

引用格式:李涵阳,胡耀升.某机载高速影像测量系统精度分析方法及验证[J].电光与控制,2021,28(5):94-97. LI H Y, HU Y S. Accuracy analysis and verification of an airborne high-speed image measurement system[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5):94-97.

某机载高速影像测量系统精度分析方法及验证

李涵阳, 胡耀升

(中国飞行试验研究院,西安 710089)

摘要: 根据某机试飞测试需求,需要在弹舱内采用摄影测量方法,在弹舱内相应位置安装高速摄像机,采用双目立体交会测量方法测试飞机不同高度下武器投射试验,检测武器舱的弹射武器分离过程、速度、姿态等。为了估算机载高速影像测试系统的精度,保证试飞测试的科学性和严谨性,提出了机载高速影像测量系统测量精度的理论分析方法,并通过设计测量自由落体的速度及精密转台的角速度两个实验,对所提出的理论分析方法进行了验证。实验结果表明,所提误差分析方法对某机载高速影像测试系统具有指导作用,为后续试飞中的测量精度估算提供了理论支撑。

关键词: 摄影测量; 双目立体交会测量; 武器弹射; 飞行试验

中图分类号: TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.021

Accuracy Analysis and Verification of an Airborne High-Speed Image Measurement System

LI Hanyang, HU Yaosheng

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: According to the flight test requirements of a type of aircraft, it is necessary to adopt photogrammetry in bomb bay, install high-speed cameras at the corresponding positions of the bay, and use binocular, stereo intersection measurement method to test the weapon projection test at different altitudes, thus to detect the separation process, speed, attitude and so on of the weapon in the bomb bay. To estimate the accuracy of the airborne high-speed image testing system, and ensure the preciseness of the flight test, a method is presented for theoretical analysis on measuring precision of the airborne high-speed image measurement system. Through two experiments of freely falling body and precise rotation platform, the proposed theoretical analysis method is verified. The experimental results show that the proposed error analysis method has a guiding effect on the airborne high-speed image testing system of a certain type of aircraft, which provides a theoretical support for the measurement accuracy estimation in the following flight tests.

Key words: photogrammetry; binocular stereo intersection measurement; weapon ejection; flight test

0 引言

摄影测量技术是指利用摄影系统拍摄目标的影像,通过对影像特征点坐标的测量获得目标的各种状态数据的技术^[1-2],该技术在飞行试验测试领域有广泛的应用,从飞行器轨迹测量到机翼变形测量,从飞行员座椅弹射到投弹轨迹分析,该技术在飞行试验测试中发挥了重要的作用。飞行试验摄影测量按获取相片时摄像机所处的位置,分为地面摄影测量和空中摄影

测量^[3-5]。地面摄影测量是以安装在地面上的摄像机所获得的相片为基础进行的测量,主要是通过对控制点和待测点像点坐标的测量,根据已知的摄像机的内、外方位元素,确定被测物体相对于摄影位置的方位线,再利用平面或空间交会计算或空间极坐标原理确定被测物体的位置、形状和姿态等^[6-9]。空中摄影测量是利用加装有专门摄像机的飞机(或其他飞行器)对地面、水面、空中目标进行摄影获取相片,并以此为基础进行的测量^[10-14]。

根据某机试飞测试需求,需要在弹舱内采用摄影测量方法,在弹舱内相应位置安装高速摄像机,采用双目立体交会测量方法测试飞机不同高度下武器投射试验,检测主武器舱的弹射武器分离过程、速度、姿态等。

收稿日期:2019-10-14

修回日期:2021-04-12

作者简介:李涵阳(1992—),男,辽宁北票人,硕士,助工,研究方向为光电测试。

双目立体交会测量方法,就是从2个视点观察同一物体得到不同视角下的感知图像,通过计算分析同一个三维点不同图像中对应图像点的视差来获取物体表面的三维形状信息。任务要求机载高速影像测量系统提供自身的测量精度,由于机载环境受空间位置、天气气候、光照度等条件的限制,且目前没有较为权威的测量参数的精度对比方法,需要通过实验对摄影测量技术自身的测量精度进行验证。

高速相机虽然刚性安装在飞机上,但由于飞行中的震动以及开舱门时气流的扰动,相机镜头会有轻微的抖动,造成测量系统的误差。为了避免由相机抖动造成的误差,该高速影像测量系统采用相应算法,在相机视野范围内的相应刚性位置布设了标志点,将武器的运动参数映射到弹舱内标志点所表征的参考系统内,以此消除相机抖动所产生的误差。为了估计算机载高速影像测试系统的精度,保证试飞测试的科学性和严谨性,本文提出了理论分析机载高速影像测量系统测量精度的分析方法,并通过设计测量自由落体的速度及精密转台的角速度两个实验,对所提出的机载高速影像测量系统测量精度的理论分析方法进行了验证。

1 测速精度分析方法

1.1 原理概述

为验证摄影测量方法测量物体速度的精度,搭建了双站交会测量自由落体速度的实验环境。道具为水瓶,忽略空气阻力影响,做自由落体运动。测量相机镜头焦距为12 mm的高速相机,2台相机基线距离约为6 m,距被测物约为6 m,相机帧频为200 帧/s。

1.2 理论误差分析方法

交会摄影测量模型如图1所示。

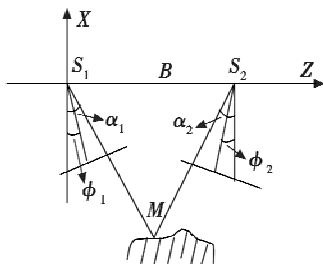


图1 交会摄影测量模型示意图

Fig.1 Diagram of intersection photogrammetry model

图中,\$S_1, S_2\$为左右摄像机。机体坐标系为:\$Z\$轴为基线方向,\$X\$轴为沿机轴方向,\$Y\$轴为垂直于机体水平面竖直向上。\$\phi_1, \phi_2\$分别为左右相片的偏角,\$B\$为交会摄像基线,\$M\$为交会测量点,\$\angle S_1MS_2\$为交会角。

根据该数学模型,交向摄影物方点的坐标误差为

$$M_x = \sqrt{2}k_1k_2 \frac{1 + \tan \alpha \tan \phi}{1 - \tan(\alpha - \phi) \tan \theta} m_x \quad (1)$$

$$M_y = k_2 \frac{\sec \phi}{1 - \tan(\alpha - \phi) \tan \phi} m_y \quad (2)$$

$$M_z = \frac{1 + \tan \alpha \tan \phi}{1 - \tan(\alpha - \phi) \tan \phi} m_x \cdot \sqrt{\left(k_2 - k_1k_2 \frac{x}{f}\right)^2 + \left(k_1k_2 \frac{x}{f}\right)^2} \quad (3)$$

式中:\$k_1, k_2\$为系数;\$f\$为相机镜头焦距;\$\alpha\$为相机光轴与\$X\$轴方向的夹角。

为简化精度解算模型,仅以两相机主光轴交点的物方坐标\$(x, y)\$为测量参考点时,\$\phi = \alpha, B = 2l \sin \phi, k_1 = \frac{1}{2} \cot \phi, k_2 = \frac{l}{f} \cos \phi, \frac{x}{f} = \tan \phi, l\$为相机到物体的距离,则式(1)~式(3)可简化为

$$M_x = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{l}{f} \csc \phi m_x \quad (4)$$

$$M_y = \frac{l}{f} m_y \quad (5)$$

$$M_z = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{l}{f} \sec \phi m_x \quad (6)$$

本次实验物距\$l=6\$ m,基线\$B=6\$ m,相机镜头焦距\$f=12\$ mm,其中,相片偏角\$\theta=30^\circ, (m_x, m_y)\$为像素偏差量,取标志点判读精度为1像素,约\$8 \mu\text{m}\$,经过计算得\$M_x=5.7\$ mm,\$M_y=6\$ mm,\$M_z=3.3\$ mm。

速度误差理论估计过程如下。在实际飞行试验中,机体震动、相片成像质量等因素会使测量误差增大,设相机实际交会测量误差\$d_s\$为10 mm,高速相机帧频为200 帧/s,取20个点,100 ms时间间隔,那么根据误差与时间的传播定律可计算出线位移平均速度的精度\$d_v = \frac{2d_s}{t} = 0.2\$ m/s。

1.3 实测误差分析

理论速度曲线与相机交会测量计算所得水瓶下落的速度曲线如图2所示。

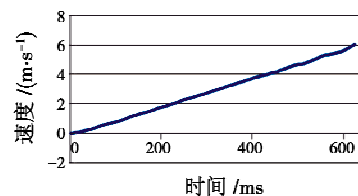


图2 测量速度曲线

Fig.2 Measured velocity

相减误差折线图见图3。

由实验可得,速度测量误差基本稳定在0.2 m/s附近,最大为0.29 m/s,与理论误差较为吻合。

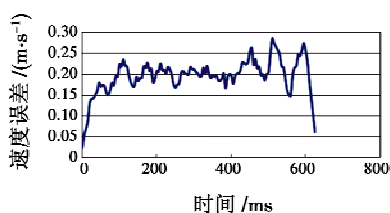


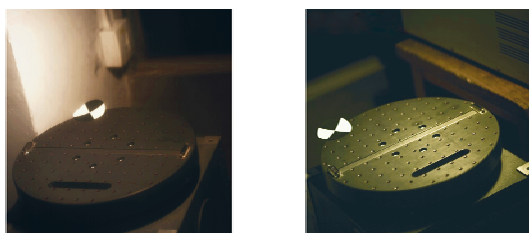
图 3 误差折线图

Fig. 3 Line graph of the error

2 角度及角速度测量精度分析方法

为验证摄影测量角度及角速度测量精度,搭建了双站交会测转台的实验环境。实验测量目标为 TES-3V 型精密低速转台,在定角间隔为 10° 时,角速率误差为 $-1.6 \times 10^{-4} (^\circ)/s$,校准证书有效期至 2019 年 10 月 15 日。转台以 $500 (^\circ)/s$ 和 $800 (^\circ)/s$ 的转速转动。相机配备镜头焦距为 50 mm,2 台相机基线距离约为 1.1 m,距被测物约 1.5 m,相机帧频为 500 帧/s。

图 4 所示为高速相机拍摄画面。



(a) A 站相机

(b) B 站相机

图 4 高速相机拍摄画面

Fig. 4 Pictures obtained by high-speed camera

2.1 角度及角速度理论计算分析

转台转动过程中,使用 2 个坐标点计算其转动角度和角速度的图解如图 5 所示。

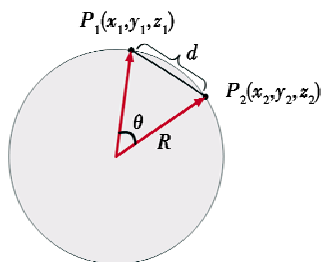


图 5 角度及角速度计算示意图

Fig. 5 Schematic diagrams for calculating angle and angular velocity

设 d 为 P_1 和 P_2 两点的斜距, R 为转台半径,则角度 θ 和角速度 ω 分别为

$$\theta = 2\arcsin \frac{d/2}{R} = 2\arcsin \frac{d}{2R} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\arcsin \frac{d}{2R}}{t} \quad (8)$$

以 20 ms 的时间间隔进行计算,则有 $\omega = 100\arcsin \frac{d}{2R}$

2.2 角度及角速度理论误差分析方法

根据上述误差推导公式,本次实验物距 $l = 1.5$ m,基线 $B = 1.1$ m,相机镜头焦距 $f = 50$ mm,其中,相片偏角 $\theta = 20^\circ$, (m_x, m_y) 为像素偏差量,取标志点判读精度为 1 个像素,约 $8 \mu\text{m}$,经过计算得 $M_x = 0.5$ mm, $M_y = 0.2$ mm, $M_z = 0.2$ mm。

角度及角速度误差理论估计过程如下。

以 d 为变量,对 θ 和 ω 求导, d 的误差传递公式为

$$\delta_\theta = \frac{d\theta}{dd} = \frac{2}{\sqrt{4R^2 - d^2}} \quad (9)$$

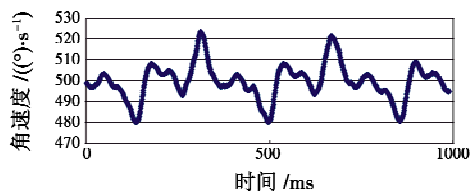
$$\delta_\omega = \frac{d\omega}{dd} = \frac{100}{\sqrt{4R^2 - d^2}} \quad (10)$$

依据上述误差计算结果,设 d 的计算误差为 1 mm,将转台半径 $R = 150$ mm 分别代入式(9)、式(10),则分别有 $\delta_\theta \approx 0.0067 \text{ rad} \approx 0.38^\circ$, $\delta_\omega \approx 0.333 \text{ rad/s} \approx 19 (^\circ)/s$ 。

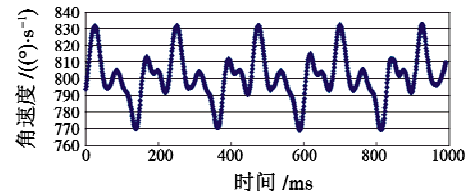
本次实验测量了 2 组数据,第一组数据转台角速度为 $500 (^\circ)/s$,第二组数据转台角速度为 $800 (^\circ)/s$ 。当角速度为 $500 (^\circ)/s$ 时,每 0.02 s 转过的角度为 10° ,则角度和角速度的误差百分比约为 3.8%;当角速度为 $800 (^\circ)/s$ 时,每 0.02 s 转过的角度为 16° ,则角度和角速度的误差百分比约为 2.4%。

2.3 测误差分析

相机交会测量计算所得转台角速度曲线如图 6 所示,误差曲线如图 7 所示。



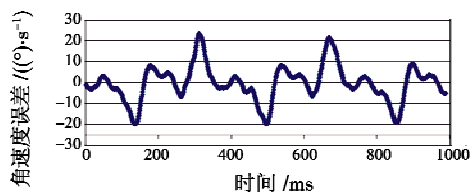
(a) 转台角速度为 $500 (^\circ)/s$



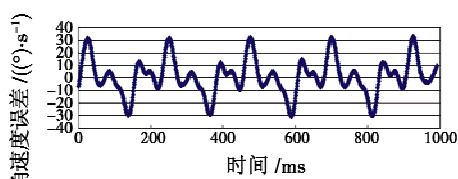
(b) 转台角速度为 $800 (^\circ)/s$

图 6 测量转台角速度曲线

Fig. 6 Angular velocity curve of the turntable



(a) 转台角速度为 $500 (^\circ)/s$



(b) 转台角速度为 800 (°)/s

图7 误差曲线图

Fig.7 Error curves

由实验可得:当转台角速度为 500 (°)/s 时,误差上下波动最大值为 23.3 (°)/s,误差百分比为 4.66%;当转台角速度为 800 (°)/s 时,误差上下波动最大值为 32.7 (°)/s,误差百分比为 4.08%。与理论计算值基本吻合。

3 结论

本文设计了自由落体测速、状态角速度测量 2 个实验验证了某机载高速影像测量系统的测量误差分析方法,实验结果为,理论误差公式推导出测速精度为 0.2 m/s,实验结果最大误差为 0.29 m/s,理论误差公式推导出角速度测量误差百分比在 500 (°)/s 角速度时为 3.8%,误差百分比在 800 (°)/s 角速度时为 2.4%,在 500 (°)/s 转台角速度时,误差百分比最大为 4.66%。800 (°)/s 转台角速度时,误差百分比最大为 4.08%。实验结果表明,本文提出的误差分析方法对某机载高速影像测试系统具有指导作用,为在后续科研试飞中的测量精度估算提供了有力的理论支撑。

参考文献

- [1] 唐志豪. 基于双目立体视觉的测量技术研究 [D]. 镇江:江苏大学,2006.
- [2] ASADA M, TANAKA T, HOSODA K. Visual tracking of unknown moving object by adaptive binocular visual servoing [C]//IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multi-sensor Fusion & Integration for Intelligent Systems, IEEE, 1999. doi:10.1109/MFI.1999.815998.
- [3] 何海,汤春林,孙华燕. 双目立体视觉在模型姿态监测中的应用研究[J]. 计算机技术与发展,2006,16(11):238-240.
- [4] 祝琨,杨唐文,阮秋琦,等. 基于双目视觉的运动物体实时跟踪与测距[J]. 机器人,2009,31(4):327-334.
- [5] 高庆吉,洪炳熔,阮玉峰. 基于异构双目视觉的全自主足球机器人导航[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(9):1029-1032,1088.
- [6] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用 [D]. 天津:天津大学,2005.
- [7] 张祖勋,苏国中,张剑清,等. 基于序列影像的飞机姿态跟踪测量方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(4):287-291.
- [8] 张辉,张丽艳,陈江,等. 基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定[J]. 航空学报,2007,28(3):695-701.
- [9] 崔恩坤. 高精度双目立体视觉测量系统关键技术研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2018.
- [10] 张颖秋. 无人机航空摄影测量在地形图测绘中的应用[J]. 中国非金属矿工业导刊,2015(5):59-62.
- [11] 孙朝阳,郑彦春,徐秀云. 无人机航空摄影测量技术在风能开发勘测方面的应用[J]. 电力勘测设计,2011(5):24-29.
- [12] 刘梅. 无人机航空摄影测量技术在矿山测量中的应用[J]. 世界有色金属,2019(5):36-37.
- [13] 张建花,张杰. 基于多视场拼接的飞机偏心定位距精确测量[J]. 应用光学,2018,39(3):379-384.
- [14] 胡丙华. 基于前视跑道图像的飞机偏心距精确测量 [J]. 应用光学,2016,37(4):590-594.



请扫描二维码关注我刊