固定目标观测角比对实验

固定目标观测角比对实验硬件布置如图 4 所示, 像机固连于经纬仪基座平台, 安装关系已标定; 水平基准置于地面, 且在像机视场内成像清晰. 调平状态下, 经纬仪对目标的观测结果为 $\tilde{E}$ 和 $\tilde{A}$, 记为真值; 调节液压支腿模拟平台晃动, 该状态下经纬仪对同一目标的观测结果为 E^T 和 A^T , 记为测量值; 系统测量得到的基座平台晃动量为 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$.

图 2 灵敏度实验硬件布置示意图

图3 (网络版彩图)灵敏度实验结果

表1 灵敏度测量实验统计结果

姿态误差 RMS(")	
ΔAX	1.4
ΔAY	2.1
ΔAZ	2.8

图4 固定目标观测角比对实验硬件布置示意图

根据修正公式^[10]可得

$$\begin{bmatrix} E^S & A^S \end{bmatrix} = f(E^T, A^T, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma),$$

修正误差记为

$$\text{error} = \text{RMS}(\begin{bmatrix} E^S & A^S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{E} & \tilde{A} \end{bmatrix}).$$

对比测量值修正前后与真值得差异,统计修正误差,结果表明:系统修正误差随晃动幅度的增大而

表2 固定目标观测角比对实验统计结果

		方位角(")	高低角(")
状态1	修正前	31.4	183.5
	修正后	9.8	10.4
状态2	修正前	54.4	369.9
	修正后	10.2	14.5
状态3	修正前	72.5	459.2
	修正后	11.0	15.6

图5 固定目标观测角比对实验结果

(a) 方位角修正前后对比; (b) 高低角修正前后对比

增大,且基座平台晃动幅度小于13'条件下,系统修正误差不大于16"(表2,图5).

4 总结

靶场实验任务中,目标外弹道参数测量的准确性与稳定性非常重要.机动经纬仪不落地测量过程中,基座平台受自身及环境因素影响发生晃动而成为不稳定平台.本文将摄像测量技术应用于不稳定平台晃动测量中,有效提高了机动经纬仪不落地测量精度,具有重要的理论研究意义和广阔的工程应用前景.本文的研究成果可以归结为以下两个结论.

1) 灵敏度实验主要研究了系统能够敏感的最小姿态晃动量,结果表明:系统姿态测量灵敏度不大于3";

2) 固定目标观测角比对实验主要研究了晃动幅度对观测角修正误差的影响,结果表明:系统修正误差随晃动幅度的增大而增大,且晃动幅度小于13'条件下,修正误差不大于16".

在本文研究的基础上,对不同环境、不同结构、不同模式下仪器设备的安装平台晃动问题进行深入研究,为设计更加可靠、精度更高、针对性更强的不稳定平台晃动测量与修正系统提供理论基础.

参考文献

- 1 Zhao X Y, Li Y C. Optical Measurement in Shooting Range. Beijing: Institute of Command and Technology, 2000. 4–35
- 2 Zhang Y Y. The Research of Vehicle Plane Distortion Measuring and Error Emendation Technology. Dissertation for the Doctoral Degree. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2003
- 3 Liu J B, Zhang X H, Liu H B, et al. Correction Method for non-landing measuring of vehicle-mounted theodolite based on static datum conversion. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 2268–2277
- 4 Liu J B, Zhang X H, Liu H B, et al. New method for camera pose estimation based on line correspondence. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 2787–2797
- 5 王晓明. 光学实时水平基准测量方法研究. 博士学位论文. 长春: 中国科学院大学, 2013
- 6 王涛, 唐杰, 宋立维. 车载光电经纬仪的测量误差修正. *红外与激光工程*, 2012, 41: 1335–1338
- 7 佟刚, 王芳. 车载平台变形对测角误差的影响分析与修正. *光学精密工程*, 2011, 19: 775–781
- 8 姜伟伟, 高云国, 冯栋彦, 等. 车载光电经纬仪基准平面测角误差修正. *兵工学报*, 2009, 30: 1638–1641
- 9 刘进博. 基于摄像测量的平台绝对晃动量测量及修正方法研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2012
- 10 周剑. 靶场动平台光学测量问题研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2012

Measuring and correcting method for shaking platform of vehicle-mounted theodolite

ZHANG XiaoHu^{1,2}, LIU JinBo^{1,2}, LIU TieJun³, DU BoJun³ & FENG ZhiYi³

¹ College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

² Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Vision Navigation, Changsha 410073, China;

³ Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng 137001, China

Measuring and correcting for shaking of unstable platform is a problem in engineering, which has a significant effect on instruments' precision. We proposed a measuring and correcting method for unstable platform based on videometrics. Take vehicle-mounted theodolite for instance. Determine nominal state of platform by external datum, and calculate platform's shaking related to nominal state utilizing pose estimation algorithms. Furthermore, correct theodolite's observation error. We develop a measuring and correcting system. The method has been validated by experiments. Experiments' results indicate that: 1) The system's sensitivity exceeds 3"; 2) Correcting error increases with shaking's amplitude, and exceeds 16" on condition that shaking's amplitude is less than 13'.

unstable platform, vehicle-mounted theodolite, videometrics, error correcting

doi: 10.1360/N092014-00422