

基于平行光管的空间目标姿态模拟研究

王涛¹, 田留德¹, 赵建科¹, 周艳¹, 王雨晨², 赵怀学¹, 刘镔¹, 潘亮¹, 刘艺宁¹, 王伟¹, 张婷¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

²西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

摘要 为了解决单台经纬仪室内姿态测试问题,在平行光管焦平面位置处放置刻有不同倾斜角线条的目标板,用以模拟无穷远目标的姿态。建立了目标板各象限线条中轴线上的点坐标与全站仪测试角度之间关系的数学模型,设计了测试用目标板,用全站仪对目标板各线条中轴线上的点进行了采样测试,通过数学模型解算出了线条中轴线的倾斜角。实验结果表明,1#与2#线条中轴线夹角模拟误差为 0.160° ,1#与3#线条中轴线夹角模拟误差为 0.046° ,可以满足单站图像中轴线斜率提取误差最大值为 0.6° 的要求。

关键词 测量; 平行光管; 姿态; 倾斜角; 模拟误差

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0612003

Research on Space Target Attitude Simulation Based on Collimator

Wang Tao¹, Tian Liude¹, Zhao Jianke¹, Zhou Yan¹, Wang Yuchen², Zhao Huaixue¹,
Liu Kai¹, Pan Liang¹, Liu Yining¹, Wan Wei¹, Zhang Ting¹

¹Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract In order to solve the indoor attitude testing problem of the single theodolite, a target board engraved with different angled lines is placed at the focal plane of collimator to simulate the attitude of infinity target. The mathematic model of the relationship between point coordinate on each quadrant of the target board and total station test angle is established, and the test target board is designed. Moreover, the total station is used to sample and test the points of the lines on target board, and the tilt angle of line is calculated through the mathematical model. The experimental results show that the simulation error of angle between line 1# and line 2# is 0.160° , and the simulation error of angle between line 1# and line 3# is 0.046° , which can satisfy the requirement of the single station image with maximum axis slope extraction error of 0.6° .

Key words measurement; collimator; attitude; tilt angle; simulation error

OCIS codes 120.4640; 120.1680; 120.4800

1 引 言

三维姿态(俯仰角、偏航角、滚动角)是反映飞机、火箭等飞行器在空中飞行状态的重要参数,精确测量飞行器的姿态对实验分析、事故鉴定、训练评估、飞控系统检验及新型号的设计定型等具有重要的工程应用价值,相关测量技术已受到国内外学者越来越多的关注^[1-3]。对于空中运动目标的定位、识别及航迹测量,光电经纬仪是迄今为止精度最高的外测光电仪器,它能够实时、动态跟踪目标,且不受

“黑障”、地面杂波等的影响,因此在航空、航天等科研领域的应用十分广泛^[4-6]。利用光电经纬仪对飞行器进行跟踪拍摄,以获取飞行器运动的实时序列图像,然后通过对图像的准实时或事后处理来获得其三维姿态,当前,姿态解算常用的方法有图像匹配法^[7-9]、中轴线法^[10]和人工标识法^[11-13]等,图像匹配法需要建立各种型号飞机的表面模型和光电经纬仪模拟系统,用模拟系统模拟出真实模型在不同条件下的飞机影像去比对真实影像,而且处理序列影像时需进行迭代运算,通用性较差,人工标识法是在机

收稿日期: 2017-12-11; 收到修改稿日期: 2018-01-15

基金项目: 中国科学院创新基金(Y154451ZZ0)、神光Ⅲ大科学工程资助项目(091Z512BOA)

作者简介: 王涛(1987-),男,硕士,工程师,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: 442888896@qq.com

身上涂特殊标记,通过分辨图像中标记的状态来确定飞机的姿态,一般只适合近距离情况(如起飞阶段或风洞实验等),中轴线法避免了匹配问题,而且适用于远距离,因此在姿态解算中被广泛应用。

中轴线法是对多台经纬仪采集的二维目标图像的中轴线进行提取,图像中轴线与经纬仪光学系统的光心连线确定一个平面,那么目标的空间中轴线就是各个摄像测量设备的图像中轴线与光学中心所确定平面的交线,得到了目标空间中轴线,即可求解空间姿态角。光电经纬仪交付用户前需要对各性能指标进行测试,受室内条件的限制,姿态测量精度只能在外场进行测试和鉴定,成本高昂。因此,本文研究了光电经纬仪室内姿态精度的测试方法,可以为靶场光测设备的设计和改进行提供数据支撑,对靶场光测设备的性能改进及发射场测控系统的发展具有重要意义^[14-16]。

2 姿态模拟原理与数学建模

影响姿态测量精度的变量有:经纬仪站址坐标、摄像坐标系、方位角和俯仰角、摄像机焦距以及目标图像中轴线的倾斜角和图像原点到中轴线的距离。根据当前靶场的测试条件对姿态测量精度进行仿真分析,仿真结果表明:图像目标中轴线倾斜角误差是最大的影响变量,其他变量影响相对较小,靶场现有的多站组合式光电经纬仪姿态测试误差为 1° 左右,将其分解到单站后,图像上的中轴线倾斜角提取误差最大为 0.6° ^[17-18]。因此光电经纬仪姿态测量精度的室内测试方法可简化为光电经纬仪对目标中轴线倾斜角的测量误差。

2.1 姿态模拟原理

光电经纬仪跟踪和测试的目标多数为轴对称结构,并且一般都是几千米以外的,目标与经纬仪的距离远远大于平行光管焦距的20倍,因此可以在平行光管焦平面放置刻有不同倾斜角短线条的目标板,用以模拟无穷远目标的姿态。由于目标的大小会影响中轴线倾斜角的测量精度,为了正确评价经纬仪的姿态测量精度,根据外场实际跟踪和测量的目标大小,采用等比缩放的方法来计算和制作目标板上的线条长度和宽度。线条长度和宽度的计算模型为:

$$l = \frac{L}{R} \cdot f, \quad (1)$$

式中 R 为目标的距离,单位为m; f 为平行光管焦距,单位为mm; L 为被测目标的尺寸,单位为m; l 为目标板上模拟的线条长度或宽度,单位为m。

目标板布局如图1所示,在目标板中心设计了十字丝,并在目标板的各象限模拟了粗细不同且具有不同倾斜角的线条,实际倾斜角以标定值作为真值。目标板上的图案采用光刻掩模的方式将设计好的巨型线条转移到玻璃基底上,玻璃基底本身涂镀有单晶硅材料,经过曝光之后没有被掩模板遮挡的单晶硅经过化学药品处理后会脱落,被掩模板遮挡的线条部分会保留下来,由于单晶硅的光谱范围为 $1.5 \sim 8 \mu\text{m}$,因此使用目视光学系统观察经平行光管射射的目标为亮背景暗目标。图2为1#、2#、3#线条的局部细节放大图。

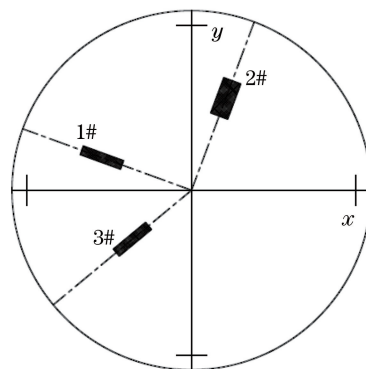


图1 目标板布局

Fig. 1 Target board layout

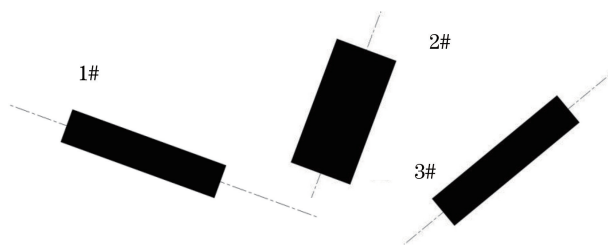


图2 各线条局部细节放大图

Fig. 2 Local detail enlargements of each line

2.2 数学建模

为了求解目标板上线条中轴线的倾斜角,需要知道线条上所属点的二维坐标值,为此建立了数学模型。

图3为目标板上的点与全站仪角度之间的映射关系, MOQ 面为平行光管焦平面,即目标板所在的平面, O 点为目标板的中心, O_1 点为平行光管主点, OQ 平行于水平面, OM 与 OQ 垂直,以 OQ 和 OM 分别为横轴和纵轴建立直角坐标系 OXY 。 N 点为目标板某线条中轴线所属点, $NQ \parallel MO$, $MN \parallel OQ$, $M'Q_1Q'$ 为水平面, O_1P 为 MP 在水平面内的投影, M 、 N 、 O 、 Q 在水平面内的投影点为 M' 、 N' 、 O' 、 Q' ,令 $OQ = x$, $OM = y$, $OO_1 = f$, $\angle OO_1P =$

$\angle E, \angle PO_1N' = \angle A', \angle NO_1N' = \angle E'$, 其中 f 为平行光管焦距, $\angle E$ 为目标板中心点 O 所对应的俯仰角, $\angle A', \angle E'$ 分别为中心点 O 以外的 N 点所对应的方位角和俯仰角, x, y 分别为 N 点在目标板坐标系中的横坐标和纵坐标; $f, \angle E, \angle A', \angle E'$ 均为已知量, x, y 为待解算量。由空间几何关系, 可推导出如下关系式:

$$MM' = MP \times \cos \angle E = (f \times \tan \angle E + y) \times \cos \angle E, \quad (2)$$

$$NN' = O_1N' \times \tan \angle E = x / \sin \angle A' \times \tan \angle E'. \quad (3)$$

因(2)式等于(3)式, 所以 $(f \times \tan \angle E + y) \times \cos \angle E = x / \sin \angle A' \times \tan \angle E'$ 。进一步可得出:

$$f \times \tan \angle E + y = x / \sin \angle A' \times \tan \angle E' \operatorname{acos} \angle E, \quad (4)$$

$$O_1M' = f / \cos \angle E - (f \times \tan \angle E + y) \times \sin \angle E, \quad (5)$$

$$O_1M' = x / \tan \angle A'. \quad (6)$$

因(5)式等于(6)式, 所以:

$$f / \cos \angle E - (f \times \tan \angle E + y) \times \sin \angle E = x / \tan \angle A'. \quad (7)$$

将(4)式代入(7)式得:

$$x = f \times \sin \angle A' \times \tan \angle A' / (\tan \angle E' \times \sin \angle E \times \tan \angle A' \operatorname{tcos} \angle E \times \sin \angle A'), \quad (8)$$

将(8)式代入(4)式得:

$$y = f \times (\tan \angle A' \times \tan \angle E' \times \cos \angle E - \sin \angle E \times \sin \angle A') / (\tan \angle E' \times \sin \angle E \times \tan \angle A' \operatorname{cos} \angle E \times \sin \angle A'). \quad (9)$$

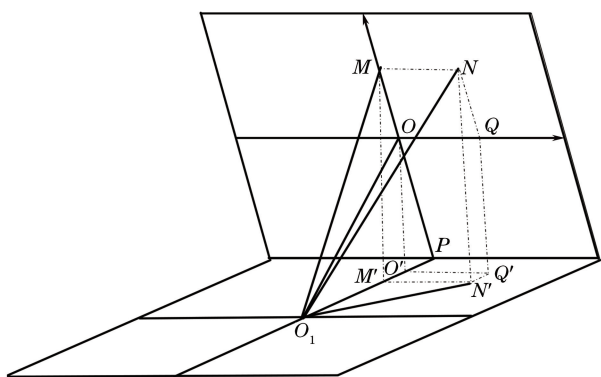


图 3 目标板上的点与全站仪角度之间的映射关系

Fig. 3 Mapping relationship between the point on the target board and the total station angle

3 实验结果

实验所选用的平行光管焦距为 1.2 m, 结构形

式为同轴反射式, 将制作好的目标板准确放置于平行光管焦平面上, 将平行光管和检测架固连, 调整光管和检测架空间位姿, 使得光管出射光束的指向与水平面夹角大于 50° , 在检测架下方架设徕卡公司生产的 TC2003 全站仪, 对目标板上的线条进行采样瞄准, 如图 4 所示。

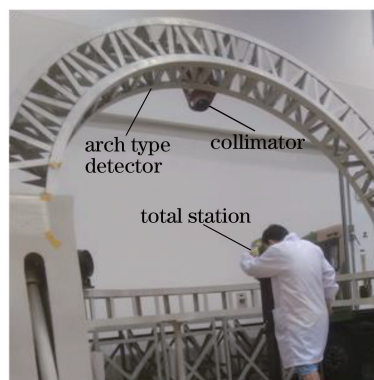


图 4 目标板线条倾斜角测试

Fig. 4 Tilt angle test of the line on target board

具体测试过程为通过全站仪瞄准平行光管焦平面目标板的中心点, 将全站仪方位清零, 再次瞄准目标板上线条中轴线的多个点, 记录相应点所对应方位角和俯仰角, 将目标板中心点的俯仰角记为 $\angle E$, 中心点以外点的方位角和俯仰角记为 $\angle A', \angle E'$, 将 $\angle E, \angle A', \angle E'$ 代入(8)和(9)式可得相应点在焦平面坐标系中的坐标, 对这些坐标点进行线性最小二乘法拟合, 可得中轴线的斜率, 中轴线斜率反正切的绝对值即为线条与水平线的夹角, 水平线定义为位于目标板上且与水平面平行的直线。

选取目标板中的细线条和粗线条进行测试, 通过(8)和(9)式计算线条中轴线上各个测试点的二维坐标值, 解算的各线条的二维坐标值如表 1~表 3 所示。

表 1 1# 线条中轴线各点坐标解算结果

Table 1 Coordinate solution results of the points on line 1#

Order number	x / mm	y / mm
1	-2.8547	1.0710
2	-2.4111	0.9056
3	-1.2902	0.5059
4	-0.6746	0.2591
5	0.3838	-0.1297
6	1.2089	-0.4483
7	2.0919	-0.7730
8	2.9674	-1.1109
9	5.6999	-2.1214
10	6.5802	-2.4673

表 2 2#线条中轴线各点坐标解算结果

Table 2 Coordinate solution results of the points on line 2#

Order number	x /mm	y /mm
1	-1.6937	-4.5293
2	-1.4839	-3.9397
3	-0.8800	-2.3622
4	-0.1544	-0.4084
5	0.3407	0.8879
6	0.6048	1.6141
7	0.9562	2.5411
8	1.6550	4.4266
9	1.9108	5.1218
10	2.7132	7.3353

表 3 3#号线条中轴线各点坐标解算结果

Table 3 Coordinate solution results of the points on line 3#

Order number	x /mm	y /mm
1	3.2280	2.6827
2	3.3499	2.7629
3	3.4587	2.8703
4	3.5518	2.9359
5	3.6558	3.0212
6	3.8190	3.1522
7	3.9325	3.2517
8	4.0569	3.3668
9	4.2199	3.5026
10	4.2914	3.5471

对表 1、表 2、表 3 中的坐标点进行线性最小二乘法拟合后,1#、2#、3#线条中轴线的斜率分别为 -0.37496 、 2.68194 、 0.82834 , 对应中轴线与水平线的夹角分别为 -20.554° 、 69.551° 、 39.636° 。

4 分析与讨论

在实际测试中,很难将平行光管焦平面目标板中的任意一线条调整到与水平面平行,而且安装相位往往是随机的,为了合理评价平行光管的姿态模拟精度,取两线条中轴线之间的夹角作为倾斜角测量值,经全站仪测试后 1#与 2#线条中轴线的夹角为 90.105° ,1#与 3#线条中轴线的夹角为 60.190° 。使用德国马尔公司生产的高精度电荷耦合元件 (CCD) 拼接测量系统并选用光测模式结合图像处理方式提取 1#、2#和 3#线条的中轴线,解算 1#与 2#线条以及 1#与 3#线条中轴线的夹角,测得两个夹角的值分别为 89.945° 、 60.144° 并将其作为真值,则 1#与 2#线条以及 1#与 3#线条中轴线的夹角测试误差分别为 0.160° 和 0.046° 。

夹角测试误差来源主要有瞄准误差和平行光管畸变。瞄准误差的大小取决于对准方式和目标板上

的线条宽度,在对准方式一定的前提下,宽度越大瞄准误差越大,宽度越小瞄准误差越小。两个夹角的测试误差不一致,主要是由于 2#线条较粗,采用全站仪瞄准线条中轴线时瞄准误差较大。为了减小瞄准误差给夹角测试引入的误差,测试中增加采样点数,利用线性最小二乘法对多点进行拟合,求取中轴线斜率,以此减小随机瞄准误差。

实验所选用的反射式平行光管全视场相对畸变值为千分之一,畸变主要变量有径向畸变和切向畸变,运用所建立的数学模型进行求解时,由于拟合的线条中轴线过目标板中心,因此径向畸变不会影响最终的拟合精度,假设平行光管的畸变全是由切向畸变引起的,2#线条与目标中心最远距离为 8 mm,基本上充满了全视场,因此由畸变所引起的最大夹角误差为 0.0008° ,可以忽略。如果由平行光管畸变所引入的夹角误差不可忽略,应对畸变进行标定,在夹角测试时对畸变所引入的偏移采样点进行相应的修正。

5 结 论

用全站仪对目标线条中轴线所属点对应的方位角和俯仰角进行测试,依据空间点的坐标投影关系解算待测点的二维坐标值,通过对多点进行线性拟合进而反演求解目标线条中轴线间的夹角,实验结果表明倾角夹角模拟误差最大值为 0.2° ,可以满足目标图像中轴线倾斜角提取误差最大为 0.6° 的要求。此方法能够快速、高效地模拟目标空间姿态,解决了室内经纬仪单站姿态评价难题。为减小夹角标定误差,提高姿态模拟精度,可以采用带有 CCD 的全站仪并结合亚像素提取技术进行测试,以兼容具有更高姿态测量精度的经纬仪测试需求。

参 考 文 献

- [1] Hacker J, Kroplin B H. An experimental study of visual flight trajectory tracking and pose prediction for the automatic computer control of a miniature airship[C]. SPIE, 2003, 5103: 25-63.
- [2] Li Y B, Zhang C B. A new method to get tridimensional gesture of flying target [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 185-189.
李永斌, 张昌兵. 飞行目标三维姿态测量的新方法 [J]. 激光技术, 2003, 27(3): 185-189.
- [3] Lü S H, Su X Q, Zhang Z P, et al. Algorithm of opto-electronic theodolite intersection based on Gauss-Newton method [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(11): 22-25.

- 吕帅华, 苏秀琴, 张占鹏, 等. 一种基于高斯-牛顿法的光电经纬仪交会测量算法[J]. 光电工程, 2006, 33(11): 22-25.
- [4] Gao C, Qiao Y F. Real-time error-correct method for photoelectrical theodolite[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(6): 846-851.
高策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 846-851.
- [5] Liu Z C, Guo L H, Guan W C, *et al.* Quantitative forecasting of intersection precision for theodolite[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 1822-1830.
刘旨春, 郭立红, 关文翠, 等. 经纬仪交会精度的定量预测[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1822-1830.
- [6] Zhu W, Zhao L R, Liu Y H, *et al.* Extraction method for missile bullet multiple targets of photoelectronic theodolites[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2140-2144.
朱玮, 赵立荣, 柳玉晗, 等. 光电经纬仪子弹多目标提取方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2140-2144.
- [7] Zhang Z X, Su G Z, Zhang J Q, *et al.* Airplane pose measurement from image sequences[J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(4): 287-291.
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] Su G Z. Research on the method of aircraft pose surveying from image sequences obtained by photoelectric theodolite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 28-29.
苏国中. 基于光电经纬仪影像的飞机姿态测量方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 28-29.
- [9] Wu B, Ye D, Guo Y B, *et al.* Multiplicircle recognition and pose estimation for aerospace applications[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0915004.
吴斌, 叶东, 郭玉波, 等. 基于航天应用的多圆特征识别和姿态估计[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0915004.
- [10] Yu Q F, Sun X Y, Chen G J. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2): 15-19.
于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.
- [11] Luo W S, Li P, Li G Z, *et al.* Method to measure the poses of the aircraft model based on the manmade signs[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2008, 31(3): 992-995.
罗武胜, 李沛, 李冠章, 等. 基于计算机视觉的飞机尾旋运动姿态测量方法[J]. 电子器件, 2008, 31(3): 992-995.
- [12] Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0815002.
苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0815002.
- [13] Liu J B, Guo P Y, Li X, *et al.* Evaluation strategy for camera pose estimation algorithm based on point correspondences[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0515002.
刘进博, 郭鹏宇, 李鑫, 等. 基于点对应的相机姿态估计算法性能评价[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0515002.
- [14] Dai D K, Wang X S, Hu C S, *et al.* Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312005.
戴东凯, 王省书, 胡春生, 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0312005.
- [15] Xu Y X, Jiang Y L, Chen F. Generalized orthogonal iterative algorithm for pose estimation of multiple camera systems[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 72-77.
许允喜, 蒋云良, 陈方. 多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 72-77.
- [16] Ai L L, Yuan F, Ding Z L. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 161-165.
艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 161-165.
- [17] Zhao L R, Liu Y H, Zhu W, *et al.* Measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2786-2793.
赵立荣, 柳玉晗, 朱玮, 等. 光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2786-2793.
- [18] Lu J Y, Li Q H, Jiang H. Measure method of the attitude of UAV based on the optical image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 102-105.
陆钧昀, 李庆辉, 姜华. 基于光测图像的无人机姿态测量方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 102-105.