

DOI: 10.12086/oe.2018.170656

球幕点目标投影跟踪系统的精确标定方法

蔡怀宇^{1,2}, 丁蕾^{1,2*}, 黄战华^{1,2}, 刘堃^{1,2}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;²光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072

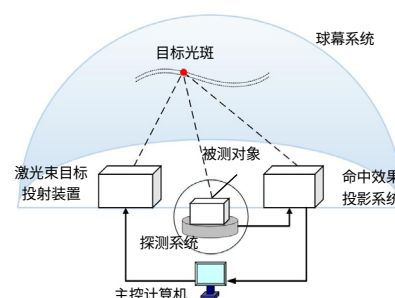
摘要: 针对球幕点目标投影与跟踪系统中多个子系统相对位置关系探测复杂的问题, 提出了一种适合现场测量的精确标定方法。将球幕作为世界坐标系, 利用子系统对球幕球心标定, 得到子系统在球幕坐标系下的坐标, 从而实现目标点在子系统之间的坐标转换。研究了球幕球心标定原理及标定点投射方法, 建立了球幕球心在标定系统坐标系下的高斯-马尔科夫(G-M)求解模型, 仿真分析了影响标定误差的因素。结果表明, 通过减小子系统到球心的距离和改进投射的标定点空间分布能够有效提高标定精度, 最后提出基于整体最小二乘(TLS)的球幕标定方法。根据仿真结果, 设计模拟球幕和标定器并完成实验, 标定结果满足现场快速精确标定的要求。

关键词: 球心标定精度; G-M 模型; 总体最小二乘; 点目标投影跟踪系统; 标定器

中图分类号: P207; TP391.41

文献标志码: A

引用格式: 蔡怀宇, 丁蕾, 黄战华, 等. 球幕点目标投影跟踪系统的精确标定方法[J]. 光电工程, 2018, 45(8): 170656



An accurate calibration method of the ball screen projection point targets tracking system

Cai Huaiyu^{1,2}, Ding Lei^{1,2*}, Huang Zhanhua^{1,2}, Liu Kun^{1,2}¹College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China

Abstract: This paper proposes an accurately calibration method which is suitable for the scene, on the issues of multiple subsystems relative position detecting complexity in a ball screen projection point targets tracking system. Take the ball screen as the world coordinate system, and mark center of the ball by subsystem to implement coordinate transformation of the projection point among the subsystems. The author studies the calibration principle and the projecting method, and provides a solution. Through Matlab simulation analysis of the error factor, simulated results show that the ball screen calibration precision can be effectively improved by reducing the distance between the subsystem and its center or perfecting the projection point spatial distribution. Eventually, this paper presents a calibration method based on the TLS and designs a virtual sphere, calibration device and finishes the experiments. The experimental results meet the demand of quick and accurate site calibration.

Keywords: calibration precision of the ball; G-M model; total least square (TLS); point target tracking system; calibration device

收稿日期: 2017-10-25; 收到修改稿日期: 2018-03-28

作者简介: 蔡怀宇(1965-), 女, 博士, 教授, 主要从事光电检测与仪器等处理方面的研究。E-mail: hycail@tju.edu.cn

通信作者: 丁蕾(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: linda_dinglei@tju.edu.cn

Citation: Cai H Y, Ding L, Huang Z H, et al. An accurate calibration method of the ball screen projection point targets tracking system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(8): 170656

1 引言

武器装备目标识别和跟踪的精确性和稳定性是目前武器智能研究中的一项重要任务^[1], 球幕点目标投影跟踪系统就是一种用于检验武器装备目标识别系统性能的半实物仿真系统, 采用一个目标模拟投射装置来模拟已知航迹的动态目标的运动, 给需要验证性能的装备提供一个测量目标, 这样就可以完全在实验室条件下进行实验, 完成对目标识别系统探测、跟踪目标能力的检测和验证^[2]。同时球幕可以展示视场较大, 纵横感强的空、地背景图案^[3-4], 以增强仿真的真实性。准确建立目标投射装置与目标识别系统之间的数据转换关系是保障球幕点目标投影跟踪系统工作性能的基本环节。

以球幕系统作为世界坐标系, 建立目标点在子系统与球幕系统之间的坐标转换关系, 从而可以得到子系统之间的数据转换关系, 但是需要提前对子系统与球幕之间的相对位置关系进行标定。一般情况下都是手动测量或者默认子系统与球幕之间的安装位置数据和设计方案一致^[5], 但是由于现场安装过程中存在误差, 子系统与球幕的相对位置关系并不能与预期设定的完全一样, 且球幕球心是一个虚拟点, 手动测量有较大的误差。

探测球心位置常用标靶定位的思想, 文献[6]提出建立高斯—马尔科夫(Gauss—Markov, G-M)模型, 用最小二乘法(least squares, LS)拟合球面点云, 得到球体的位置数据。文献[7]提出总体最小二乘法(total least squares, TLS), 能同时顾及观测向量和系数矩阵的误差。文献[8-10]等考虑系数矩阵和观测向量的协因数阵, 从不同角度给出了定权矩阵的方法, 但是这些研究都是针对一次可以获取大量的点云, 且数据测量精度较高的成熟测量系统, 如三维激光扫描机等, 只是分析了测量值的偶然误差, 没有考虑标定方案对标定结果的影响, 所提出的优化不适用于获取点难度大、数量较少且精度有限的现场标定。

本文为了解决球幕点目标投影跟踪系统的现场精确标定问题, 建立了球心标定的 G-M 模型, 通过仿真分析影响球幕标定精度的主要因素, 提出一种简便、快速、精确的标定方法。并且设计专门的标定器和模

拟球幕进行实验, 验证了所提标定方法的可行性。

2 标定原理

球幕点目标投影跟踪系统是一种计算机辅助仿真系统, 包含有激光束目标投射系统、命中效果实时投影系统、被测件探测系统等多个子系统, 结构示意图如图 1 所示。

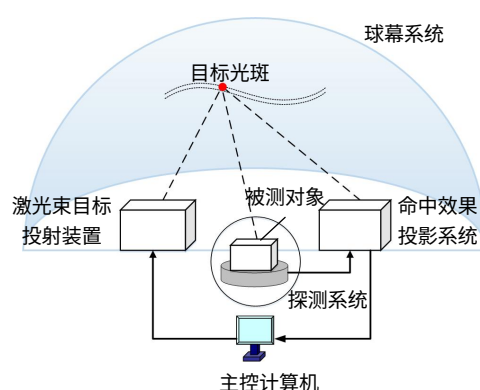


图 1 球幕点目标投影与跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Point target control and projection system structure

投射系统在球幕上投射指定的航迹目标, 位于球幕前的被测系统探测球幕上的目标点并将数据传输给主控计算机, 同时计算机控制实时投影系统在球幕上二次投射出仿真目标, 从而对被测系统的目标自动跟踪性能进行测试。在测试过程中, 子系统测量的数据是在各自系统的空间位置下得到的, 需要频繁的坐标转换来控制系统和给出性能参数评测, 利用球幕系统作为世界坐标系, 可以将复杂系统的问题转化为各子系统与球幕坐标系的转换。所以, 各子系统与球幕之间的位置标定方法的可靠性直接决定了球幕点目标投影跟踪系统的测量精度。

由于子系统都可以在球幕上直接投射或者探测目标点, 建立单一标定子系统与球幕模型示意图, 如图 2 所示。标定子系统在球幕上投射标定的目标点, 标定点对应的俯仰角 α 和方位角 β 由二维转台装置控制, 距离值 ρ 值由激光测距仪测得。

那么投射的标定点在标定子系统下的坐标为 (ρ, α, β) , 转化成对应的直角坐标 (x, y, z) 为

$$\begin{cases} x = \rho \cos \alpha \cos \beta \\ y = \rho \cos \alpha \sin \beta \\ z = \rho \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

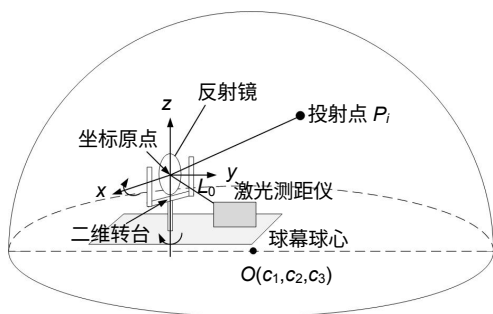


图 2 投射系统与球幕系统的模型示意图

Fig. 2 The model of projection system and ball screen system

设球幕球心 O 在标定系统坐标系下的坐标为 (c_1, c_2, c_3) ，球幕半径为 R ，则空间球面方程为

$$(x - c_1)^2 + (y - c_2)^2 + (z - c_3)^2 = R^2 \quad (2)$$

整理得：

$$2xc_1 + 2yc_2 + 2zc_3 + (R^2 - c_1^2 - c_2^2 - c_3^2) = x^2 + y^2 + z^2 \quad (3)$$

球幕半径可以是已知参数，也可以是未知参数，当半径已知时，最少三个方程可以求解；当半径未知时，则至少四个方程可以求解。本文将球幕半径作为未知参数求解，这样无需提前测量半径，可以直接通过标定获得，也满足现场使用的情况。

同样的方法可以得到球幕上 n 个标定相对于标定系统的坐标值，标定点坐标与球心坐标的关系写成 G-M 模型为

$$AX = B \quad (4)$$

其中：

$$\begin{aligned} A_{n \times m} &= \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & 2z_n & 1 \end{bmatrix}, \\ B_{n \times 1} &= \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix}, \\ X_{m \times 1} &= \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ R^2 - c_1^2 - c_2^2 - c_3^2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $n \geq 4$ ， $m = 4$ 。根据近代平差理论^[10]，考虑到系数矩阵 A 和测量矩阵 B 均含有误差的情况，建立 TLS 求解模型为

$$\begin{cases} (A + E_A)X = B + e \\ \begin{bmatrix} e \\ e_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ \text{vec} E_A \end{bmatrix} \sim \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \delta_0^2 \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & I_m \otimes I_n \end{bmatrix} \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中： E_A 代表系数矩阵 A 中的误差矩阵， $\text{vec} E_A$ 为 E_A 的拉直向量， e 是观测向量 B 中的误差， δ_0^2 为单位权方差，“ $\otimes$ ”为“kronecker 积”($M \otimes N = [m_{ij}N]$ ， $M = [m_{ij}]^{(11)}$)，TLS 的估计准则为

$$e^T e + (\text{vec} E_A)^T \text{vec} E_A = \min \quad (7)$$

将 TLS 采用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)法求解^[7]，就可以得到球幕球心的坐标 (c_1, c_2, c_3) 和半径 R ，即完成标定系统与球幕之间相对位置的标定。

3 标定法仿真分析

系统的标定过程可以利用 MATLAB 仿真软件来模拟，球幕半径一般为 10000 mm~15000 mm，因此仿真分析过程在半径为 10000 mm 球幕下进行，方位角范围为 $\left[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right]$ ，俯仰角范围为 $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 。对式(1)求全微分，得：

$$\begin{cases} dx = \frac{\partial x}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial x}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial x}{\partial \beta} d\beta \\ = (\cos \alpha \cos \beta) d\rho - \rho \sin(\alpha + \beta) d\theta \\ dy = \frac{\partial y}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial y}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial y}{\partial \beta} d\beta \\ = (\cos \alpha \sin \beta) d\rho + \rho \cos(\alpha + \beta) d\theta \\ dz = \frac{\partial z}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial z}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial z}{\partial \beta} d\beta \\ = (\sin \alpha) d\rho + (\rho \cos \alpha) d\theta \end{cases} \quad (8)$$

设标定点个数为 n 、标定点之间的夹角为 $\theta(^{\circ})$ 、标定子系统到球心的距离为 $d(\text{mm})$ 、测距误差为 $\sigma_\rho(\text{mm})$ 、方位角和俯仰角的测角误差分别 $\sigma_\alpha(\text{密位})$ 、 $\sigma_\beta(\text{密位})$ ，下面将通过式(8)分析各个因素对标定结果的影响。

3.1 标定点的选取对标定结果的影响

标定点的选择包括标定点的个数以及空间分布，确定最优的标定点，既可以保证球幕球心位置求解的精确性，又可以减小标定的工作量，达到现场快速标定的目的。

采用不同的标定点个数进行 5 组仿真实验，标定

误差如图 3 所示。随着标定点个数的增加,球幕球心标定精度提高,当增加到 6 个标定点以后,增加标定点数目对标定精度改善不明显。所以,综合考虑现场标定,采用 6 个点进行模拟验证。

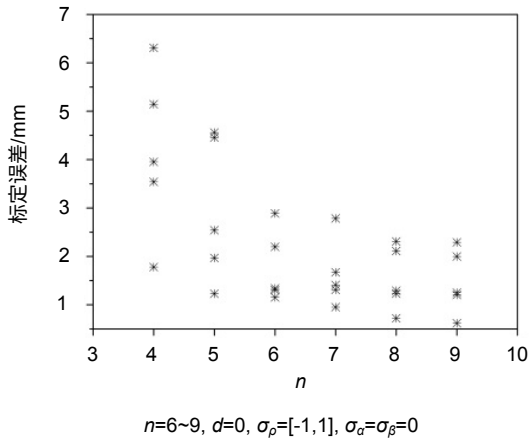


图 3 标定点个数对标定精度的影响

Fig. 3 The influence of point number on the calibration accuracy

设置 $n=6, d=0, \sigma_p=0$, 方位角和俯仰角的测量误差都为 $d\theta$, 即 $\sigma_\alpha=\sigma_\beta=d\theta$, 分别考虑在 1 密位、1.5 密位、2 密位误差的情况下对应的标定误差, 标定结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 在测量精度处于同一水平的情况下, 标定点之间的夹角越大, 球心标定误差越小, 在 1 密位测角误差下、夹角大于 30° 时对应的标定误差趋于稳定。所以在现场标定时, 标定点需要尽可能分散在整个球幕空间, 同一组标定点之间的夹角越大越好。同时可以看出角度误差对标定精度的影响较大, 所以测量中应该对角度精度有较高的要求。

3.2 标定系统位置对标定结果的影响

在系统设计时, 由于子系统自身的体积等因素,

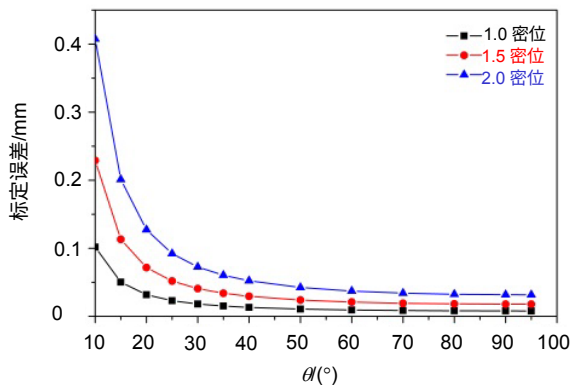


图 4 标定点之间的夹角对标定误差的影响

Fig. 4 The influence of the angle between the fixed points on the calibration accuracy

子系统并不能放置在理想的球心位置, 在不考虑测距本身误差的情况下, 当子系统位于球心之外的其他位置时, 子系统投射出来的光线在球幕上投射的目标点坐标会受到测角误差的影响, 表现为测距的真实值会因为测角误差的存在而偏离理论值。分析标定系统与球心的相对位置关系对标定精度的影响能够提前指导系统的设计, 同时能帮助预估最佳的子系统位置范围。

当测角值存在 1 密位的误差时, 设 $n=6, \sigma_p=0, \sigma_\alpha=\sigma_\beta=[-1,1]$, 标定子系统分别沿着 x 、 y 、 z 三个坐标轴的方向偏离球心时, 分析 $d=0\sim 6000$ mm 范围内对标定精度的影响, 如图 5 所示。

在 x 、 y 、 z 三个方向显示出不同的增幅曲线, 主要是由于标定点分布的影响, 但是在三个方向上都满足球心的标定误差随着 d 的增大而增大。所以在实际系统设计中, 子系统应该尽量位于靠近球心的位置, 能够最大程度地减小角度测量误差对测距的影响, 从而提高标定精度。

3.3 测量误差对标定结果的影响

通过对影响标定结果的因素分析, 考虑在一定的影响因素范围内, 测量误差对标定结果的影响。设置球幕半径为 12000 mm, 球心的坐标为(0 mm, 1000 mm, 0 mm), 在球幕上取六个标定点, 标定点之间的夹角大于 30° 时进行不同测量误差下的实例仿真。

图 6~图 8 分别为方位角和俯仰角测角误差为 1 密位、测距误差为 1 mm 的随机误差下, 运行 1000 次对应的球心拟合误差。图 9 为 -1 密位~1 密位的随机测角误差、-1 mm~1 mm 的随机测距误差下, 运行 1000 次拟合的球心分布, 多变量情况下拟合的球幕球心位置 90% 以上分布在半径为 2 mm 的误差圆以内, 误差低

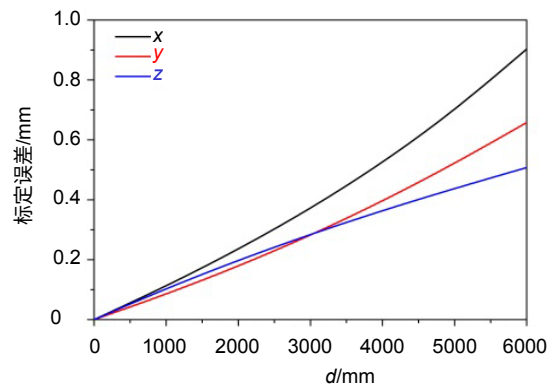


图 5 d 对标定精度的影响

Fig. 5 The influence of d on the calibration accuracy

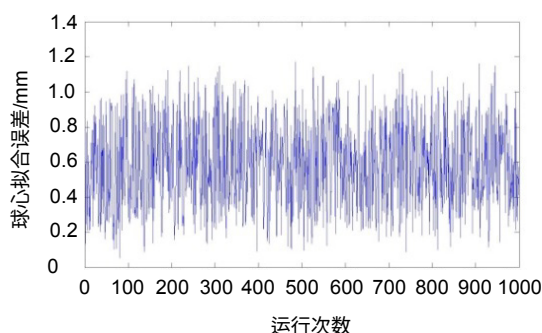


图6 方位角误差对应的球心拟合误差

Fig. 6 The influence of azimuth error

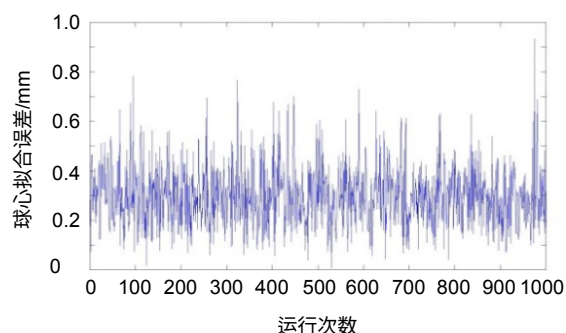


图7 俯仰角误差对应的球心拟合误差

Fig. 7 The influence of pitching error

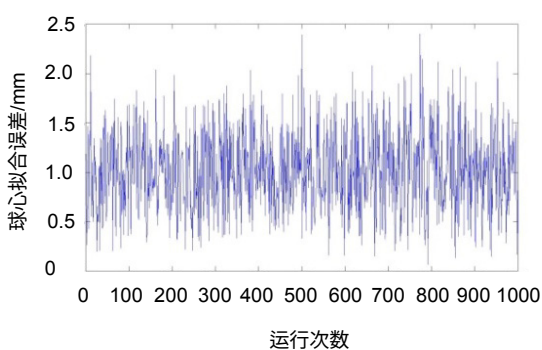


图8 测距误差对应的球心拟合误差

Fig. 8 The influence of distance error

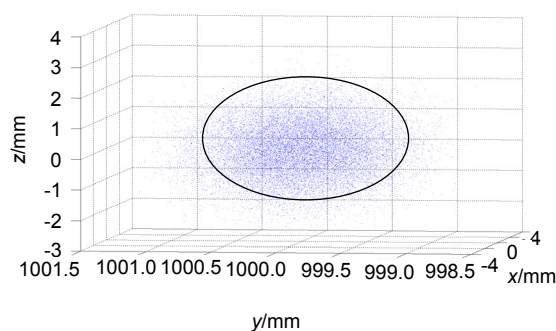


图9 多变量存在误差时拟合的球心分布

Fig. 9 The influence of multivariate error

于 0.4%。

综合考虑影响标定精度的各项因素,除了系统测量误差外,标定点个数和标定点之间的夹角是影响标定精度的主要因素,但是一次拟合中,标定点个数的增加与标定点之间的夹角均值增加不能同时实现,所以,提出基于 TLS 的球幕 6 点标定法。通过以上仿真结果可得,在标定时测角误差为 1 密位、测长误差为 1 mm、标定点为 6 个、标定点之间的夹角大于 30°、标定系统与球心距离不大于 1000 mm 的情况下,所提出的标定方法是可行的,且标定精度满足现场标定的需求。

4 标定实验

标定实验装置示意图如图 10 所示。将长度为 2500 mm 的钢管一端固定在万向节上,另一端安装由散射材料制成的接收面,用于模拟球心位于万向节旋转中心,半径固定的球幕。为标定测量系统设计了一个专用坐标标定器辅助工具,过二维旋转结构的轴心安装

平面反射镜,手持式激光测距仪的激光束通过反射镜中心反射后进行测距。目标到旋转中心反射点的距离 ρ 等于测距距离 L 减去测距仪参考点到反射镜中心点的距离 L_0 ,而 L_0 是固定不变的,可以事先精密测量,作为工作常数保存,该平面反射镜可以独立进行方位角和俯仰角旋转,因此可以测量多个角度方向上球幕到反射镜中心点(称为测量原点)的距离。测距误差为 1 mm,角度定位误差小于 1 密位,在标定器与球心距离小于 300 mm 的位置进行实验。本实验使用标定器的两次位移量,也就是通过球幕世界坐标系转换之后的两个子系统的距离作为实验标定结果,位移平台实际控制标定器的位移量作为真实值。

实验过程为:将标定器固定在位移平台上,电机控制标定器移动到位置①,选择标定器方位角和俯仰角,摆动球幕钢管外侧追寻激光束投射方向后固定不动,用激光测距仪读出对应的距离,改变标定器方位角和俯仰角,可以得到 6 个标定点的坐标,计算得到在球幕为世界坐标系的情况下,标定器位于①时在球

幕坐标系下的坐标。电机控制标定器移动至②、③，同样的方法计算出标定器在位置②、③时的坐标。球幕球心位置是固定不变的，改变的是标定器的位置，拟合得到的坐标两两相减就可以得到每次标定器的相对位移，位移平台控制标定器的位移量分别为 200 mm、300 mm、500 mm。图 11 为实际的实验装置图。

表 1 为标定结果，在 500 mm 的位移量下，标定

结果的标准差为 2.18 mm，说明所提标定方案的稳定性较高，分析测量的数据，数据全部比真实值偏小，对数据整体进行误差补偿，发现存在系数为 0.98 的由激光测距仪的测量误差造成的系统误差，可以据此对激光测距值进行误差补偿。补偿后的数据均值与真实值一致，标准差控制在 2.22 mm 以内，重复标定误差为 0.44%，满足现场标定的精度需求。

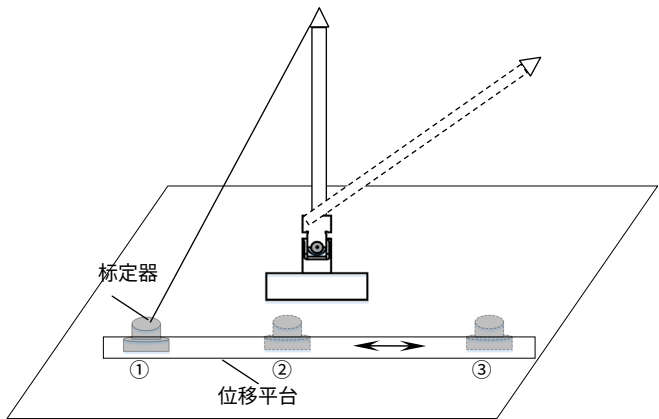


图 10 实验装置示意图

Fig. 10 Experimental schematic diagram



图 11 实验装置图

Fig. 11 The experimental device

表 1 标定结果

Table 1 The calibration results

实验	标定实验测得的标定器位移量/mm			标定器位移量补偿后的数据值/mm		
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 1	位置 2	位置 3
1	197.08	297.52	494.59	200.27	301.66	502.35
2	196.88	299.96	496.82	200.07	304.13	504.61
3	199.83	293.54	490.99	203.07	297.62	498.70
4	195.64	296.82	492.42	198.81	300.95	500.15
5	195.36	293.90	489.25	198.53	297.98	496.93
6	195.49	294.76	490.23	198.65	298.86	497.92
7	195.02	296.09	491.10	198.18	300.21	498.81
8	195.74	295.92	491.63	198.91	300.04	499.35
9	197.53	297.34	493.33	200.73	301.48	501.07
10	195.59	294.60	490.17	198.76	298.70	497.86
11	196.88	299.96	496.82	200.07	304.13	504.61
12	199.65	292.65	491.47	202.88	296.71	499.18
13	195.69	296.37	492.03	198.86	300.49	499.76
均值	196.81	295.89	492.27	200.00	300.00	500.00
标准差	1.58	2.18	2.18	1.60	2.21	2.22

5 结 论

本文提出一种球幕点目标投影跟踪系统的精确标定方法,利用球幕作为世界坐标系,能够快速标定出球幕球心与子系统中心的位置关系。利用 MATLAB 仿真分析影响标定精度的主要因素,通过提高空间标定点个数、增大空间标定点之间的夹角、减小子系统到球心的距离能够有效提高精度,且实例分析了球幕半径为 12000 mm、空间投射标定点为 6 个、相互夹角大于 30°、子系统中心位于距离球心 1000 mm 处时,在测距误差为 1 mm,测角误差为 1 密位的情况下的球心标定误差,仿真结果满足现场标定的要求。最后设计模拟球幕和标定器完成标定实验,验证方案的可行性。本文的结论和实验设计思路对球幕多系统标定具有一定的指导意义。

参考文献

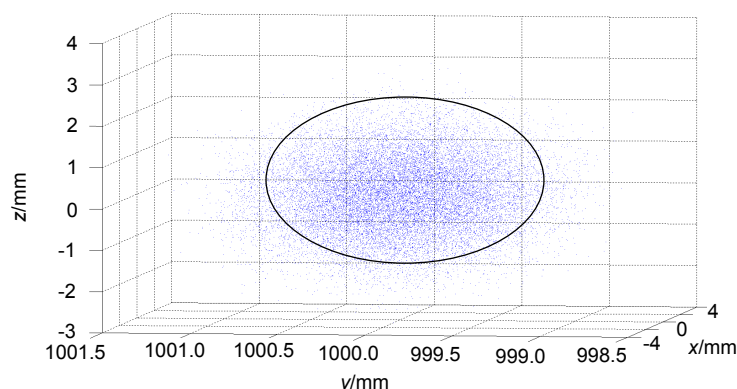
- [1] 周立伟,刘玉岩.目标识别与探测[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
- [2] 董明.XX目标坐标测定仪伺服控制系统的设计与实现[D].南京:南京理工大学,2012.
- [3] Sun X, Bai J G, Wang Z H. Design and study of the dome-screen projector optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1766–1769.
孙鑫,白加光,王忠厚.球幕投影光学系统的设计与研究[J].光子学报,2006, **35**(11): 1766–1769.
- [4] Huang Z H, Zhang C, Cai H Y, et al. The research of joint control algorithm of moving target dome projection based on two-axis turntable[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(9): 32–37.
黄战华,张超,蔡怀宇,等.基于二轴转台的运动目标球幕投影联合控制[J].光电工程,2014, **41**(9): 32–37.
- [5] Gao J B, Li J J, Sun Z J, et al. Simulation of multi-wavelength laser composite point target motion[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(3): 562–567.
高教波,李建军,孙治家,等.多波长激光复合点目标运动模拟[J].应用光学,2011, **32**(3): 562–567.
- [6] 官云兰.地面三维激光扫描数据处理中的若干问题研究[D].上海:同济大学,2008.
- [7] Lu T D, Zhou S J, Zhang L T, et al. Sphere target fixing of point cloud data based on TLS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, **29**(4): 102–105.
鲁铁定,周世健,张立亭,等.基于整体最小二乘的地面激光扫描标靶球定位方法[J].大地测量与地球动力学,2009, **29**(4): 102–105.
- [8] Chen W X, Chen Y, Yuan Q, et al. Application of weighted total least-squares to target fitting of three-dimensional laser scanning[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, **30**(5): 90–96.
陈伟翔,陈义,袁庆,等.加权总体最小二乘在三维激光标靶拟合中的应用[J].大地测量与地球动力学,2010, **30**(5): 90–96.
- [9] Jazaeri S, Amiri-Simkooei A R, Sharifi M A. Iterative algorithm for weighted total least squares adjustment[J]. *Survey Review*, 2014, **46**(334): 19–27.
- [10] Wang L Y, Chen H Q, Lin Y D, et al. Spherical target positioning of 3D laser scanning by using robust WTLS method[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, **36**(8): 745–749.
王乐洋,陈汉清,林永达,等.利用稳健 WTLS 方法进行三维激光扫描标靶球定位[J].大地测量与地球动力学,2016, **36**(8): 745–749.
- [11] 黄维彬.近代平差理论及其应用[M].北京:解放军出版社,1992.
- [12] 魏木生.广义最小二乘问题的理论和计算[M].北京:科技出版社,2006.
- [13] Muellner J. *Multispectral Target Simulation Dome for Hardware-in-the-loop Simulation of fire Control and Optronic Seeker Systems*[M]. Orlando: SPIE, 2004, **5408**: 22–32.
- [14] Schaffrin B. A note on constrained total least-squares estimation[J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 2006, **417**(1): 245–258.
- [15] Zhang H L, Lin J R, Zhu J G. Three-dimensional coordinate transformation accuracy and its influencing factors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(10): 26–31.
张皓琳,林嘉睿,郝继贵.三维坐标转换精度及其影响因素的研究[J].光电工程,2012, **39**(10): 26–31.

An accurate calibration method of the ball screen projection point targets tracking system

Cai Huaiyu^{1,2}, Ding Lei^{1,2*}, Huang Zhanhua^{1,2}, Liu Kun^{1,2}

¹College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Tianjin University),
Ministry of Education, Tianjin 300072, China



The fitting of the ball center distribution in multi-variable error

Overview: The ball screen projection point targets tracking system is a hardware-in-loop simulation system, which is used for testing the tracking and hitting performance of tanks or artillery. The testing can be achieved completely under laboratory, so it has become a popular research topic. It is multiple subsystems coordination work, so the data needs convert into the same coordinate system to give the control and evaluation by frequent coordinate transformation between the subsystems. As important parameters of coordinate transformation, the precision and maneuverability of the calibration result of subsystems relative position will affect the using range and test conditions of the simulation system. Generally, the distance date between the subsystems and the ball are measured by man or directly adopted the design scheme. However, the error is unavoidable in the field installation process. The relative positional relation cannot be exactly the same as the design scheme. In addition, the center of the ball screen is a virtual point and the manual measurement has a large error. The relevant researches aim at a mature measurement system that can acquire a large number of point clouds at a time and have high data measurement accuracy, such as the three-dimensional laser scanner. Only the accidental errors are analyzed and the impact of the calibration scheme is not taken into account on the calibration results. Therefore, these researches proposed optimization scheme is not applicable for the field calibration with small quantity and limited precision. This paper proposes an accurately calibration method, which is suitable for the scene on the issues of multiple subsystems relative position detecting complexity in a ball screen projection point targets tracking system. Take the ball screen as the world coordinate system, and mark center of the ball by subsystem to implement coordinate transformation of the projection point among the subsystems. The author studies the calibration principle and the projecting method, and provides a G-M solution model for the center of the ball screen in a calibration system coordinate system. Through Matlab simulation analysis of the error factor, simulated results show that the ball screen calibration precision can be effectively improved by reducing the distance between the subsystem and its center or perfecting the projection point spatial distribution. Eventually, this paper presents a calibration method based on the TLS and designs a virtual sphere, calibration device and finishes the experiments. The accuracy of the calibration is 0.44%, and the results meet the demand of quick and accurate site calibration.

Citation: Cai H Y, Ding L, Huang Z H, *et al.* An accurate calibration method of the ball screen projection point targets tracking system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(8): 170656

* E-mail: linda_dinglei@tju.edu.cn