

DOI 10.13494/j.npe.20140069

杨文辉,林嘉睿,高扬,等. 激光标靶位姿测量系统的建模与误差分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(4): 293-298.

Yang Wenhui, Lin Jiarui, Gao Yang, et al. Modeling and error analysis of laser target pose measurement system [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, 13(4): 293-298 (in Chinese).

激光标靶位姿测量系统的建模与误差分析

杨文辉¹, 林嘉睿¹, 高扬¹, 孟祥瑞¹, 邹剑²

(1. 测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 机械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要: 针对大尺寸组合精密测量的需求, 提出一种新型激光标靶位姿测量方法. 首先介绍了其测量原理, 并采用基于插值的非参数模型标定方法建立了入射光线姿态和相机靶面光斑的位置关系, 通过基于参考棱镜的反向解算方法求解相机坐标系和激光标靶坐标系的位姿关系, 构建了该测量系统的数学模型. 基于此模型分析了测量系统的误差源, 并对模型中影响测量结果的因素进行了仿真分析. 最后通过实验进一步验证了模型的可行性和有效性.

关键词: 激光标靶; 位姿测量; 数学模型; 误差分析

中图分类号: TH741

文献标志码: A

文章编号: 1672-6030(2015)04-0293-06

Modeling and Error Analysis of Laser Target Pose Measurement System

Yang Wenhui¹, Lin Jiarui¹, Gao Yang¹, Meng Xiangrui¹, Zou Jian²

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Regarding the demand of large size composite precision measurement, a new method for laser target pose measurement system was proposed. First, the measuring principle was introduced, and the relationship between incident light pose and position of the camera target spot was established by using the nonparametric model calibration method based on interpolation. The position relationship between camera coordinate and laser target coordinate was solved by using back-calculation method based on reference prism, and the overall mathematical model was established. Then for this model, the error sources of the measurement system were analyzed and the simulation results of factors which affect measurement accuracy were given. Finally, the feasibility and effectiveness of the model proposed was verified by experiment.

Keywords: laser target; pose measurement; mathematical model; error analysis

随着我国重大基础装备工业的不断推进和发展, 在大型设备对接、盾构导向、船舶装备和导向、电力能源设备制造和监测等领域中, 大尺寸空间内的位姿测量发挥着重要作用^[1]. 目前位姿测量面临着测量空间大、精度要求高、被测对象外形复杂等问题, 单一位姿测量方法难以满足需求^[2-3]. 基于多种测量方法结合的组合测量方法逐渐成为发展需要. 激光标靶位姿测量

是利用激光标靶配合全站仪或激光跟踪仪等测量仪器完成全空间内测量的一种组合测量方法, 具有很好的应用和发展前景. 国内外研制了各种类型的激光标靶, 国外的激光标靶导向系统主要有英国的 ZED 系统^[4]、德国的 VMT 系统^[5]等. 在测量目标姿态的俯仰角和滚转角时, 这两种导向系统都是通过激光标靶内置的倾角仪完成; 在测量方位角时, 需要在全站仪上安装准直

收稿日期: 2015-02-16.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20130032120067).

作者简介: 杨文辉(1992—), 男, 硕士生.

通讯作者: 林嘉睿, 讲师, linjr@tju.edu.cn.

激光器,并且保证其轴线和全站仪内部测距仪轴线平行.国内华中科技大学开发了基于 CCD 摄像机和倾角仪相结合的全站仪激光标靶,其标称的水平角测量精度不超过 0.5 mrad ^[6].由激光跟踪仪、高速相机和特征目标构成的 T-Mac 6D 激光跟踪位姿测量系统^[7],其姿态角测量精度为 0.01° (0.17 mrad),姿态角测量基于单目视觉测量原理,通过激光跟踪仪的 T-Cam 识别特征目标上至少 4 个发光点,从而解算被测目标的姿态,但其测量精度受背景杂散光影响,并且特征目标上多点光源在成像时易被遮挡,测量范围受相机视场的限制.

上述激光标靶测量系统安装要求高、测量效率和精度低,T-Mac 6D 激光跟踪位姿测量系统无法满足大尺寸组合精密测量需求.针对上述问题,天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室研制了一种新型激光标靶^[8],新型激光标靶基于嵌入式平台,结合了相机和倾角仪,具有便携性好、测量范围广和精度高等优点,其与全站仪或激光跟踪仪等结合构成位姿测量系统.本文构建了该测量系统的数学模型,并对模型中影响测量结果的因素进行了仿真分析,最后通过实验进一步验证模型的可行性和有效性.

1 激光标靶位姿测量系统的数学模型

1.1 坐标系定义

激光标靶位姿测量系统主要由激光标靶和全站仪或激光跟踪仪组成,其中激光标靶由带切口的全反射棱镜、倾角仪、相机以及嵌入式系统等部件组成.激光标靶位姿测量系统坐标系定义如图 1 所示. $O-XYZ$ 是参考坐标系,即全站仪坐标系. $O-X_1Y_1Z_1$ 是激光标靶坐标系,其原点为棱镜反射中心,激光标靶坐标系的 X_1 轴和 Y_1 轴分别平行于倾角仪两个测量轴 x 轴和 y 轴,

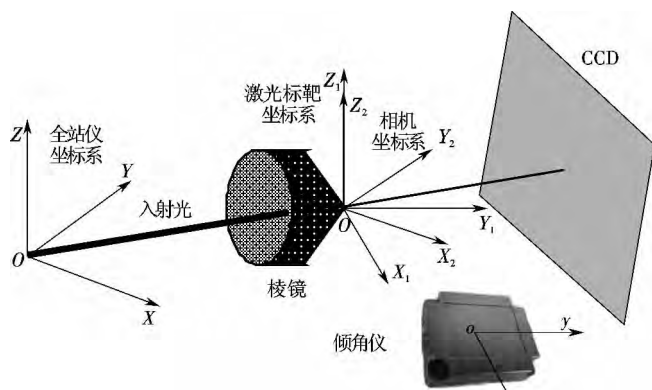


图 1 激光标靶位姿测量系统坐标系定义

Fig. 1 Coordinate system definition of laser target pose measurement system

Z_1 轴满足正交右手坐标系.相机成像光路中加入了带切口的全反射棱镜,但其成像依然满足小孔成像的基本特征,根据小孔成像的几何模型^[9]定义了相机坐标系 $O-X_2Y_2Z_2$,其原点与激光标靶坐标系的原点重合, Z_2 轴与激光标靶坐标系 Z_1 轴平行, X_2 轴和 Y_2 轴满足正交右手坐标系.

1.2 激光标靶俯仰角和滚转角的求解

激光标靶的俯仰角和滚转角通过双轴倾角仪测量得到.根据倾角仪的测量原理^[10],双轴倾角仪两个测量轴 x 轴和 y 轴相互垂直,构成测量平面,能测量自身与大地水平面间的夹角,倾角仪与水平面空间位置关系如图 2 所示.

根据坐标系定义,可得激光标靶的俯仰角 β 和滚转角 γ ^[6] 为

$$\begin{cases} \beta = \beta' \\ \gamma = \arcsin\left(\frac{\sin\gamma'}{\cos\beta}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 γ' 和 β' 分别为倾角仪 x 轴和 y 轴的测量数据.

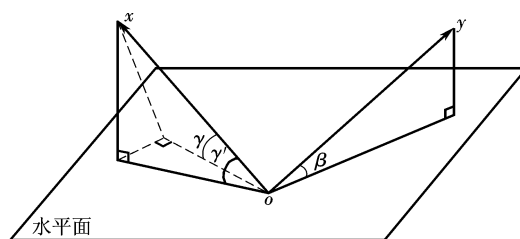


图 2 倾角仪与水平面位置关系

Fig. 2 Schematic of location of inclinometer and horizontal plane

1.3 激光标靶方位角的求解

本文定义的 3 个姿态角(方位角、俯仰角和滚转角)为 ZXY 顺规,在全站仪坐标系下,激光标靶的姿态由方位角、俯仰角和滚转角确定.激光标靶坐标系下的点经过反滚转、反俯仰和反方位可得到其在全站仪坐标系下的点.方位角求解示意如图 3 所示.

设激光标靶在全站仪坐标系下的俯仰角为 β 、滚转角为 γ .入射光直线在全站仪坐标系下的方位角为 θ ,在标靶坐标系下的方位角为 α_0 、俯仰角为 β_0 ,则取直线上的一点 $[\tan\alpha_0, 1, \tan\beta_0]^T$,通过反滚转和反俯仰后的点 $[x_0, y_0, z_0]^T$,则:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tan\alpha_0 \\ 1 \\ \tan\beta_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

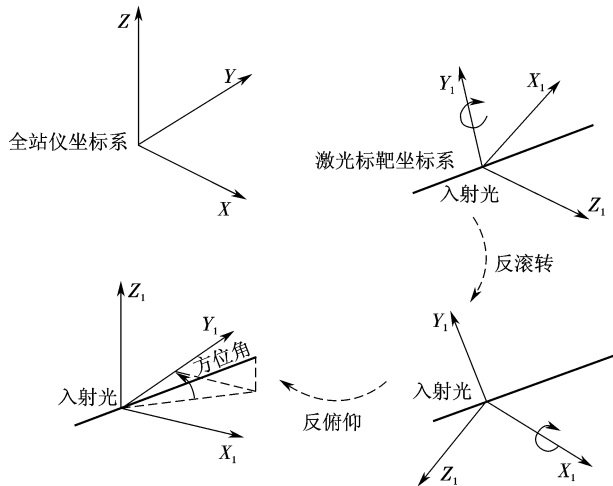


图 3 方位角求解示意

Fig. 3 Schematic diagram of yaw solving

由式(2)可求出激光标靶坐标系的 Y_1 轴与入射光在全站仪坐标系水平面的夹角 α' 为

$$\alpha' = \arctan\left(\frac{x_0}{y_0}\right) = \arctan\left(\frac{\cos\gamma\tan\alpha_0 + \sin\gamma\tan\beta_0}{\cos\beta + \sin\beta(\sin\gamma\tan\alpha_0 - \cos\gamma\tan\beta_0)}\right) \quad (3)$$

α' 加上入射激光在全站仪坐标系下的方位角 θ , 即得激光标靶坐标系在全站仪坐标系下的方位角 α 为

$$\alpha = \theta + \alpha' \quad (4)$$

求解方位角 α 需要确定入射光在标靶坐标系下的姿态, 主要通过以下两个步骤完成。

(1) 标定入射光姿态角与光斑位置关系. 本文采用基于拟合插值的非参数模型标定方法来标定两者的直接关系^[11], 通过对相机成像进行光学模拟标定, 逐像元精密标定 CCD 靶面, 建立起入射光姿态角(方位角和俯仰角)与像面坐标的映射表, 则任意像面对应的入射光姿态角(方位角和俯仰角)可通过对标定的映射表插值得到。

(2) 确定相机坐标系与激光标靶坐标系的相对位姿关系. 根据图 1 所示的坐标系定义, 相机坐标系与激光标靶坐标系之间只有方位关系没有确定. 考虑到系统各个环节存在的误差, 运用系统的整体精度去约束误差, 利用基于参考棱镜的反向解法标定两者之间的方位角。

激光标靶在全站仪坐标系下的坐标为 $[X_i, Y_i, Z_i]^T$, 方位角、俯仰角以及滚转角分别为 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$. 测量激光在全站仪坐标系下的方位角为 θ_i , 在激光标靶

坐标系下的方位角为 μ_i' , 俯仰角为 ν_i' , 在相机靶面上形成的光斑中心坐标为 $[x_i, y_i]^T$, 通过插值得到所对应的测量激光在相机坐标系下的方位角为 μ_i , 俯仰角为 ν_i . 参考棱镜在全站仪坐标系下的坐标为 $[A_i, B_i, C_i]^T$, 在激光标靶坐标系下的坐标为 $[x, y, z]^T$, 激光标靶坐标系到参考坐标系的旋转矩阵为 R , 相机坐标系和激光标靶坐标系之间的方位角为 $\Delta\alpha$. 假设参考棱镜和激光标靶固定于同一个刚体, 那么在激光标靶刚体变换姿态过程中, 参考棱镜和激光标靶相对位姿关系不变, 由此可得

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mu_i' = \mu_i + \Delta\alpha \\ \nu_i' = \nu_i \end{cases} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_i & -\sin\beta_i \\ 0 & \sin\beta_i & \cos\beta_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\gamma_i & 0 & \sin\gamma_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma_i & 0 & \cos\gamma_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

结合式(3)和式(4), 在刚体的每个位姿下, 都可求解得到 $\Delta\alpha$, 多次测量取平均值作为相机坐标系与激光标靶坐标系之间的方位角. 综合可得, 激光标靶方位角解算模型为

$$\alpha_i = \theta_i + \arctan\left(\frac{\cos\gamma_i \tan(\mu_i + \Delta\alpha) + \sin\gamma_i \tan\nu_i}{\cos\beta_i + \sin\beta_i(\sin\gamma_i \tan(\mu_i + \Delta\alpha) - \cos\gamma_i \tan\nu_i)}\right) \quad (8)$$

2 误差分析

针对本文建立的激光标靶位姿测量模型, 其误差来源总体上有 4 个方面: 相机光斑位置与入射光线姿态角映射误差、相机坐标系与激光标靶坐标系位置关系误差、倾角仪测量误差、全站仪测量误差. 为了研究激光标靶测量系统的误差分布, 分别分析单项误差的影响, 并对测量模型中影响测量结果的因素进行仿真分析。

2.1 误差源

(1) 相机光斑位置与入射光线角度映射误差

该部分的误差主要包含两个方面: 入射光斑中心位置提取误差和非参数模型标定方法插值引起的误差. 在图像光斑效果理想且占据 10 个以上像素情况

下,图像中心提取精度可达0.1个像素.非参数模型标定方法插值引起的误差可通过对整个相机靶面进行较为密集而精密的标定而减小.

(2) 相机坐标系与倾角仪坐标系位置关系误差

本文通过基于参考棱镜的反向求解法标定位置关系,其误差源主要是全站仪测量误差、倾角仪测角误差和光斑采集的重复性误差等综合引起,反向求解法通过整体精度约束以及多次测量求解相对位置关系从而减小误差.

(3) 倾角仪测量误差

倾角仪型号为DA-A45,分辨力为0.0001°,标称的标准差为0.005°,该标准差是在多种测试环境下的整体评价结果.

(4) 全站仪测量误差

全站仪型号为Leica TS15,标称测角精度为1",测距精度为 $(1 + 1.5 \times 10^{-6} D)$ mm(D 为距离).实际上通过空间定长测试,全站仪位移测量精度甚至可达0.1 mm.一些文献也表明全站仪的实际测量精度远高于其标称值^[12].

2.2 误差分析

(1) 俯仰角和滚转角误差分析

在激光标靶姿态测量模型中,俯仰角和滚转角是通过倾角仪得到,根据式(1)可得到,俯仰角最大误差等于倾角仪的最大误差,即0.005°.滚转角测量误差如式(9)所示,在倾角仪的量程($-15^\circ \sim 15^\circ$)内,通过数值仿真分析,得到滚转角最大测量误差为0.006°.

$$\Delta\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\gamma}\delta_{\gamma'}\right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial\beta}\delta_{\beta'}\right)^2} \quad (9)$$

式中 $\Delta\gamma$ 、 $\delta_{\gamma'}$ 、 $\delta_{\beta'}$ 分别为滚转角 γ 、倾角仪 x 轴和 y 轴测量数据 γ' 和 β' 的误差.

(2) 方位角误差分析

针对激光标靶方位角求解模型,利用数学解析仿真方法分析可能的影响因素与方位角误差的关系.通过对误差源的分析,结合误差分析理论^[13],方位角测量误差表示为

$$\Delta\alpha_i = \left[\left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial\gamma_i}\delta_{\gamma_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial\beta_i}\delta_{\beta_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial\mu_i}\delta_{\mu_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial\nu_i}\delta_{\nu_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial\Delta\alpha}\delta_{\Delta\alpha} \right)^2 + \delta_{\theta_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: $\Delta\alpha_i$ 、 δ_{γ_i} 、 δ_{β_i} 分别为激光标靶方位角、滚转角以及俯仰角的误差; δ_{μ_i} 、 δ_{ν_i} 分别为入射光在相机坐标系下的方位角和俯仰角的角度映射偏差; $\delta_{\Delta\alpha}$ 为相机坐标系和激光标靶坐标系之间的方位角的偏差; δ_{θ_i} 为全站仪入射激光方位角误差.

在入射光角度映射偏差影响中,设定激光标靶的

俯仰角和滚转角均为 10° ,映射后的入射光方位角和俯仰角偏差取 $-0.1^\circ \sim 0.1^\circ$,入射激光在相机坐标系下的方位角和俯仰角为 $(5^\circ, 5^\circ)$ 时入射光角度映射偏差的影响如图4所示.结果表明,入射光线角度映射偏差对激光标靶方位角影响是不同的,而且误差对入射光方位角的偏差更为敏感,这是因为测量系统的滚转角量程小($-15^\circ \sim 15^\circ$),使得俯仰方向的误差在水平面内的分量较小.

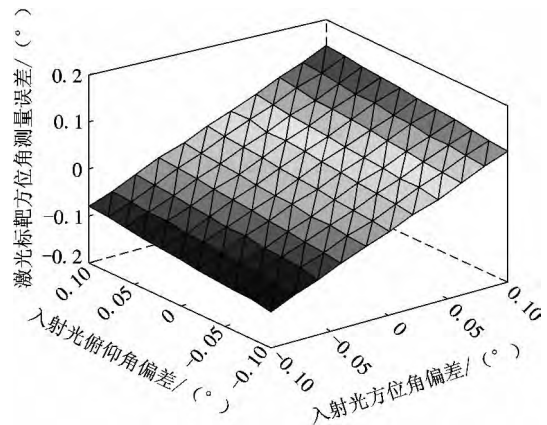


图4 入射光角度映射偏差的影响

Fig. 4 Influence of angle mapping errors of incident light

在相机坐标系与激光标靶坐标系位置关系误差影响中,设定激光标靶的俯仰角和滚转角均为 10° ,入射激光在相机坐标系下的方位角和俯仰角为 $(5^\circ, 5^\circ)$,相机坐标系和激光标靶坐标系的标定方位角偏差取 $-0.1^\circ \sim 0.1^\circ$,相机与激光标靶标定方位角误差的影响如图5所示.从仿真结果可以看出,标定方位角偏差与激光标靶测量方位角误差呈线性关系,且大小近似相等.在本模型中,运用基于参考棱镜的反向解算求解该位置关系,并通过多次测量取平均值的方法,减小两

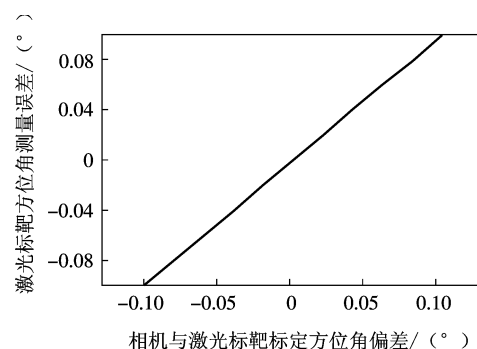


图5 相机与激光标靶标定方位角偏差的影响

Fig. 5 Influence of calibrated azimuth angle errors from camera and laser target

者方位角偏差对测量精度的影响,如果有必要,可以使用最优化方法进行整体约束求解相对方位角,进一步提高系统精度。

在测量模型中,激光标靶方位角的求解依赖于俯仰角和滚转角。为了单独分析俯仰角和滚转角对激光标靶方位角误差的影响,设定激光标靶的俯仰角和滚转角均为 10° ,偏差取 $-0.1^\circ \sim 0.1^\circ$,入射激光在相机坐标系下的方位角和俯仰角为 $(5^\circ, 5^\circ)$,俯仰角和滚转角偏差的影响如图 6 所示。结果表明,俯仰角和滚转角对误差的影响较小。

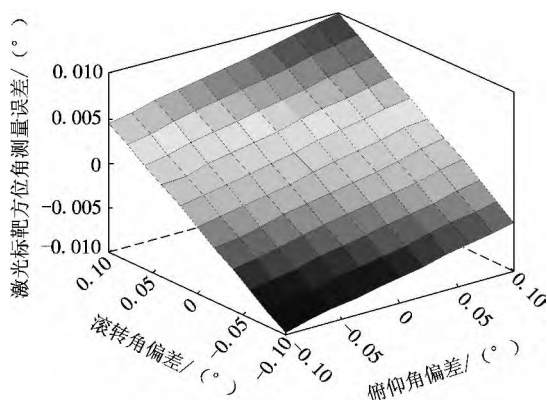


图 6 俯仰角和滚转角偏差的影响

Fig. 6 Influence of errors of pitching angle and rolling angle

根据上述设计的系统参数,考虑影响系统精度的各种因素,在激光标靶的俯仰角和滚转角均为 10° ,偏差为 0.005° ,映射后的激光方位角和俯仰角偏差为 0.01° ,入射激光在 $(5^\circ, 5^\circ)$ 时,对激光标靶方位角测量精度进行 MATLAB 仿真,结果表明激光标靶位姿系统方位角测量精度可以达到 0.1 mrad 。

由上述分析可以看出:①俯仰角和滚转角误差取决于倾角仪,即为 0.005° ,方位角的偏差来源于各个误差源的总和,针对影响方位角测量的误差源可以通过相应的措施减小误差,提高系统精度;②这是仅从模型的角度加以讨论,实际系统的建立还需要考虑很多方面的因素,如相机的视场、噪声、标定参数误差及外界干扰等,系统的综合测试精度需要通过实验验证,从而进行整体评价。

3 实验验证

为了进一步验证模型的可行性和有效性,利用高精度的三轴转台进行激光标靶方位角的测量实验,实验装置如图 7 所示,其中三轴转台角位置测量精度为

$\pm 3''$ 。将激光标靶测量值与实际值比对,进而评价激光标靶方位角测量精度,实验结果如图 8 所示。结果表明,激光标靶方位角测量误差不超过 0.006° (0.11 mrad)。激光标靶俯仰角和滚转角误差等于倾角仪误差,即为 0.005° (0.087 mrad)。

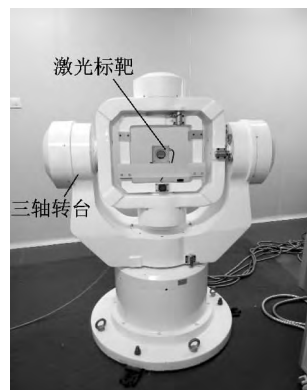


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental apparatus

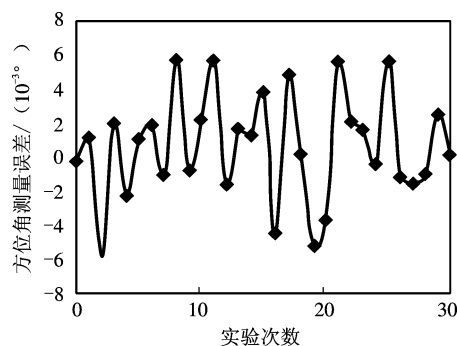


图 8 方位角测量误差

Fig. 8 Measuring error of azimuth

3 结 语

针对一种新型的由激光标靶与全站仪构成的激光标靶位姿测量系统,定义了坐标系,采用基于插值的非参数模型标定方法建立了入射光线姿态和相机靶面光斑的位置关系,通过基于参考棱镜的反向解算方法求解相机坐标系和激光标靶坐标系的位姿关系,构建了该测量系统的数学模型。分析了误差源,并模拟误差项对姿态角测量的影响。最后通过实验进一步验证了模型的有效性。建立的激光标靶位姿测量系统模型以及相关的误差分析对评价系统精度和进一步开展激光标靶位姿测量系统研究具有一定的实际指导意义。

参考文献:

- [1] 周召发, 黄先祥, 强宝民. 一种大型设备多自由度自动对接方法 [J]. 光电工程, 2005, 32(6): 55-58.
Zhou Zhaofa, Huang Xianxiang, Qiang Baomin. Multiple DOF auto-docking for large-scale equipment [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(6): 55-58 (in Chinese).
- [2] 叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展 [J]. 计量学报, 2008, 29(4A): 1-6.
Ye Shenghua, Zhu Jigui, Zhang Zili, et al. Status and development of large-scale coordinate measurement research [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(4A): 1-6 (in Chinese).
- [3] 林嘉睿. 大型复杂物体组合测量方法研究 [D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2012.
Lin Jiarui. Research on the Combined Measurement Method of Large Complex Objects [D]. Tianjin: School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, 2012 (in Chinese).
- [4] ZED Tunnel Guidance Ltd. Upgrades & Options for the Global Coordinate System [Z]. UK.
- [5] Neumayr R, Harker M, O'Leary P, et al. New approaches to machine vision based displacement analysis [C] // 2012 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Graz, Austria, 2012: 979-984.
- [6] 潘明华, 文香稳, 朱国力. 俯仰角组合测量系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 598-604.
Pan Minghua, Wen Xiangwen, Zhu Guoli. Design of combination measurement system for pitching angles [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 598-604 (in Chinese).
- [7] Hexagon Metrology. PCMM System Specifications Leica Absolute Tracker and Leica T-Products [EB/OL]. <http://www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=9125>.
- [8] 孟祥瑞. 新型激光标靶位姿测量系统关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2014.
Meng Xiangrui. Key Techniques on New Type Laser Target Pose Measurement System [D]. Tianjin: School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, 2014 (in Chinese).
- [9] 郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
Zhu Jigui, Yu Zhijing. *The Principle of Vision Metrology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2012 (in Chinese).
- [10] 曹建安, 张乐平, 吴昊, 等. 采用倾角传感器实现空间旋转角度测量的解析方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(10): 109-114.
Cao Jian'an, Zhang Leping, Wu Hao, et al. Analytical approach for measurement of spatial angle with inclination sensor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(10): 109-114 (in Chinese).
- [11] Wang Wei, Zhu Jigui, Lin Jiarui. Calibration of a stereoscopic system without traditional distortion models [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 093104.
- [12] 李宗春, 李广云, 范生宏, 等. 全站仪近距离测距精度检验方法的探讨 [J]. 测绘信息与工程, 2002, 27(4): 37-38.
Li Zongchun, Li Guangyun, Fan Shenghong, et al. Calibration method of short distance measuring precision of total station [J]. *Journal of Geomatics*, 2002, 27(4): 37-38 (in Chinese).
- [13] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Fei Yetai. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004 (in Chinese).

(责任编辑: 孙媛媛)