

基于多视场拼接光电经纬仪的成像系统指向校正方法

赵怀学^{1,3*}, 刘波², 谢梅林², 田留德^{1,3}, 周艳¹¹中国科学院西安光学精密机械研究所检测技术研究中心, 陕西 西安 710119;²中国科学院西安光学精密机械研究所空间精密测量重点实验室, 陕西 西安 710119;³中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 分析了传统光电经纬仪脱靶量修正模型和多视场拼接光电经纬仪的特点, 基于坐标变换原理, 推导了成像系统具有大照准差和零位差的光电经纬仪脱靶量修正公式。依据上述脱靶量修正公式和目标模拟器指向, 逆向推导了大照准差和零位差的光电经纬仪脱靶量计算公式, 结合实际成像系统脱靶量信息, 解算成像系统的指向校正系数。经实验验证表明, 该方法突破了传统畸变修正模拟的局限性, 适用于多视场拼接光电经纬仪的成像系统指向校正。针对大照准差为 11.26° 和大零位差为 18.08° 的 2×3 外拼接阵列测量系统, 采用多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的指向校正方法, 得到水平和垂直的指向误差均小于 $1/5$ pixel。

关键词 测量; 光电经纬仪; 脱靶量; 指向校正; 视场拼接

中图分类号 TH761

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0612002

Pointing Calibration Method for Imaging Systems of Photoelectric Theodolites with Multi-Field of View Stitching

Zhao Huaixue^{1,3*}, Liu Bo², Xie Meilin², Tian Liude^{1,3}, Zhou Yan¹¹ Testing Technology Research Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;² Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;³ School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract After analyzing the traditional calibration model for target deviations of photoelectric theodolites and the characteristics of photoelectric theodolites with multi-field of view stitching, we derive a calibration formula for target deviations of photoelectric theodolites with imaging systems that have large collimation errors and zero offsets according to the principle of coordinate transformation. The above calibration formula and target simulator pointing are used to reversely deduce the calculation formula of target deviations of photoelectric theodolites with large collimation errors and zero offsets. The pointing calibration coefficient of the imaging system is solved through its actual target deviation. A verification test shows that the proposed approach breaks through the limitations of the existing distortion correction model and can be applied to pointing calibration of the imaging systems of photoelectric theodolites with multi-field of view stitching. The measurement system with a 2×3 externally stitched array discussed in this paper has a collimation error of 11.26° and a zero offset of 18.08° . Both the horizontal and vertical pointing errors are less than $1/5$ pixel after the system is calibrated by the pointing calibration method for photoelectric theodolites with multiple externally stitched imaging modules.

Key words measurement; photoelectric theodolite; target deviation; pointing calibration; field of view stitching

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2021-09-01; 录用日期: 2021-09-28

通信作者: *zhaohuaixue@opt.ac.cn

1 引言

靶场光测是靶场光学测量的简称,主要用于各类导弹、火箭、卫星及飞机等目标的弹道、轨迹及姿态的测量,其中具备代表性的测试设备有光电经纬仪、弹道相机、实况记录仪。光电经纬仪主要是通过角度测量、交汇处理来完成目标的空间定位,进而完成弹道参数测量^[1-5]。

光电经纬仪由电影经纬仪发展而来,典型的光电经纬仪跟踪架是由垂直轴和水平轴组成的两轴地基结构,成像系统安装在水平轴的轴体中部,其光轴为跟踪架的照准轴,且与水平轴垂直。理想情况下目标位于摄像机的光轴上,垂直轴和水平轴的旋转角度就是目标相对于经纬仪的水平角和高低角。但是受跟踪偏差的影响,目标定位点相对于光轴存在小角度偏离。在成像系统上目标相对于像平面中心的偏移量称为脱靶量^[6-7]。

为了提高目标探测能力、增大测量视场和提高分辨率,现代光电经纬仪常采用“积木”式测量系统和多成像模块外拼接系统^[6-7]。“积木”式测量系统采用加装红外、可见光、激光、雷达等多种探测器的方式;多成像模块外拼接系统采用多成像模块外拼接模式,即每个成像系统的光轴与照准轴保持一定夹角,这样可使传统光电经纬仪的脱靶量修正模型不再适用,因此需建立大照准差和零位差的光电经纬仪脱靶量修正模型(以下简称通用光电经纬仪脱靶量修正模型^[6])。另外,由于装配误差的存在或设计需要,事先标定成像光学系统的畸变系数不再适用于多成像系统的外拼接系统。为了达到高指向精度的要求,需要对各个成像系统进行系统畸变系数及装调误差修正。

多成像模块外拼接型光电经纬仪由于其特殊的应用场景,不仅对图像的配准、缝合等具有较高要求,更主要的是其可精准定位目标弹道。本文针对多成像模块外拼接型光电经纬仪的特点,建立了通用光电经纬仪脱靶量修正模型,并在此基础上推导了多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的指向校正方法。

2 传统光电经纬仪脱靶量修正模型

传统光电经纬仪为地平式结构,即垂直轴、水平轴和照准轴两两垂直,且要求垂直轴与大地水平面垂直,如图 1 所示。采用脱靶量合成公式^[(1)~(3)],得到目标经纬仪坐标系的水平脱靶角和垂直脱

靶角^[4-9]分别为

$$\begin{cases} H = \arctan(xd/f') \\ V = \arctan(yd/f') \end{cases}, \quad (1)$$

式中: H 为水平脱靶角; V 为垂直脱靶角; x 为水平脱靶量; y 为垂直脱靶量; d 为探测器像元尺寸; f' 为光学系统焦距。

$$\Delta A = \arctan\left(\frac{\tan H}{\cos E_1 - \tan V \sin E_1}\right), \quad (2)$$

式中: ΔA 为水平脱靶量投影到水平面的角度; E_1 为光电经纬仪的视轴垂直指向角。

$$\begin{cases} A = A_1 + \Delta A \\ E = \arctan[\tan(E_1 + V)\cos(\Delta A)] \end{cases}, \quad (3)$$

式中: A 、 E 分别为光电经纬仪的水平和垂直的角度值; A_1 为垂直轴角编码器的实时输出角度值。

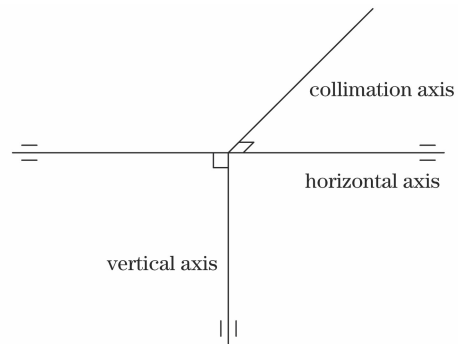


图 1 三轴关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three axis relationship

3 通用光电经纬仪脱靶量修正模型

如图 2 所示, $O-XYZ$ 为通用光电经纬仪脱靶量修正模型的虚拟靶面或主光学系统坐标系(以下均称虚拟靶面), OZ 与虚拟靶面视准轴重合, OX 与水平轴重合,且 OX 轴、 OY 轴与虚拟靶面图像的 X 轴、 Y 轴一致。 $o_c-x_c y_c z_c$ 为成像系统坐标系, $o_c z_c$ 与成像系统靶面视准轴重合, $o_c x_c$ 与水平轴平行,

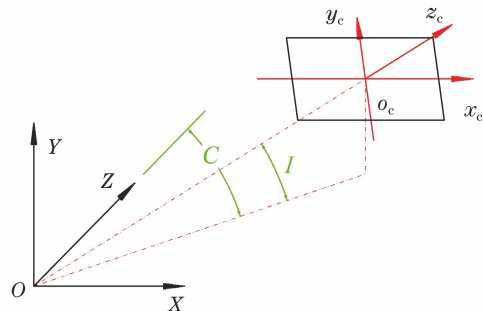


图 2 通用光电经纬仪轴系关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate frames of universal photoelectric theodolite

且 $o_c x_c$ 轴、 $o_c y_c$ 轴与成像系统靶面图像的 X 轴、Y 轴一致。图 2 中 $o_c x_c y_c z_c$ 坐标系在 $O-XYZ$ 坐标系投影后, $O-XYZ$ 坐标系视准轴与 $o_c x_c y_c z_c$ 坐标系视准轴的夹角为 C , 即照准差; $o_c z_c$ 与 XZ 平面的夹角为 I , 即零位差。

假设空间一点 M 在虚拟靶面下的坐标为 (x, y, z) , 在成像坐标系下的坐标为 (x_c, y_c, z_c) 。由图 2 可知, 点 M 在成像坐标系(虚拟靶面坐标系先绕 Y 轴旋转角度 C , 再绕 X 轴旋转角度 $-I$) 下的坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-I) & \sin(-I) \\ 0 & -\sin(-I) & \cos(-I) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos C & 0 & -\sin C \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin C & 0 & \cos C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设 M 点在成像坐标系下的坐标为 $k[x_c \ y_c \ f]$, 则

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos C & 0 & -\sin C \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin C & 0 & \cos C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-I) & \sin(-I) \\ 0 & -\sin(-I) & \cos(-I) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设空间点 M 在虚拟靶面下的空间指向水平角度为 A_0 、垂直角度为 E_0 , 则有

$$\begin{cases} \cos A_0 = \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} = \\ \frac{\sin C \cdot x_c + \cos C \cdot \sin I \cdot y_c + \cos C \cdot \cos I \cdot f}{\sqrt{x_c^2 + (\sin I \cdot y_c + \cos I \cdot f)^2}} \\ \tan E_0 = \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}} = \\ \frac{\cos I \cdot y_c - \sin I \cdot f}{\sqrt{x_c^2 + (\sin I \cdot y_c + \cos I \cdot f)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

令 $\tan(\Delta\alpha) = \frac{x_c}{\sin I \cdot y_c + \cos I \cdot f}$, 代入(6)式, 则有

$$\begin{cases} A_0 = C - \Delta\alpha \\ E_0 = \arctan \left[\frac{\cos I \cdot y_c - \sin I \cdot f}{\sin I \cdot y_c + \cos I \cdot f} \cdot \cos(\Delta\alpha) \right] \end{cases} \quad (7)$$

假设空间点任意一点 M 在光电经纬仪坐标系的空间指向方位角度为 A_0 、垂直角度为 E_0 ^[2], 则有

$$\Delta A_0 = \arctan \left(\frac{\sin A_0}{\cos E_1 \cos A_0 - \tan E_0 \sin E_1} \right), \quad (8)$$

式中: ΔA_0 为虚拟靶面水平脱靶量投影到水平面的角度。且有

$$\begin{cases} A = A_1 + \Delta A_0 \\ E = \arctan \left[\frac{\sin E_1 \cos A_0 + \cos E_1 \tan E_0}{\cos E_1 \cos A_0 - \sin E_1 \tan E_0} \cdot \cos(\Delta A_0) \right] \end{cases} \quad (9)$$

4 多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的指向校正方法

为了提高多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的指向精度, 同时修正装配误差(如成像模块的靶面倾斜等), 需要对多成像模块外拼接型光电经纬仪系统进行系统畸变校正。光电经纬仪系统为自闭环系统, 即对于无穷远指向固定目标, 目标位于视场任何位置, 其合成角度值均为同一指向。因此, 多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的畸变校正方法需通过逆向解算通用光电经纬仪脱靶量来修正模型, 即通过光电经纬仪的水平角度和垂直角度和成像系统的照准差和零位差, 逆向解算空间目标点脱靶量。将成像系统脱靶量与逆向解算空间目标点脱靶量作差, 解算畸变误差, 通过对畸变误差的数值分析, 完成多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的畸变校正。

综上所述, 多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的畸变校正即逆向解算通用光电经纬仪脱靶量修正模型。因此, 进行多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的畸变校正需要建立空间目标的空间指向、垂直轴角编码器角度值、水平轴角编码器角度值、光学系统焦距、探测器响应尺寸与水平脱靶量、垂直脱靶量之间的转换关系。

根据通用光电经纬仪的脱靶量修正模型, 可设

$$\gamma = \frac{\tan E_0}{\cos A_0} \quad (10)$$

结合(9)式, 可得

$$\begin{cases} \Delta A_0 = A - A_1 \\ \gamma = \frac{\tan E \cos E_1 - \cos(\Delta A_0) \sin E_1}{\tan E \sin E_1 + \cos(\Delta A_0) \cos E_1} \end{cases} \quad (11)$$

结合(8)式, 可得

$$\begin{cases} A_0 = \arctan[\tan(\Delta A_0)(\cos E_1 - \gamma \sin E)] \\ E_0 = \arctan(\gamma \cos A_0) \end{cases} \quad (12)$$

结合(7)式, 可得

$$\begin{cases} \Delta\alpha = C - A_0 \\ y_c = \frac{\cos(\Delta\alpha)\sin I + \tan E_0 \cos I}{\cos(\Delta\alpha)\cos I - \tan E_0 \sin I} \cdot f, (13) \\ x_c = \tan(\Delta\alpha)[\sin I \cdot y_c + \cos I \cdot f] \end{cases}$$

式中: (x_c, y_c) 为无畸变像点中心坐标。

畸变的测量采用精密测角法, 利用大口径平行光管模拟无穷远目标, 光电经纬仪转动不同角度并记录图像, 事后由判读软件判读目标位置, 记为 (A_i, E_i, x_i, y_i) , 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。利用多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的畸变校正模型, 计算无畸变像点中心坐标 (x_c, y_c) 。

由于装配误差的存在或设计需要, 成像系统靶面会与虚拟靶面存在倾斜。本文考虑二阶代数精度, 采用二元二次多项式修正畸变模型。

5 实验结果验证

“XX 阵列测量系统”由两台外拼接阵列测量系统组成。以一台阵列测量系统为例, 外拼接模式为 2×3 , 即 6 个红外系统沿水平、垂直两个方向进行外拼接布局, 如图 3 所示。单个红外成像系统的焦距为 40 mm, 像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$, 靶面像元数为 $640(\text{H}) \times 512(\text{V})$, H 代表水平方向, V 代表垂直方向。如图 4 所示, 单台阵列测量系统经视场拼接后的总视场为 $40^\circ(\text{H}) \times 50^\circ(\text{V})$ 。如图 3 所示, 该测量系统从上至下、由左至右布置 6 台红外系统, 成像系统光轴与虚拟靶面指向角(水平、垂直)分别如图 4 所示。

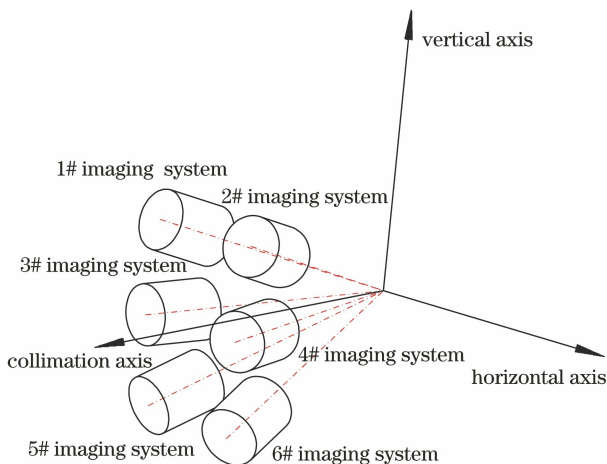


图 3 单台阵列测量系统中的成像系统拼接示意图

Fig. 3 Imaging system stitching diagram of single array measurement system

本文利用大口径平行光管模拟无穷远目标, 光电经纬仪转动不同角度并记录图像, 事后由判读软件判读目标位置, 结合通用光电经纬仪脱靶量修正

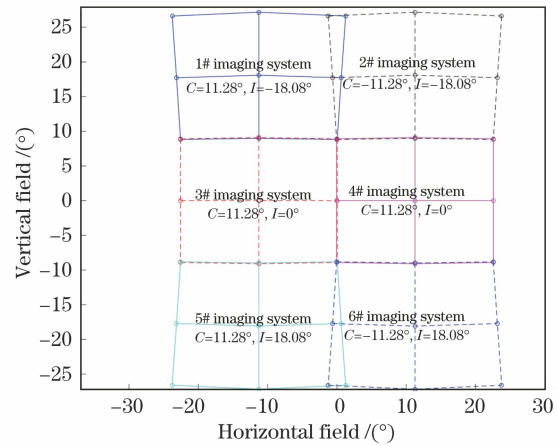


图 4 单台阵列测量系统视场拼接模型

Fig. 4 Field of view stitching model of single array measurement system

模型给出模拟目标空间指向, 且模拟目标空间指向为不变量(垂直指向通过高精度全站仪标定)。利用多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的畸变校正方法完成系统畸变、靶面倾斜的修正。

本文分别对未校正、成像系统单独畸变校正以及多成像模块外拼接型光电经纬仪系统指向校正方法三种方法进行了比较, 比较结果详见表 1 和图 5~7。

表 1 指向合成角测试结果

Table 1 Test results of pointing synthesis angle

Calibration method	Horizontal pointing error / pixel	Vertical pointing error / pixel
Non-correction	1.07 (0.038°)	0.86 (0.031°)
Distortion correction	0.44 (0.016°)	0.46 (0.016°)
Pointing correction	0.14 (0.005°)	0.21 (0.008°)

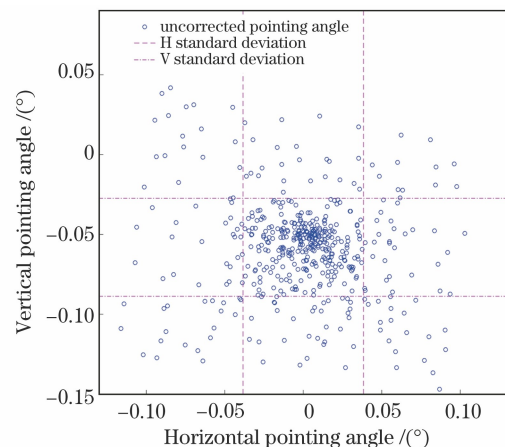


图 5 未校正指向合成角分布图

Fig. 5 Distribution map of synthesis angle without correcting pointing

由表 1 可知, 多成像模块外拼接型光电经纬仪系统指向校正方法突破已有修正模型, 并取得了良

好效果,可应用于通用型光测设备的指向修正。

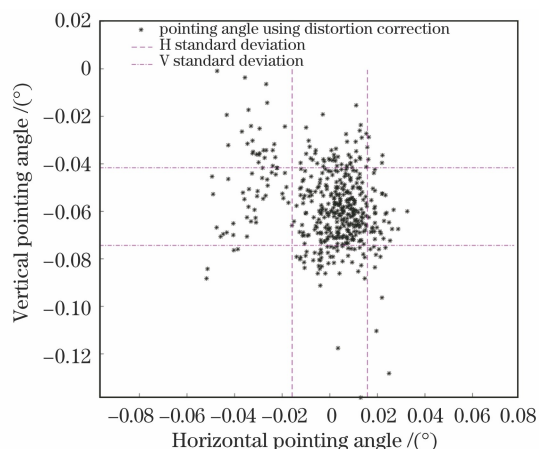


图 6 畸变校正合成角分布图

Fig. 6 Distribution map of synthesis angle after distortion correction

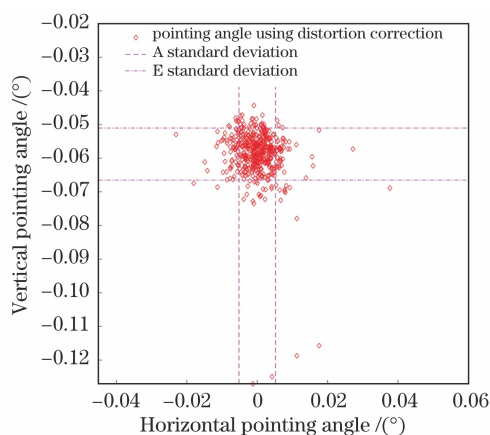


图 7 指向校正合成角分布图

Fig. 7 Distribution map of synthesis angle after pointing correction

6 结 论

实验结果表明,在“XX 阵列测量系统”中,针对大照准差为 11.26° 和大零位差为 18.08° 的 2×3 外拼接阵列测量系统,采用多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的指向校正方法,可得水平和垂直方向的指向误差均小于 $1/5$ pixel。

本文推导的多成像模块外拼接型光电经纬仪系统的指向校正方法突破了已有修正模型,适用于任意位置、任意角度的光测设备,可应用于通用型光测设备的指向修正,且实验结果表明所提方法取得了良好效果。

参 考 文 献

- [1] Zhao X Y, Li Y C. Optical measurement in shooting range[M]. Beijing: Institute of Command Technology, 2001.
 - [2] Tian S W, Li Y C. The directional error of photoelectric theodolite[J]. Acta Photonica Sinica, 1995, 24(4): 370-371.
 - [3] Liu B S, Liu C K, Du H T. The measuring equipment accuracy appraisal on the range[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
 - [4] Wang M, Song L W, Qiao Y F, et al. External field stitching technology for high speed target measuring and its implementation[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 2069-2076.
 - [5] Jin G, Wang J Q, Ni W. The three error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(5): 89-94.
 - [6] Hartley R I. Self-calibration from multiple views with a rotating camera[M]//Eklundh J O. Computer vision-ECCV'94. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 1994, 800: 471-478.
 - [7] Wang F, Jia T, Zhang C L. Dynamic correction of target deviations for photoelectric theodolites by coordinate transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 2939-2945.
 - [8] Lu C H, Li H F, Gao T, et al. Virtual reality head-mounted display with large field of view based on stitching[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0612002.
 - [9] Geng X L. Study on video mosaic construction of large static scenes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 9-15.
- 王旻, 宋立维, 乔彦峰, 等. 外视场拼接测量技术及其实现[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2069-2076.
- 金光, 王家骥, 倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 89-94.
- 王芳, 贾涛, 张春林. 应用坐标变换动态修正光电经纬仪脱靶量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2939-2945.
- 陆驰豪, 李海峰, 高涛, 等. 基于拼接的大视场虚拟现实头戴显示装置[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0612002.
- 耿晓玲. 大视场视频全景图拼接方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 9-15.

[1] Zhao X Y, Li Y C. Optical measurement in shooting