

T型光电经纬仪的投影中心和三差检测方法研究

刘耀登¹, 吕耀文^{1*}, 杜博军², 官玄睿¹, 黄玺¹¹长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130013;²中国人民解放军63850部队, 吉林 白城 137001

摘要 在靶场测量中,针对负载式T型光电经纬仪在更换成像组件之后的投影中心和光轴平行性改变的问题,提出一种仅需2个标杆即可同时检测投影中心和光轴平行性三差的方法。首先,结合摄像机的小孔成像模型和光电经纬仪的三差,推导了大地测量坐标系下的一点与摄像机图像平面上像点之间的投影方程。其次,根据光电经纬仪正、倒镜拍摄两根标杆得到标杆顶点在图像平面上的投影坐标,推导了结合投影中心与三差的成像投影关系,分析了平移矢量和三差对于标杆顶点在成像平面上投影点脱靶量的影响,对系统的投影中心坐标和三差进行计算,进而实现对光电经纬仪的光轴平行性检测。最后,通过实验验证了所提方法,实验结果表明,引入中心投影坐标和三差之后,水平方向和垂直方向上的重投影误差分别在0.2744 pixel和0.2287 pixel以内,所提方法切实可行、精度较高,可应用于T型光电经纬仪在靶场光轴平行性检测过程。

关键词 测量; 光电经纬仪; 光轴平行性; 投影中心坐标; 三差

中图分类号 TH761 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231284

1 引言

近年来,T型光电经纬仪^[1]凭借测量范围大、非接触式、测量精度高、可更换负载传感器、适合于多传感器系统等特点,被广泛应用于靶场光电测量系统^[2]、双目与多目视觉^[3-4]、目标检测与识别^[5-6]、汽车制造加工^[7-8]、测距与姿态测量^[9-10]等测试任务中。T型经纬仪具有挑担式结构,针对不同的测试环境,可以在其傍轴上安装不同的负载成像组件来达到测量目的。例如:通过在经纬仪上安装激光测距仪可实现距离测量;通过安装高速工业相机可实现对快速移动目标如无人机的精确跟踪,从而获取飞行目标相对于经纬仪站址方位、俯仰角等信息^[11]。但是在更换成像探测传感器之后,光学成像系统的投影中心、成像光轴与T型光电经纬仪照准轴的位置关系会发生改变,这些因素将导致T型光电经纬仪在测量时出现角度偏差,因此需要对T型经纬仪的三差和投影中心坐标进行计算并优化。

对于经纬仪光轴平行性检测问题,现有方法往往需要借助专业光学器件如分光镜组^[12]、光楔^[13]、平行光管^[14],但是靶场光测实验大多在外场进行,很难满足测试条件。朱玮等^[15]利用空间三角关系对T型架经纬仪的定向差、零位差及照准差的计算公式进行推导。贾文武等^[16]提出一种基于方位标拍摄的检测方法,通过

坐标旋转变换公式推导出光轴平行性检测公式,并分析成像系统测量误差对平行性检测精度的影响。但是文献^[15]和^[16]对平行性的检测都需要已知成像光学系统的投影中心与经纬仪中心的位置关系,而对于可更换成像组件的T型光电经纬仪,该位置关系一般是未知的。赵怀学等^[17]提出一种基于多视场拼接的光电经纬仪成像系统指向校正方法,该方法通过推导具有大照准差和零位差的光电经纬仪成像系统的脱靶量修正公式,结合实际脱靶量信息和目标模拟器指向,完成光电经纬仪指向校正,但该方法仅考虑了投影中心与光电经纬仪回转中心的重合情况,缺少投影中心平移矢量对系统指向校正的考虑。

本文提出一种简便的立杆检测T型光电经纬仪三差(定向差、零位差和照准差)的方法。该方法只需在近端和远端各立一个标杆,光电经纬仪成像系统分别采集近端和远端标杆的图像后,即可由标杆的图像坐标、成像系统的内参数和光电经纬仪的编码器值计算得到光学成像系统的投影中心坐标,并实现对光轴平行性的检测。

2 背景知识

2.1 涉及的坐标系

引入的坐标系分别为:1)世界坐标系

收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-09-02; 录用日期: 2023-09-26; 网络首发日期: 2023-11-14

基金项目: 吉林省自然科学基金(YDZJ202201ZYTS419)、高等学校学科创新引智111计划(D21009)

通信作者: *lvyawen2005@163.com

($O_W-X_WY_WZ_W$), 即 WGS84 地心空间直角坐标系。2) 光电经纬仪坐标系 ($O_T-X_TY_TZ_T$)。光电经纬仪坐标系的原点 O_T 为 T 型光电经纬仪的回转中心; X_T 轴为地平式光电经纬仪的照准轴, 不同于地平式经纬仪, T 型光电经纬仪的照准轴经过摄像机光心 O_T 且平行于 X_T 轴, 其指向为正北方向; Y_T 轴为 T 型光电经纬仪垂直轴, 正镜状态下其正方向为垂直向上; Z_T 轴为 T 型光电经纬仪水平轴, 正镜状态下其正方向为水平向

右。3) 相机坐标系 ($O_C-X_CY_CZ_C$)。相机坐标系的原点为相机的光心; X_C 为相机成像光轴, 其正方向为成像方向; Y_C 为像面纵轴, 正镜状态下其正方向为垂直向上; Z_C 为像面横轴, 正镜状态下其正方向为水平向右。光电经纬仪坐标系原点即光电经纬仪回转中心在世界坐标系下的坐标已知, 光电经纬仪坐标系与相机坐标系之间的外参为定值。3 个坐标系的关系示意图见图 1(a)。

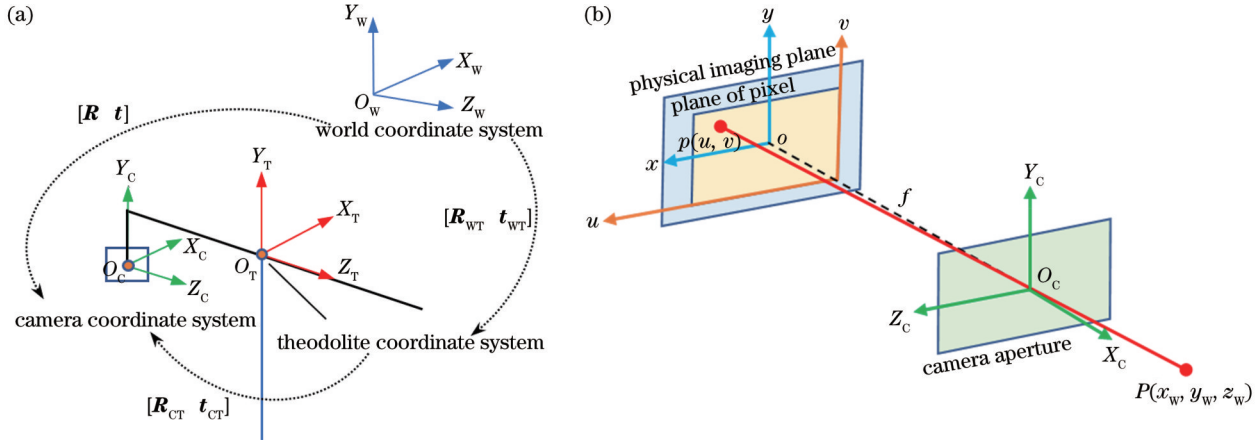


图 1 坐标系与成像模型。(a) 3 个坐标系的关系; (b) 针孔成像模型

Fig. 1 Coordinate systems and imaging model. (a) Relation among three coordinate systems; (b) pinhole imaging model

2.2 相机成像模型

相机成像模型中, 空间任一点 P 在世界坐标系下的坐标为 $(x_w, y_w, z_w)^T$, 在图像坐标系下投影点坐标 $p = (u, v)^T$, 两个坐标满足以下方程:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \quad t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[R \quad t] = [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad t], \quad (1)$$

式中: s 为尺度因子, 其值等于空间点在相机坐标系下的投影深度; K 为相机的内参矩阵; R 、 t 分别为世界坐标系向相机坐标系转换的旋转矩阵和平移向量, 即传统意义上的相机外参矩阵; r_1 、 r_2 、 r_3 为旋转矩阵的列向量, 有 3 个自由度, 可由 3 个欧拉角表征; f_x 、 f_y 分别为焦距 f 与水平和垂直方向上的像元尺寸的比值, 即等效焦距; (u_0, v_0) 为像素坐标系中的主点坐标。针孔相机成像模型如图 1(b) 所示, 其反映了世界坐标系的点通过相机光心投影到像素坐标系的整个过程。

2.3 光电经纬仪的三差

光电经纬仪在架构上包含 3 条主要的轴线, 分别是水平轴、垂直轴和照准轴。在水平轴和垂直轴上分别安装一个编码器, 以测量光电经纬仪旋转的水平角和俯仰角。

1) 定向差

定向差的定义为: 当光电经纬仪的照准轴指向规

定的定向线 (通常为大地北定向线) 时, T 型光电经纬仪水平方向上码表盘的零位线与定向线之间的夹角, 用 g 表示。

2) 零位差

零位差的定义为: T 型光电经纬仪在正镜状态下照准轴指向水平正前方 (与铅垂线垂直) 时, 经纬仪垂直方向上的码表盘零位线与水平面之间的夹角, 用符号 h 表示。

3) 照准差

照准差的定义为: T 型光电经纬仪的照准轴与摄像机光轴之间的偏差, 照准差又称为视轴误差, 用符号 c 表示。照准差包含水平照准差 c_x 和垂直照准差 c_y , 表示摄像机光轴经过俯仰旋转 c_y , 再水平旋转 c_x 后, 摄像机光轴与 T 型光电经纬仪的照准轴重合。

2.4 坐标系转换

首先, 分析世界坐标系到光电经纬仪坐标系的转换。世界坐标系下的点的坐标对应于光电经纬仪坐标系下的转换关系, 可表示为

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix} = [R_{WT}, t_{WT}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $(x_w, y_w, z_w)^T$ 为世界坐标系下的点的坐标; $(x_T, y_T, z_T)^T$ 为所对应的光电经纬仪坐标系下的点的坐标; R_{WT} 、 t_{WT} 为世界坐标系到光电经纬仪坐标系的

旋转矩阵与平移向量。

由于光电经纬仪的 X_T 轴指向正北、 Y_T 轴垂直向上、 Z_T 轴水平向右,因此世界坐标系与光电经纬仪坐标系之间不存在旋转关系,即 $R_{WT} = I$ 。两个坐标系之间的位姿关系为单纯的平移关系。光电经纬仪中心在世界坐标系下的坐标已通过大地测量等手段测得,因此 t_{WT} 为已知向量。

其次,分析光电经纬仪通过纯旋转运动引起光电经纬仪坐标系发生的变化。光电经纬仪在旋转后,原世界坐标系下的点在新光电经纬仪坐标系下的坐标相应发生变化。光电经纬仪的旋转运动可分解为绕光电经纬仪 Y_T 轴和 Z_T 轴的两次旋转。当光电经纬仪从位置 1 旋转到位置 2 时,光电经纬仪坐标系下点的坐标的位姿转换关系可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{T1} \\ y_{T1} \\ z_{T1} \end{bmatrix} &= R_E \cdot R_A \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix}, \\ R_A &= \begin{bmatrix} \cos(a+g) & 0 & -\sin(a+g) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(a+g) & 0 & \cos(a+g) \end{bmatrix}, \\ R_E &= \begin{bmatrix} \cos(e+h) & \sin(e+h) & 0 \\ -\sin(e+h) & \cos(e+h) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $(x_T, y_T, z_T)^T$ 为光电经纬仪处于位置 1 时光电经纬仪坐标系坐标; $(x_{T1}, y_{T1}, z_{T1})^T$ 为光电经纬仪旋转到位置 2 时光电经纬仪坐标系坐标; a, e 为光电经纬仪绕

自身 Y, Z 轴旋转的角度,其值可以直接从 T 型光电经纬仪的水平、垂直码盘上读出; R_E, R_A 分别为旋转角度所对应的被动旋转情况下的旋转矩阵。

最后,分析光电经纬仪坐标系与相机坐标系之间的转换关系,该转换关系是固定的,也是本实验需要标定的内容。当相机安装在 T 型光电经纬仪的傍轴上时,光电经纬仪坐标系与相机坐标系之间的转换关系就已经固定了,不会随着光电经纬仪发生旋转而改变。该转换关系可以描述为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = [R_{CT}, t_{CT}] \begin{bmatrix} x_{T1} \\ y_{T1} \\ z_{T1} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $(x_{T1}, y_{T1}, z_{T1})^T$ 为光电经纬仪旋转过后光电经纬仪坐标系下点的坐标; $(x_c, y_c, z_c)^T$ 为对应相机坐标系下点的坐标; R_{CT} 为旋转矩阵,由偏航、俯仰、滚转 3 个欧拉角表征,其中偏航角和俯仰角分别表征水平照准差和俯仰照准差; t_{CT} 为平移向量,表征投影中心的位置。式(4)描述了光电经纬仪坐标系下的一点与对应相机坐标系下的点之间的转换关系。

本文在传统相机标定的基础上引入了 T 型光电经纬仪,以 T 型光电经纬仪的旋转运动代替相机的运动,将传统相机标定中的相机外参矩阵 R 和 t 转化为相机与光电经纬仪之间的固定矩阵 R_{CT} 与 t_{CT} 。结合上述坐标系转换内容以及式(1)~(4),可以得到世界坐标系下的一点 $M(x_w, y_w, z_w)^T$ 到成像点 $m(u, v)^T$ 的投影转换关系,即

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R_{CT} t_{CT}] \begin{bmatrix} \cos(e+h) & \sin(e+h) & 0 & 0 \\ -\sin(e+h) & \cos(e+h) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(a+g) & 0 & -\sin(a+g) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(a+g) & 0 & \cos(a+g) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & t_{WT} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3 T 型光电经纬仪的三差计算

3.1 T 型光电经纬仪正倒镜成像模型

在对 T 型光电经纬仪的三差进行分析时,往往需要将经纬仪正镜和倒镜结合起来求解。图 2(a) 所示为 T 型光电经纬仪正镜状态下的成像模型,其中 $ABCD$ 为相机成像平面,相机光心 O_C 与 T 型光电经纬仪回转中心 O_T 的水平距离为 t_x ,垂直距离为 t_y ,在成像光轴方向的距离为 t_z 。图 2(b) 所示为倒镜状态下的成像模型,当系统的三差均为 0,且正镜状态下照准轴 X_C (即相机光轴)指向正北时,只需将 T 型光电经纬仪以垂直轴为对称中心旋转 180° ,再以 90° 为对称中心进行旋转即可得到倒镜的成像模型,旋转前后相机的成像

平面 $ABCD$ 关于中心对称。

3.2 投影中心坐标计算

在计算 T 型光电经纬仪三差之前,需要确定投影中心的位置,也就是相机中心相对于光电经纬仪回转中心的位置,此时无需考虑光电经纬仪坐标系与相机坐标系的旋转关系,仅需考虑 3.1 节所述的 t_x, t_y, t_z 。在推导投影中心坐标之前需要有以下先验条件:已知相机的焦距为 f ,图像的像元尺寸为 $dx \times dy$,图像分辨率为 $w \times h$,光电经纬仪回转中心、标杆顶点在世界坐标系下的坐标分别为 $G_1 = (x_1, y_1, z_1), B_1 = (x_2, y_2, z_2)$,由此可计算得到距离 L 、标杆的方位角 θ_{AP} 和俯仰角 θ_{EP} 分别为

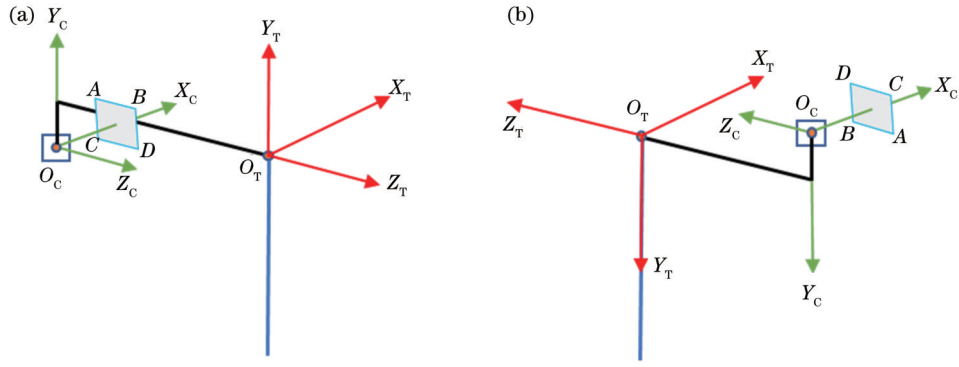


图 2 T 型光电经纬仪成像模型。(a)正镜;(b)倒镜

Fig. 2 T-type photoelectric theodolite imaging model. (a) Positive image; (b) inverted image

$$\begin{cases} L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\ \theta_{AP} = \arctan[(z_2 - z_1)/(x_2 - x_1)] \\ \theta_{EP} = \arcsin[(y_2 - y_1)/L_1] \end{cases} \quad (6)$$

正镜下,将 T 型光电经纬仪对准标杆顶点位置,如图 3(a)所示,以经纬仪水平轴线(指向)为基准,定义角度逆时针方向为正,则计算得到标杆在图像中的水平坐标值 A_p 为

$$A_p = u_0 + (g + c_x + \angle O_T P O_C) / \Delta x, \quad (7)$$

式中: Δx 为摄像机水平方向角分辨率,几何上表征摄像机单位像素对应的角度值,即 $\Delta x = dx/f \cdot (180/\pi)$; $\angle O_T P O_C = \arctan(t_z/L)$ 。

由式(7)可知,当立两根不同距离的标杆时,因 u_0 、

定向差、水平照准差为定值,且 t_z 远小于 L ,因此有

$$A_{p1} - \left(\frac{t_z}{L_1} \cdot \frac{180}{\pi} \right) / \Delta x = A_{p2} - \left(\frac{t_z}{L_2} \cdot \frac{180}{\pi} \right) / \Delta x, \quad (8)$$

式中: A_{p1} 和 A_{p2} 分别为近、远标杆顶点在图像中的水平坐标值; L_1 、 L_2 分别为近、远标杆顶点到光电经纬仪中心的距离。由式(8)可计算出平移矢量的水平分量 t_x , 同理得到平移矢量的俯仰方向分量 t_y 的计算公式为

$$t_y = (C_{p1} - C_{p2}) \cdot \Delta y \cdot L_1 L_2 / (L_2 - L_1), \quad (9)$$

式中: C_{p1} 和 C_{p2} 分别为近、远标杆在图像中的垂直坐标值。需要说明的是,以上 t_x 和 t_y 的推导中,默认 $t_x = 0$ 。 t_x 表征摄像机投影中心与光电经纬仪中心在光轴方向的距离偏差,其值远小于标杆到经纬仪中心的距离值。因此,在估计 t_x 和 t_y 时,将 t_x 设置为 0 是合理的。

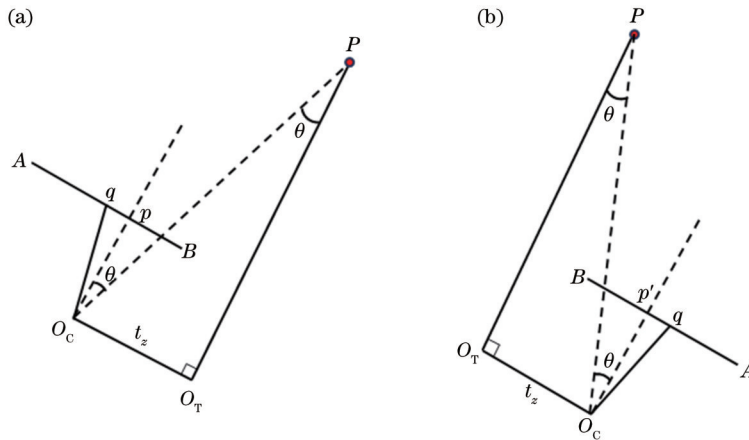


图 3 T 型光电经纬仪对标杆顶点成像示意图。(a)正镜;(b)倒镜

Fig. 3 T-type photoelectric theodolite for pole vertex imaging diagram. (a) Positive image; (b) reversed image

3.3 三差计算

由式(7)和(9)可知,在计算出正镜下的投影中心坐标后,即可得到定向差和水平照准差(零位差和垂直照准差)之和。下面以定向差和水平照准差的计算为例,图 3(b)为倒镜下 T 型光电经纬仪对准标杆顶点的成像示意图,此时光电经纬仪方位角 θ_{AI} 和俯仰角 θ_{EI} 为

$$\begin{cases} \theta_{AI} = \theta_{AP} + 180^\circ \\ \theta_{EI} = 180^\circ - \theta_{EP} \end{cases} \quad (10)$$

定义角度逆时针方向为正,由图 3(b)可以计算得到倒镜下标杆顶点在图像中的水平坐标值 A'_q :

$$A'_q = u_0 + (-g + c_x - \angle O_T P O_C) / \Delta x. \quad (11)$$

由 3.2 节求得 t_z 后, $\angle O_T P O_C$ 已知,因此联立式(7)与式(11)可得定向差与水平照准差:

$$\begin{cases} g = \frac{(A_p - A'_p) \cdot \Delta x - 2 \angle O_T P O_C}{2} \\ c_x = \frac{(A_p + A'_p - 2u_0) \cdot \Delta x}{2} \end{cases} \quad (12)$$

同理,可得:

$$\begin{cases} h = \frac{(C_p - C'_p) \cdot \Delta y - 2 \angle O_T P O_C}{2} \\ c_y = \frac{(C_p + C'_p - 2v_0) \cdot \Delta y}{2} \end{cases} \quad (13)$$

至此,完成了 T 型光电经纬仪投影中心和三差的线性估计。

为进一步提高系统标定精度,可多采集正倒镜下两根标杆的图像,并提取标杆顶点图像坐标,以最小化重投影误差为目标函数,得到目标函数为

$$\sum_{i=1}^n \|m_i - \tilde{m}_i(K, R_{CT}, t_{CT}, a, g, e, h, M_i)\|, \quad (14)$$

式中: m_i 为标杆顶点的图像坐标; M_i 为标杆顶点在世界坐标系下的坐标; $\tilde{m}_i(K, R_{CT}, t_{CT}, a, g, e, h, M_i)$ 由式(5)定义,为利用上述数据求解出的重投影点坐标。利用 Levenberg-Marquadt(LM)算法,以线性估计值为初始值,式(14)为目标函数对参数进行迭代优化求解,得

到最终的投影中心坐标和三差值。

3.4 算法总结

所提算法的整体流程如图 4 所示:

1)通过大地测量测得 T 型光电经纬仪回转中心和两个标杆顶点在世界坐标系下的坐标;

2)由式(6)计算两根标杆顶点的方位角和俯仰角,并控制光电经纬仪在正镜下分别指向这两个标杆顶点,得到两个标杆顶点在图像中坐标,并由式(8)和式(9)计算得到投影中心平移矢量的 t_x 和 t_y 分量初始值。

3)由式(10)计算倒镜下两根标杆顶点的方位角和俯仰角,任意选取一标杆,控制光电经纬仪在倒镜下指向该标杆顶点,由式(12)和式(13)得到初始的定向差 g 、水平照准差 c_x 、零位差 h 和垂直照准差 c_y 。

4)根据标杆顶点方位角和俯仰角,以及摄像机的视场大小,控制光电经纬仪方位角和俯仰角,得到正倒镜下若干标杆顶点的图像点。

5)将 2)、3)步得到的 c_x 、 c_y 作为 R_{CT} 的初始值,将 t_x 、 t_z 的计算值并令 $t_x = 0$ 作为 t_{CT} 的初始值,以式(14)为目标函数,用 Levenberg-Marquadt 优化算法得到最终结果。

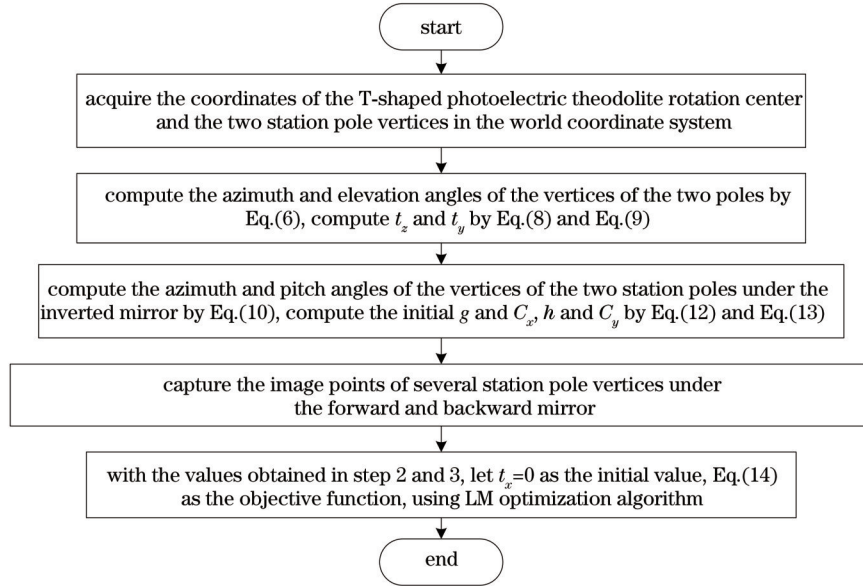


图 4 所提整体算法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed overall algorithm

4 实验结果验证

4.1 数值仿真

为不失一般性,设光电经纬仪坐标系与世界坐标系重合,即 $t_{WT} = 0$ 。摄像机内参数矩阵 $K =$

$$\begin{bmatrix} 10000 & 0 & 1000 \\ 0 & 10000 & 1000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{图像分辨率为 } 2000 \text{ pixel} \times 2000 \text{ pixel}, \text{定向差 } g、\text{零位差 } h、\text{垂直照准差 } c_x \text{ 和水平照}$$

准差 c_y 从均匀分布 $(-2^\circ, 2^\circ)$ 中随机产生,投影中心 t_y 、 t_z 从均匀分布 $(-0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m})$ 中产生。设置近、远杆顶点距离分别为 90 m 和 270 m,两杆的方位值在均匀分布 $(0^\circ, 180^\circ)$ 中随机产生,俯仰值在均匀分布 $(-1^\circ, 3^\circ)$ 中随机产生。仿真过程中,在投影图像点上添加的噪声是均值为 0、方差为 δ 的高斯噪声,以标定结果与设定真值的绝对误差为评价标准。由前面的投影中心和三差计算原理可知:图像水平方向的角分辨率 Δx 与内参数 f_x 呈线性关系,因此内参数 f_x 的误差与 t_x 、 g 和 c_x

的计算误差呈线性变化关系, f_x 越大, Δx 越小, 系统计算精度越高, 同理对 f_y 有相同的结论; 主点坐标 (u_0, v_0) 为摄像机光轴与图像平面的交点, 其精度表征摄像机光轴的精度, 因此其偏差将会直接叠加在水平照准差和垂直照准差上。本文主要从 2 个方面分析所提算法的检测精度: 标杆投影图像点的噪声水平和 t_x 与标杆位置。

1) 投影图像点噪声水平对检测精度的影响

实验中, 投影图像点的方差 δ 从 0 到 2 pixel 以 0.1 pixel 的步长变化。对于每一个固定的 δ 值, 标定结果为 200 次独立实验的平均结果。投影中心线性和非线性优化计算结果如图 5(a) 所示, 三差参数线性和

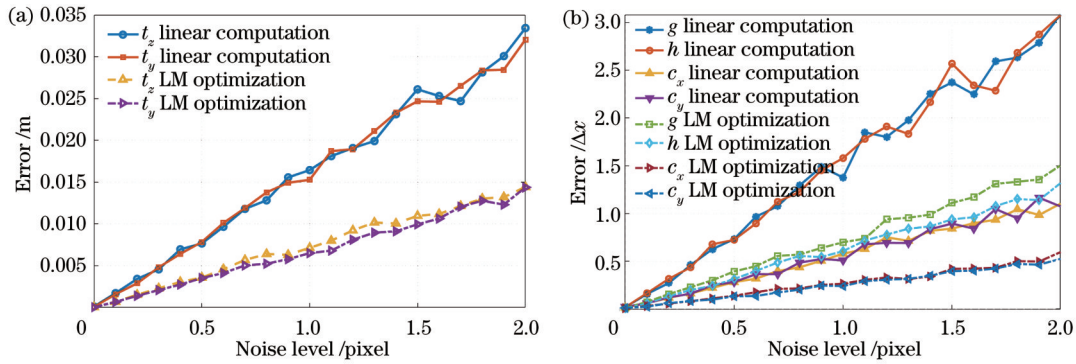


图 5 图像点噪声水平对检测精度的影响。(a) t_z, t_y ; (b) g, h, c_x, c_y

Fig. 5 Performance with noise level on detection accuracy. (a) t_z, t_y ; (b) g, h, c_x, c_y

2) t_x 与标杆位置对检测精度的影响

实验中, 投影图像点的方差 $\delta = 1$ pixel, t_x 从 -2 m 到 2 m 以 0.1 m 的步长变化, 计算结果如图 6 所示。由图 6 可知, t_x 在 -1~1 m 范围内变化时, 对计算结果的

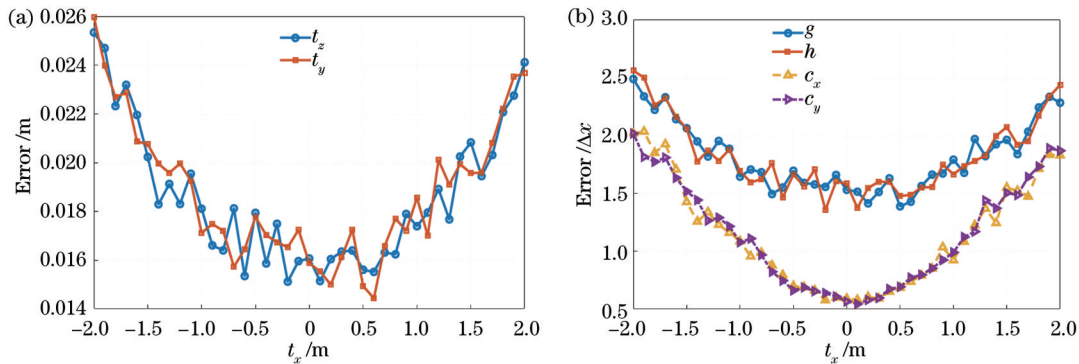


图 6 t_x 值对检测精度的影响。(a) t_z, t_y ; (b) g, h, c_x, c_y

Fig. 6 Performance with t_x on detection accuracy. (a) t_z, t_y ; (b) g, h, c_x, c_y

接着令 $t_x = 0.5$ m, 近杆距离以 9 m 的步长由 9 m 变化到 225 m, 计算结果如图 7 所示。

由图 7(a) 可知, 当近杆距离 L_1 由 9 m 增大到 27 m 时, t_z 和 t_y 的计算误差降低, 这主要是因为随着 L_1 的增大, $\angle O_T P O_C$ 的线性计算精度提高。当 L_1 大于 150 m 时, t_z 和 t_y 的计算误差出现快速增大, 且该误差也传递到图 7(b) 的 g 和 h , 使二者产生相似的误差曲线, 这主要是因为当 L_1 增大到与远杆距离 L_2 接近时, t_z 和 t_y 的

非线性优化结果如图 5(b) 所示, 为便于分析, 将误差角度值的单位转换为单个像素的张角值, 即 $\Delta x = 0.0057^\circ$ 。由图 5 可知: 随着图像点的误差增大, 投影中心和三差参数误差也线性增大; 定向差 g 和零位差 h 的误差大于水平照准差 c_x 和垂直照准差 c_y 。这主要是因为 g 的计算 [式 (12)] 包含了角度值 $\angle O_T P O_C$, 而该角度值是由 t_z 求得的, 因此 t_z 误差叠加在 g 上, 导致定向差 g 的误差明显大于水平照准差 c_x , 同理对零位差 h 也得到相同的结论; Levenberg-Marquadt 优化算法可有效降低误差值, 提升检测精度。在后续的仿真分析中, 仅讨论线性算法的计算结果。

影响很小。当 t_x 增大时, 误差也增大, 但在增大的过程中各个参数值都出现明显抖动, 说明各个参数对 t_x 的小变化并不敏感。

计算公式 (8) 和 (9) 中的 $L_1 L_2 / (L_2 - L_1)$ 快速增大。同时, 由图 7(b) 可知, 当 L_1 小于 50 m 时, g, h, c_x 和 c_y 的计算误差快速降低, 且随着 L_1 的进一步增大, c_x 和 c_y 误差出现缓慢下降的趋势, 这主要是因为随着 L_1 的增大, 由 $t_x \neq 0$ 带来的误差进一步减小, 因此在实验中建议布置近杆的距离为 50~150 m。

4.2 实际实验

在本次实验中, 需要通过 T 型光电经纬仪测量标

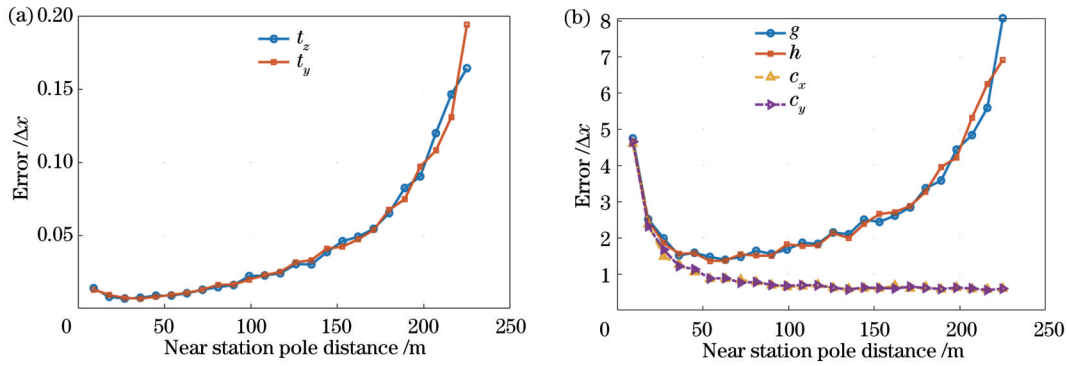


图 7 近杆距离对检测精度的影响。(a) t_z 、 t_y ; (b) g 、 h 、 c_x 、 c_y

Fig. 7 Performance with near station pole distance on detection accuracy. (a) t_z , t_y ; (b) g , h , c_x , c_y

杆顶点相对于经纬仪的水平角和俯仰角信息, 所选用经纬仪的角分辨率为 24 位编码器, 水平旋转角度范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 俯仰角度范围为 $-5^\circ \sim 185^\circ$, 其实物如图 8 所示。T 型光电经纬仪上安装的高速相机的焦距为 195 mm, 相机分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 相机畸变参数为 0, 相机的等效焦

距为 9750, 相机内参矩阵为 $K = \begin{bmatrix} 9750 & 0 & 640 \\ 0 & 9750 & 400 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

本文需要设立两根实验用标杆, 通过差分 GPS 得到 T 型光电经纬仪旋转中心在世界坐标系下的坐标为 $[-220.32, 190.044, 4745.37]^T$, 标杆 1 (相对于 T 型光电经纬仪的近杆) 头部在世界坐标系下的坐标为 $[-192.79, 191.34, 4834.15]^T$, 标杆 2 (相对于 T 型光电经纬仪的远杆) 头部在世界坐标系下的坐标为 $[47.28, 192.66, 4791.45]^T$ 。

结合 T 型光电经纬仪旋转, 拍摄远近杆在正倒镜状态的不同方位角、俯仰角下的图像各 9 幅, 其中部



图 8 T 型光电经纬仪实物图

Fig. 8 Picture of T-type photoelectric theodolite

分图像如图 9 所示, 并记录光电经纬仪码表盘读数 A_i 、 E_i , 提取标杆顶点在像素坐标系下的坐标。

结合上述实验数据, 运用所提算法得到 T 型光电经纬仪投影中心与三差的线性计算值和优化值如表 1 所示。需要说明的是, 在优化时将 t_x 的范围限制在 $0 \sim$

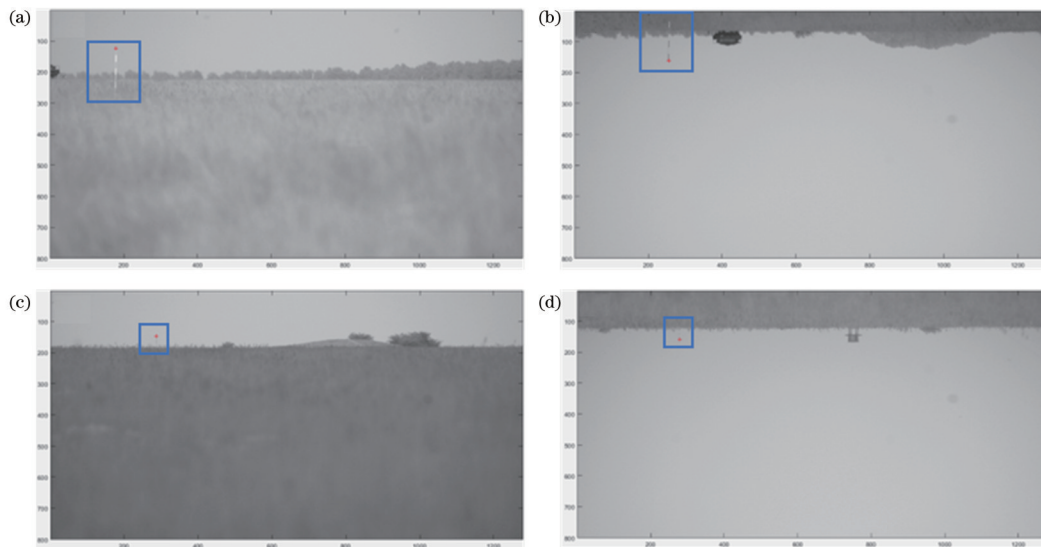


图 9 拍摄的标杆图像。(a) 正镜近杆; (b) 倒镜近杆; (c) 正镜远杆; (d) 倒镜远杆

Fig. 9 Captured images of station poles. (a) Near station pole under positive image; (b) near station pole under reversed image; (c) far station pole under positive image; (d) far station pole under reversed image

0.5 m 内,其大小对于系统的影响很小(在 0~0.5 m 的变化范围内,重投影误差为 0.15 pixel),考虑到标杆点

的提取精度,舍弃了对该值的非线性优化。

表 1 线性计算值与优化后值的对比

Table 1 Comparison of linear calculation values and optimized values

| Parameter | t_y /m | t_z /m | g /($^\circ$) | c_x /($^\circ$) | h /($^\circ$) | c_y /($^\circ$) |
|-----------------------|----------|----------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Linear computed value | 0.0145 | 0.1450 | 0.3765 | 0.2765 | 0.0191 | 0.0346 |
| Optimized value | 0.0143 | 0.1444 | 0.3771 | 0.2756 | 0.0183 | 0.0351 |

为验证所提算法的有效性,对重投影误差进行计算,分别将线性计算值和优化后的数值代入相应的公式求得正镜近杆(forward-near)、倒镜近杆(backward-near)、正镜远杆(forward-far)、倒镜远杆(backward-far)的重投影误差值,如图 10 所示。

图 10(a)所示为根据线性计算值求得的反投影误差值的分布,分别对水平方向和垂直方向的重投影误差

差求均值,水平方向的平均误差为 0.7321 pixel,垂直方向的平均误差为 0.7146 pixel;图 10(b)所示为根据优化后的结果求得的重投影误差数据,可计算得到重投影点在水平方向上的平均误差为 0.2744 pixel,垂直方向上的平均误差为 0.2287 pixel。通过分析优化前后重投影误差值,得到优化后的精度相对于优化前提升了 65% 左右,进一步验证了所提检测方法的正确性。

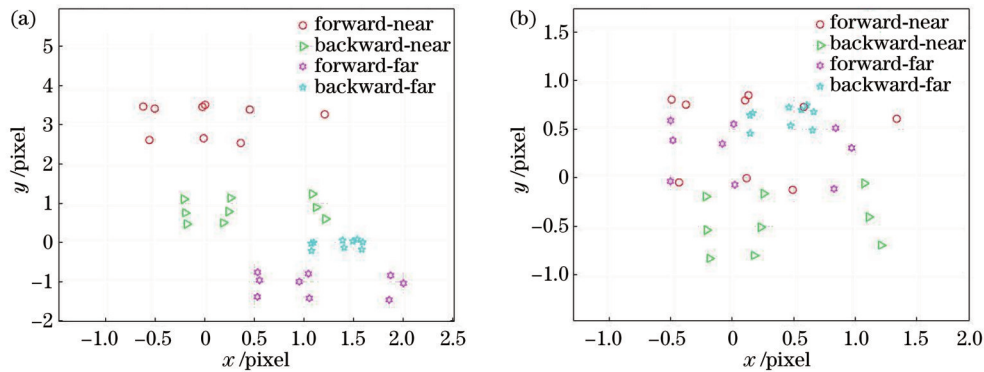


图 10 重投影误差分布图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 10 Reprojection error distribution. (a) Before optimization; (b) after optimization

5 结 论

首先,结合小孔成像模型和 T 型光电经纬仪的三差,推导出世界坐标系下的一点与摄像机图像平面上像点之间的投影方程,并将其应用于靶场光电经纬仪成像系统的非线性优化;然后,推导了投影中心坐标与三差的计算方法,提出一种仅需要 2 个标杆即可同时检测投影中心和光轴平行性三差的方法,并给出详细的算法流程图。实验结果表明,系统重投影误差小于 0.3 pixel,证明本文方法可有效解决 T 型光电经纬仪的投影中心和光轴平行性三差检测问题。但是,所提方法对 t_x 的小范围变化并不敏感,因此,如何准确高效地计算 t_x ,以进一步提升系统的检测精度,是后续需要进一步研究的问题。另外,在实际实验中仅以反投影误差进行评价,并没有将检测结果应用到最终的经纬仪测量中,尤其是高俯仰角($>65^\circ$)下的实验测量,这是后续需要进一步验证的内容。

参 考 文 献

[1] Paar R, Roić M, Marenić A, et al. Technological development and application of photo and video theodolites[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 3893.

[2] 余毅,刘震宇,孙志远,等.靶场光电测量设备发展现状及展望[J].光学学报,2023,43(6):0600002.
Yu Y, Liu Z Y, Sun Z Y, et al. Development status and prospect of photoelectric measurement equipment in range[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0600002.

[3] Li W M, Zhou L J. A rotary vision system for high-precision measurement over large size[J]. Journal of Modern Optics, 2022, 69(7): 347-358.

[4] Wang X H, Li D Y, Zhang G. Panoramic stereo imaging of a bionic compound-eye based on binocular vision[J]. Sensors, 2021, 21(6): 1944.

[5] Shi Y Q, Wang S N, Zhou S N, et al. Study on modeling method of forest tree image recognition based on CCD and theodolite[J]. IEEE Access, 2020, 8: 159067-159076.

[6] Yao Q, Wang J, Zhang J P, et al. Error analysis of measuring the diameter, tree height, and volume of standing tree using electronic theodolite[J]. Sustainability, 2022, 14(12): 6950.

[7] Xie M L, Ma C W, Liu K, et al. The application of active polarization imaging technology of the vehicle theodolite[J]. Optics Communications, 2019, 433: 74-80.

[8] 江波,梅超,梁元庆,等.基于平面方程旋转变化的车载经纬仪测角误差修正[J].光学学报,2015,35(s1):s112002.
Jiang B, Mei C, Liang Y Q, et al. Angle measurement error correction of vehicle-borne theodolite based on the rotation of plane equation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s112002.

[9] 邓辉.经纬仪视距法在测距应用中的探讨与拓展[J].上海计量测试,2022,49(3):29-33.
Deng H. Discussion and expansion of theodolite sight distance method in ranging application[J]. Shanghai Measurement and

- Testing, 2022, 49(3): 29-33.
- [10] 田留德, 刘朝晖, 赵建科, 等. 光电经纬仪姿态测量精度室内检测方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0812002.
Tian L D, Liu C H, Zhao J K, et al. Indoor test method of attitude measurement accuracy of photoelectric theodolite[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812002.
- [11] 刘勇, 韦国军, 闫龙. 基于 GPS 的光电经纬仪动态测角精度校准方法[J]. 现代信息科技, 2020, 4(22): 61-64.
Liu Y, Wei G J, Yan L. A GPS-based method for calibrating the dynamic angle measurement accuracy of photoelectric theodolite[J]. Modern Information Technology, 2020, 4(22): 61-64.
- [12] 贾峰, 衣同胜, 李桂芝. T 型架光电经纬仪动态精度检测方法的研究与应用[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 202-204, 206.
Jia F, Yi T S, Li G Z. Research and application of T model frame the photoelectric theodolite dynamic precision detection method[J]. Optical Technique, 2006, 32(S1): 202-204, 206.
- [13] 赵玮, 昌明, 刘虎, 等. 空间旋转多光轴平行性校准技术[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 627-632.
Zhao W, Chang M, Liu H, et al. Spatial rotation multi-axis parallelism adjustment and calibration technology[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 627-632.
- [14] 黄富瑜, 李刚, 史云胜, 等. 多光谱多光轴平行性检测方案设计与误差分析[J]. 光电工程, 2019, 46(2): 12-20.
Huang F Y, Li G, Shi Y S, et al. Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism testing scheme[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(2): 12-20.
- [15] 朱玮, 张尧禹, 余毅, 等. 靶场 T 型架光电经纬仪三差检测方法研究[C]//第九届全国信息获取与处理学术会议论文集 I. 北京: 中国仪器仪表学会, 2011: 394-398.
Zhu W, Zhang Y Y, Yu Y, et al. Study on three difference detection method of T-frame photoelectric theodolite in shooting range[C]//The 9th National Conference on Information Acquisition and Processing. Beijing: China Instrument and Control Society, 2011: 394-398.
- [16] 贾文武, 刘培正, 唐自力, 等. 靶场适用的光电经纬仪光轴平行性检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1670-1677.
Jia W W, Liu P Z, Tang Z L, et al. Detection method for optical-axis parallelism of photoelectric theodolite in range[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(8): 1670-1677.
- [17] 赵怀学, 刘波, 谢梅林, 等. 基于多视场拼接光电经纬仪的成像系统指向校正方法[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0612002.
Zhao H X, Liu B, Xie M L, et al. Pointing calibration method for imaging systems of photoelectric theodolites with multi-field of view stitching[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0612002.

Projection Center and Triple Difference Detection Method of T-Type Photoelectric Theodolite

Liu Yaodeng¹, Lü Yaowen^{1*}, Du Bojun², Gong Xuanrui¹, Huang Xi¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130013, Jilin, China;

²Unit 63850 of the People's Liberation Army, Baicheng 137001, Jilin, China

Abstract

Objective T-type theodolite is widely used in various test tasks due to its large measurement range, non-contact feature, high measurement accuracy, replaceable load sensor, and availability for multi-sensor sharing. The T-type theodolite has a load-carrying structure. For different test environments, different load imaging components can be installed on its side axis to reach the measurement purpose. However, after replacing the imaging detection sensor, the projection center of the optical imaging system and the position relationship between the imaging optical axis and the alignment axis of the T-type photoelectric theodolite will be changed. These factors will lead to angle deviation of the T-type photoelectric theodolite in the measurement. Therefore, the triple difference and the projection center coordinates of the T-type theodolite need to be calculated and eliminated. For the study of photoelectric theodolite, there is a lack of effective methods to simultaneously detect the projection center and triple difference. Therefore, a simple method of measuring the triple difference of T-type photoelectric theodolites is proposed in this paper. The photoelectric theodolite imaging system collects images of the near and far station poles respectively. Then, the projection center coordinates of the imaging optical system can be calculated from the image coordinates of the poles, the intrinsic parameters of the imaging system, and the encoder value of the photoelectric theodolite, thereby achieving the detection of optical axis parallelism.

Methods Firstly, the projection equation between a point in the geodetic coordinate system and the image point on the camera image plane is derived by combining the transformation relationship of the related coordinate system [Fig. 1(a)] and the camera's pinhole imaging model [Fig. 1(b)], as well as the triple difference of the photoelectric theodolite. Secondly, the projection coordinates of the station pole vertex on the image plane are obtained according to the positive and reversed images of the photoelectric theodolite, and the imaging projection relationship combining the projection center and the triple difference is derived. The influence of the translation vector and triple difference on the miss distance of the

projection point of the station pole vertex on the imaging plane is analyzed, and the projection center coordinates and triple difference of the system are calculated. Then, the optical axis parallelism of the photoelectric theodolite is detected. Finally, simulations and practical experiment results show that the proposed method is effective.

Results and Discussions Experimental results (Table 1) show the projection center coordinate values and triple difference values obtained by linear calculation according to the proposed algorithm. Before optimization, the average of the reprojection errors is calculated, which is 0.7321 pixel in the horizontal direction and 0.7146 pixel in the vertical direction [Fig. 10 (a)]. After Levenberg-Marquadt optimization, the average of the reprojection errors in the horizontal direction is 0.2744 pixel, and that in the vertical direction is 0.2287 pixel [Fig. 10 (b)]. Therefore, it can be concluded that the accuracy after optimization has been improved by about 65%, which further verifies the effectiveness and correctness of the proposed detection method.

Conclusions In this paper, the projection equation between a point in the world coordinate system and an image point on the camera image plane is derived by combining the pinhole imaging model and the triple difference of the T-type photoelectric theodolite, which can be applied to the nonlinear optimization of the photoelectric theodolite imaging system in the shooting range. Then, the calculation method of the projection center coordinate and the trilateration is derived, and a method is proposed to detect the projection center and the trilateration of the optical axis parallelism simultaneously with only two station poles, and the detailed algorithm flow chart is given. The experimental results show that the reprojection error of the system is less than 0.3 pixel, which proves that the method proposed in this paper can effectively solve the detection problem of projection center and optical axis parallelism triple difference in T-type photoelectric theodolites. However, this method is not sensitive to small-range changes of t_x , so how to accurately and efficiently calculate t_x to further improve the detection accuracy of the system is a problem that needs further research in the future. In addition, in the actual experiments, we only evaluate the reprojection errors and do not apply the detection results to the final theodolite measurement, especially for experimental measurements at high elevation angles (greater than 65°). This is the content that needs further experiments in the future.

Key words measurements; photoelectric theodolite; optical axis parallelism; projection center coordinates; triple differences