

文章编号: 1001-3806(2016)03-0436-05

# 激光跟踪仪高精度测量运动物体位姿的研究

冯祝雷, 李明\*, 丁海东

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海市智能制造及机器人重点实验室, 上海 200072)

**摘要:** 为了实现运动物体空间位姿高精度的实时测量, 基于激光跟踪仪测量的地理坐标系的方法, 采用两个激光跟踪仪分别瞄准运动物体首尾两处的标靶, 两台激光跟踪仪同步触发采集数据, 实时获取运动物体首尾两点的空间坐标数据, 测量了运动物体在空间地理坐标系下的位置和姿态信息; 利用自主研发的软件计算了运动物体的空间位姿, 并进行了理论分析和实验验证。结果表明, 测量系统的稳定性与精度较好, 所提出的测量方法能够满足高精度的空间位姿测量要求。

**关键词:** 测量与计量; 位姿测量; 激光跟踪仪; 运动物体

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.029

## High precision measurement of position and posture of kinetic objects with laser trackers

FENG Zhulei, LI Ming, DING Haidong

(Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In order to realize real-time position and posture measurement of kinetic objects with high precision, based on measurement principle of geographic coordinates with laser trackers, the fore and aft parts of a kinetic object were aimed at with two laser trackers respectively. Both the laser trackers were triggered to collect data synchronously, and real-time spatial coordinates of the fore and aft parts of the kinetic object were obtained. The position and posture of the kinetic object in spatial geographic coordinate were measured. The spatial position and posture were calculated with a software developed by ourselves. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that the stability and precision of the measurement system are pretty well and the proposed method can satisfy the high precision requirements for measurement of spatial position and posture.

**Key words:** measurement and metrology; position and posture measurement; laser tracker; kinetic object

## 引言

在工业生产领域, 特别是航空航天、军事、船舶等方面, 如何获取物体 3-D 空间运动状态信息已变得越来越重要<sup>[1]</sup>。空间物体的运动状态不仅包括物体在静止状态下的位置和姿态, 同时也包括物体在空间运动状态下的位置和姿态<sup>[2-3]</sup>。对于动态物体空间位姿的获取, 国内外学者做了大量研究, 也取得了很大的成果。NELE 等人<sup>[4]</sup>提出采用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)获取物体位姿, 但是对于图形的处理算法较难解决; LEE 等人<sup>[5-7]</sup>提出了采用全球定位系统(global positioning system, GPS)的方法, 但 GPS 的测

量存在着较多影响测量精度的因素。目前, 对于物体位置信息的采集已经能达到工业生产的需求, 但对物体姿态的获取方法仍处于研究阶段, 尤其缺乏运动物体位置、姿态高精度测量集成方面的研究。本文中在对国内外运动物体空间位姿研究现状的基础上, 提出了用激光跟踪仪高精度测量运动物体位姿的方法。

## 1 测量系统

本文中的研究对象主要由某榴弹炮底座及炮管组成(其中炮管长 10m), 榴弹炮底座本身绕自身旋转轴旋转及俯仰, 炮管在底座上除随底座旋转之外, 还绕自身中心旋转及俯仰运动。如图 1 所示, 为底座及炮管的运动示意图, AB 为底座的运动路线, CF 为炮管顶端的运动路线。

最终要测量的目标为炮管在地理坐标系下的高低角  $\alpha$  及方位角  $\beta$ <sup>[8-9]</sup>, 高低角指被测炮管与水平面之间

作者简介: 冯祝雷(1991-), 男, 硕士研究生, 现主要从事尺寸工程、数字测量的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: robotlib@shu.edu.cn

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-03-13

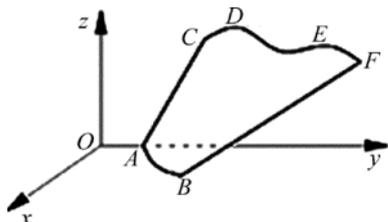


Fig. 1 Motion of the base and the barrel

的夹角,方位角指被测炮管指向与正北向之间的夹角,如图 2 所示。

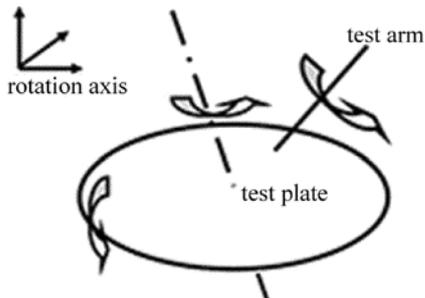


Fig. 2 Abstraction sketch of barrel motion

激光跟踪仪广泛运用于测量领域。激光跟踪仪测量范围大、测量精度高、系统稳定性高。激光跟踪仪单点的采集精度可以达到 0.01mm,但是其测量空间姿态的精度仅为 0.01mm 量级<sup>[10]</sup>。为了能高精度地获取炮管在空间地理坐标系下的具体位姿情况,本文中拟定如下的测量方案:(1)采用两台激光跟踪仪分别测量炮管的首末两端,得到其首末两端的单点信息;(2)通过相应的算法计算得到炮管在空间的位姿情况。测量方案如图 3 所示。

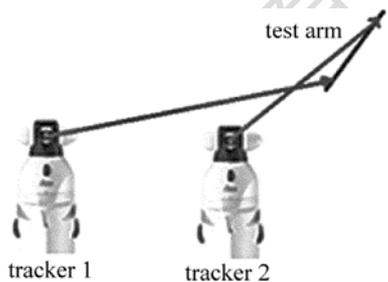


Fig. 3 Sketch of measurement system

本测量方案的特点是:在激光跟踪仪量程内,其单点测量精度高,且性能稳定,激光跟踪仪可自动补偿温度、湿度等环境影响因素,可简化系统结构和调试过程;采用两台跟踪仪测量可保证系统的精度满足要求,目前国内没有此先例,这也是本方案创新点所在。

## 2 位姿测量

### 2.1 建立地理坐标系

地理坐标系也称为真实世界的坐标系,是用于确定物体在地球上位置的坐标系。最常用的地理坐标系

是经纬度坐标系,武器系统在某一瞬时在某一个地理位置上,各国的地理坐标系均如下建立:以当地子午线切线方向(即地理北向)作为  $x$  轴,当地等纬线切线方向(即地理东西)作为  $y$  轴,当地天顶方向即为  $z$  轴。

因为激光跟踪仪是一个测量几何量的仪器,不能直接构建地理坐标系,因此需要借助于经纬仪。作者团队开发了用于激光跟踪仪测量的地理坐标系建立功能模块,建立坐标系的过程(该过程为自主开发功能模块操作说明,不是实际的计算过程)如下:(1)在空间布置 5 个靶标,作为地理坐标系与机器坐标系的公共点。调节跟踪仪自带的水平仪,使水平仪在跟踪仪的各个方向上基本水平;(2)将经纬仪调水平,利用天体关系(北极星永远指北),将北向引进经纬仪中,将经纬仪两轴读数置零。用经纬仪测量过程(1)中公共点的水平角  $H$  和垂直角  $V$ ,将这组数据输入自主开发的软件 T\_mac 中;(3)执行跟踪仪水平仪的自行补偿命令,计算出跟踪仪本身在水平方向上的两个参量,找出系统的一个方向——天( $z$  轴);(4)在仪器坐标系下测量过程(1)中布置的 5 个点,测量完之后与过程(2)中数据一起计算得出水平方向上的一个转角找到一个方向——北( $x$  轴);(5)将原点移动到原经纬仪的坐标原点处,将过程(3)和过程(4)的数据一起将测量数据转换到地理坐标系下。

### 2.2 角度计算

激光跟踪仪对空间目标的坐标测量是通过测量出水平角、垂直角和斜距,然后通过球坐标或极坐标测量原理就可以得到空间点的 3 维坐标  $x, y, z$  值<sup>[11-13]</sup>。其测量坐标体系如图 4 所示。

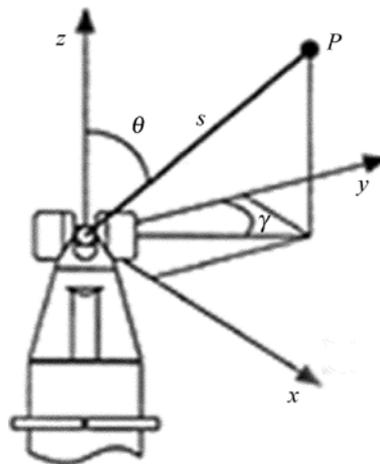


Fig. 4 Target location by polar coordinates

在机器坐标系中,设跟踪器的旋转中心为  $O$  点,被测靶镜的中心为  $P$  点。用两个角度编码器分别测量出  $P$  点的垂直方位角  $\theta$  以及水平方位角  $\gamma$ ,并且用激光干涉仪测量  $O$  点到  $P$  点的距离  $s$ ,则  $P$  点坐标( $x$ ,

$y, z$ ) 很容易由  $\theta, \gamma$  和  $s$  计算得出。公式为:

$$\begin{cases} x = s \times \sin\theta \times \sin\gamma \\ y = s \times \sin\theta \times \cos\gamma \\ z = s \times \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

通过上节中所述空间坐标变换, 可将  $P$  点的坐标转换到地理坐标系中。

本文中的测量对象为某自榴弹炮炮管在地理坐标系下的方位角与高低角。依据前述的测量方案, 在榴弹炮炮管的首尾两端分别固定两个跟踪仪使用的猫眼, 通过同步触发器控制两台激光跟踪仪同步采集两个猫眼的  $xyz$  数据, 将此时得到的跟踪仪机器坐标系下的数据转换为地理坐标系下的数据, 即可计算此时炮管的高低角  $\alpha$  与方位角  $\beta$ 。抽象原理图如图 5 所示。

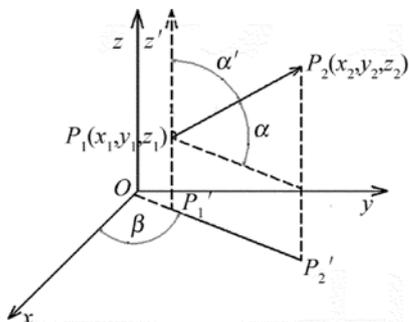


Fig. 5 Azimuth and elevation angles

图中, 点  $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$  分别是首尾两端猫眼的位置坐标,  $P_1'(x_1, y_1), P_2'(x_2, y_2)$  分别为  $P_1$  和  $P_2$  在  $O-x-y$  平面上的投影。高低角  $\alpha$  为  $\overrightarrow{P_1P_2}$  与水平面的夹角, 方位角  $\beta$  为  $\overrightarrow{P_1P_2}$  与  $x$  轴(定义为北向)的夹角。 $\overrightarrow{P_1P_2}$  的方向向量为  $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ ,  $z$  轴的方向向量  $l$  为  $(0, 0, 1)$ , 两者之间的夹角  $\alpha$  为:

$$\begin{aligned} \cos\alpha' &= \overrightarrow{P_1P_2} \cdot l / (|\overrightarrow{P_1P_2}| |l|) = (z_2 - z_1) \times \\ &\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2) \\ \alpha &= 90^\circ - \alpha' = 90^\circ - \arccos[(z_2 - z_1) \times \\ &\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}] \quad (3) \end{aligned}$$

式中,  $\overrightarrow{P_1P_2}$  的方向向量为  $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, 0)$ ,  $x$  轴的方向向量  $m$  为  $(1, 0, 0)$ , 两者之间的夹角  $\beta$  大小为:

$$\cos\beta = \overrightarrow{P_1P_2} \cdot m / (|\overrightarrow{P_1P_2}| |m|) = (x_2 - x_1) / \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4)$$

$$\beta = \arccos[(x_2 - x_1) / \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}] \quad (5)$$

### 2.3 标定初始角度

上述算法计算出来的结果是依据实际测量得到的首末两端的点位信息。由于该两点连线所得向量并不是与炮管中心轴线完全平行, 虽然有前述的夹具微调机构进行一定的调节, 两者之间还是不可避免地会存在误差, 由此得到的向量与地理坐标系的夹角也不是准确的。为提高系统的精度, 需要在测量前对炮管上的两个猫眼位置进行初始标定, 以确定实际测量数据与理论情况之间的差异, 如图 6 所示。图中,  $P_1, P_2$  分别表示炮管实际方位点,  $P_3, P_4$  分别表示用猫眼测得的炮管方位,  $P_1', P_2', P_3', P_4'$  分别是其在  $O-x-y$  平面上的投影。根据(2)式和(3)式, 可以分别计算出  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ; 同样, 根据(4)式和(5)式可以分别计算出  $\beta_1$  和  $\beta_2$ 。高低角上的安装误差  $\alpha_0 = \alpha_1 - \alpha_2$ ; 方位角上的初始安装误差  $\beta_0 = \beta_1 - \beta_2$ 。最终测量计算后得到的炮管的高低角为  $\alpha + \alpha_0$ , 方位角为  $\beta + \beta_0$ 。

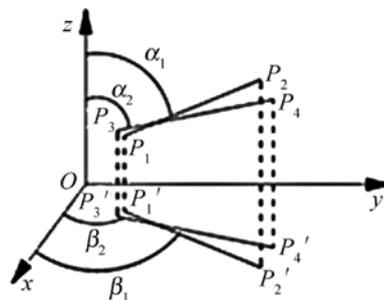


Fig. 6 Initial calibration

## 3 系统验证

### 3.1 系统重复性验证

为验证系统测量数据的重复性, 设计实验如下: 用激光跟踪仪对第 1 个位置的猫眼进行 3 次测量任务, 再转至第 2 个位置进行 3 次测量任务, 观察测量结果的重复性。实验数据如表 1 所示。

Table 1 Repeatability of experiment data

number	station 1			station 2			$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$
	x/mm	y/mm	z/mm	x/mm	y/mm	z/mm		
1	3693.79	7857.06	2795.14	4345.78	6342.770	3728.54	29.516	0.705
2	3693.80	7857.05	2795.17	4345.78	6342.790	3728.51	29.515	0.705
3	3693.76	7857.07	2795.15	4345.78	6342.780	3728.52	29.515	0.704
4	3403.97	8537.76	3900.98	3938.05	7300.600	5232.14	44.650	0.650
5	3403.95	8537.8	3900.95	3938.02	7300.620	5232.17	44.651	0.651
6	3403.98	8537.78	3900.98	3938.03	7300.570	5232.16	44.650	0.652

分析表1中的数据可知,整个系统的重复性误差可以控制在 $0.002^\circ$ 以内,是相对稳定的,对整个系统精度来说也是在可接受范围。

### 3.2 系统精度验证

根据用户提供的露天靶场,靶场内有两个相距10km的标杆,此标杆已经通过相关机构标定,标杆指向即为所在地经度切线方向(即正北向),其指向精度值得信赖。靶场内另有一标杆,其与指北向的两标杆夹角为固定角度( $30^\circ$ ),此角度亦经过标定,精度值得信赖。

为验证系统的实测精度,设计实验如下:(1)启动炮台,转动炮管,借助经纬仪的远距离测角功能,使炮管对准两个指北的标杆;(2)将猫眼夹具装到炮管上,并尽可能保证两个猫眼夹具连线方向与炮管中心轴平行,指向正北方向(借助经纬仪的帮助,通过猫眼夹具的微调机构,在 $xy$ 方向对夹具进行微调);(3)开启激光跟踪仪,按照上文所述方案对猫眼所在空间位置进行相应的标定,得到猫眼中心连线初始位置。

3.2.1 静态测量精度验证 启动榴弹炮控制系统,将炮管水平角转动 $30^\circ$ ,微调炮管对准与指北向夹角为 $30^\circ$ 方向上的标杆,应用本测量系统进行测量并计算角度信息。同样的方法,让榴弹炮以不同的路径方式到达 $30^\circ$ 角方向,并进行微调,再进行测量并计算角度信息。得到相关的测量数据如表2所示。

Table 2 Theoretical value and measured value of barrel motion path

barrel motion path	theoretical value	measured value
clockwise movement from elevation angle of $15^\circ$ to azimuth angle of $30^\circ$	$30^\circ$	$30.002^\circ$
	$30^\circ$	$30.002^\circ$
	$30^\circ$	$30.001^\circ$
anticlockwise movement from elevation angle of $15^\circ$ to azimuth angle of $30^\circ$	$30^\circ$	$29.999^\circ$
	$30^\circ$	$30.001^\circ$
	$30^\circ$	$30.003^\circ$
clockwise movement from elevation angle of $45^\circ$ to azimuth angle of $30^\circ$	$30^\circ$	$30.003^\circ$
	$30^\circ$	$30.002^\circ$
	$30^\circ$	$29.998^\circ$

经过分析可以看出,静态测量情况下,系统整体误差可以控制在 $0.005^\circ$ 以内。

3.2.2 动态测量精度验证 为验证系统的动态测量精度,分别设计实验验证在动态跟踪测量情况下,系统测量数据在方位角及高低角方向的运动曲线,以验证系统的测量精度。炮管调节到北向方位,启动榴弹炮控制系统和测量系统,炮管在水平方向角度不做改变,高低角方向上的角度变化曲线及其测量误差如图7所示。图7a表示高低角动态测量曲线,图7b表示高低角动态测量误差。炮管在竖直方向角度不做改变,

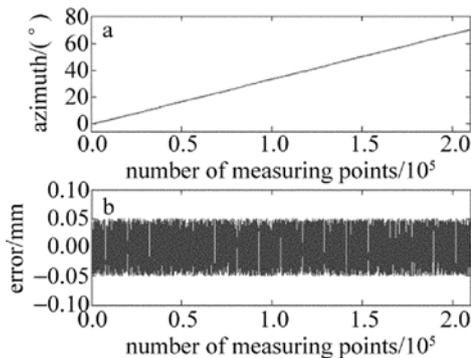


Fig. 7 Dynamic accuracy and deviation statistics of elevation angle

方位角 $\beta$ 方向上的角度变化曲线及其测量误差如图8所示。图8a表示方位角动态测量曲线,图8b表示方位角动态测量误差。

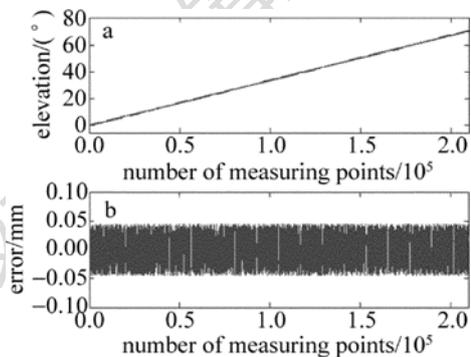


Fig. 8 Dynamic accuracy and deviation statistics of azimuth angle

由数据分析可得:系统动态测量与计算误差基本保持在 $\pm 0.05^\circ$ 范围之内。

## 4 结论

以Leica激光跟踪仪、经纬仪、水平仪等硬件为基础,针对具体测量目标,研究了物体空间位姿高精度实时测量的方法,同时对物体空间运动的状态趋势进行了初步分析,得到了相应的数据处理算法,最后对影响测量结果的因素进行了简单的分析与补偿。提出了一种用激光跟踪仪测量运动物体位姿的系统,并通过设计实验验证了系统的可靠性和精度。加深了对于运动物体高精度位置和姿态集成测量的研究,所得研究成果已经在某地有所应用。

### 参考文献

[1] LEE C, KIM G H, LEE S K. Design and construction of a single unit multi-function optical encoder for a six-degree-of-freedom motion error measurement in an ultraprecision linear stage[J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(10):1-8.

[2] LESSER K, MONTMINY D. On the development and implementation of a common spatial error analysis tool[R]. Nashville, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2010:1-16.

[3] HUANG W, LI M. Research on real-time measurement method for object spatial location[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011, 35(8):20-24 (in Chinese).

- [4] NELE L, SARNO E, KESHARI A. An image acquisition system for real-time seam tracking[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(9/12):2099-2110.
- [5] LEE J H, PARK S J, OH S W, *et al.* A study on the work efficiency improvement of tower crane operation using GPS and machine vision [J]. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2002, 18(11): 133-140.
- [6] WEI Q, LUO Z, ZHU L. Realization and error analysis of the real-time aerial attitude measuring base on GPS[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(4):20-22 (in Chinese).
- [7] BAO C, GUO M, ZHOU B. Miniaturization design of MIMU/GPS integrated navigation system[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2014, 33(1):116-119.
- [8] BAUR K, MAYER M, BINZER T. Beamforming concepts for angular measurements in azimuth and elevation with 77GHz lens based radar sensors [DB/OL]. (2011-06-10) [2015-01-20]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5972592>.
- [9] GAMPER H. Head-related transfer function interpolation in azimuth, elevation, and distance [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 134(6):547-553.
- [10] HARTIG F, LIN H, KNIEL K, *et al.* Laser tracker performance quantification for the measurement of involute profile and helix measurements [J]. *Measurement*, 2013, 46(8): 2837-2844.
- [11] CHEN H P, ZHAO B. Space coordinate measurement based on theodolites and rangefinders [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 77-81 (in Chinese).
- [12] LI Sh G, LIU Ch J, LIU G, *et al.* Research of laser detector for railway locomotive gauge and its field calibration technology [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 32-35 (in Chinese).
- [13] FAN Y Y, ZHAO B, MA G. Coordinate measurement system of hidden parts based on optical target and rangefinder [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 723-728 (in Chinese).