

三维激光雷达在火炮偏离角测量中的应用

李丹妮 呼丹* 王劲松 张继明 安志勇

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 针对目前国家军用标准(GJB)方法对火炮炮膛轴线偏离射面的偏离角度测量方法中存在的精度低、效率低、工作人员多、结构分散等问题,提出了一种新型火炮偏离角度的测量方法。方法基于三维(3D)激光雷达空间点三维坐标测量原理,采用火炮身管粘贴标准靶球,通过测量标准靶球空间点的球坐标解算出调炮前后两条空间直线方程,并经空间向量投影,转换为在投影面上进行直线方程的求解,进而求得火炮偏离角,并用微分法进行测量精度分析及计算。分析了该方法的原理、测量过程并与现行 GJB 方法进行比较,实验数据表明使用该方法对火炮偏离角进行测量的效率和精度都有明显提高。

关键词 测量;火炮偏离角;三维激光雷达;空间向量投影

中图分类号 TJ306+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1014004

Application of Three-Dimensional Laser Radar to the Measurement of Deviation Angle of Guns

Li Danni Hu Dan Wang Jinsong Zhang Jiming An Zhiyong

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Aiming at such problems as low accuracy, low efficiency, more operators and disperse structure existing in the measurement of deviation angle of guns using the method in the national military standard, a novel method for the measurement of gun deviation angles is proposed. Based on the principle of measuring three-dimensional (3D) coordinates of a spatial point by the 3D laser radar, standard target balls adhering to the gun barrel are used to solve two spatial linear equations before and after gun adjusting through measuring the spherical coordinates of spatial points of standard target balls. After the projection of space vectors, the equations are transformed to solution of linear equations on the projection plane, thus the gun deviation angle is calculated, and the measurement accuracy is calculated and analyzed by differentiation. The principle and measurement process of the method is compared to that in the national military standard, and the experimental data show that the efficiency and accuracy is improved notably when the proposed method is adopted to measure the gun deviation angle.

Key words measurement; deviation angle; 3D laser radar; space vector projection

OCIS codes 150.5670; 280.3400; 280.3640

1 引言

火炮作为当前主要压制性常规兵器之一,其精度和威力是最主要的参考指标。评价其精度的参数众多,火炮偏离角即为其中之一^[1]。火炮炮膛轴线偏离射面的角度简称为火炮偏离角,反映的是在锁定方向机调炮时,火炮身管轴线在水平面投影线的

指向偏离身管水平状态时的角度。火炮偏离角是火炮定型实验中评定火炮性能的重要依据,也是火炮射表编拟实验中重要的修正参数^[2]。现行国家军用标准(GJB)中对火炮偏离角的测量需要使用经纬仪、象限仪、百分表、钢卷尺和火炮总装参数光电测试系统完成火炮身管轴线投影偏离零位的测量^[3],

收稿日期: 2014-04-13; **收到修改稿日期**: 2014-05-20

基金项目: 吉林省科技支撑计划重大专项(20106010)

作者简介: 李丹妮(1982—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事激光非接触检测技术方面的研究。

E-mail: ldn@cust.edu.cn

导师简介: 安志勇(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事光电测控技术与仪器等方面的研究。

E-mail: an_zhiyong@126.com

* **通信联系人**。E-mail: 353246578@qq.com

测量方法劳动强度高,操作费时,计算测量烦琐。采用三维(3D)激光雷达测量标定靶球的空间三维坐标从而计算出火炮偏离角的方法能够提高测量精度和效率,降低工作强度,是一种具有发展前景的数字化测量方法^[4]。

2 三维激光雷达测量原理

三维激光雷达是以发射激光束探测目标的空间三维球坐标的雷达系统^[5]。采用相干测角、调频测距原理,向目标发射探测信号,然后将接收到的从目标反射回来的回波信号与发射信号进行比较,作出适当处理后可获得目标的球坐标^[6-7]。

2.1 空间点三坐标测量

空间点三坐标激光雷达是基于球坐标进行测量,即通过激光调频测距获知空间点 P 的距离 p ^[8],通过扫描头的方位俯仰两个轴上的圆光栅获知空间点方位和俯仰角度 α 和 β ,如图 1 所示,得到被测空间点 P 的三维坐标计算公式为

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

式中 p 为空间距离,采用调频相干测距方法测量^[9-10]。 θ 为 P 与 XY 平面的夹角, α 为 P 在 XY 平面的投影与 X 方向的夹角。三维激光雷达测得点的球坐标 (p, α, θ) ,通过(1)式坐标变换得到了在以激光雷达位置为原点的笛卡尔坐标系中的三维坐标 (x, y, z) 。

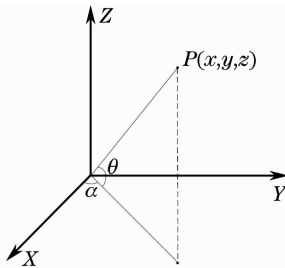


图 1 坐标测量原理图

Fig. 1 Schematic of coordinate measurement

2.2 扫描测量

激光扫描测量是通过调整激光雷达扫描头的方位、俯仰运动来实现的。激光雷达测量时,将激光扫描测量系统安装到支撑底座上,对待测物进行俯仰和方位的扫描,并获得其点云数据。通过软件对点云的采集、预处理、插补、缝合、重构等步骤得到试件的实体模型,最后针对得到的实体模型进行解析,从而得到需要的测量参数;也可以直接针对处理后的点云数据进行操作,求得被测参量。激光扫描测量

原理如图 2 所示。

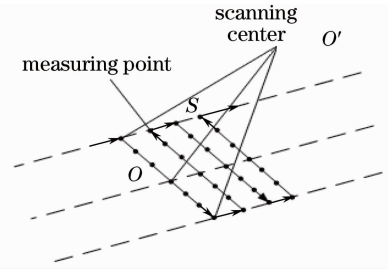


图 2 激光扫描测量原理示意图

Fig. 2 Schematic of laser scanning measurement

3 三维激光雷达火炮偏离角测量

三维激光雷达火炮偏离角测量设备由三维激光雷达系统、3 个放置在水平台上的靶球、2 个贴在身管外侧的靶球、信号采集与处理软件等组成。钢球 1、2、3 放置在火炮附近的水平台,用来确定火炮所在的投影平面。当火炮身管调至水平时,由 2 个贴在火炮身管外侧的靶球的球心连线表征火炮身管轴线的初始位置。利用激光雷达测量火炮偏离角的原理如图 3 所示。

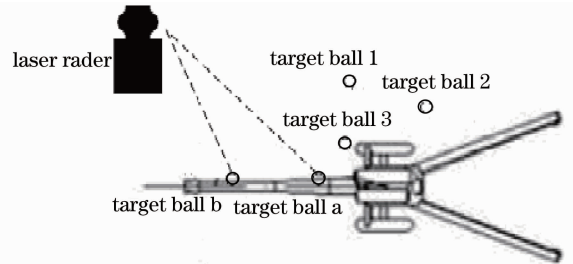


图 3 偏离角测量示意图

Fig. 3 Schematic of deviation angle measurement

设钢球 a 的坐标为 (x_1, y_1, z_1) ,钢球 b 的坐标为 (x_2, y_2, z_2) ,则由两钢球确定的空间直线方程为

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (2)$$

ab 确定的空间向量为 $\mathbf{n} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ 。由此可得偏离角测量解析图如图 4 所示,火炮

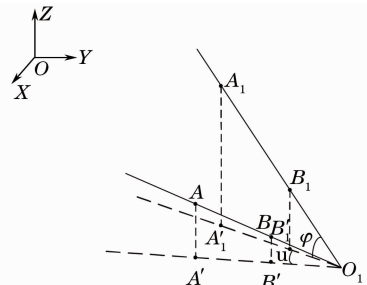


图 4 投影解析图

Fig. 4 Projection analysis diagram

身管水平时两钢球中心连线决定的空间直线为 AB ，它在水平平台平面上的投影为 $A'B'$ ， O_1 为火炮耳轴心。当火炮身管沿高低方向调整到 φ 角时，两钢球中心连线决定的空间直线为 A_1B_1 ，其在水平平台平面上的投影为 $A'_1B'_1$ ， $A'B'$ 与 $A'_1B'_1$ 之间的差角 u 即为偏离角。设空间点坐标分别为 $A_1(x_1, y_1), B_1(x_2, y_2), A(x_3, y_3), B(x_4, y_4)$ ，空间点坐标分别投影至

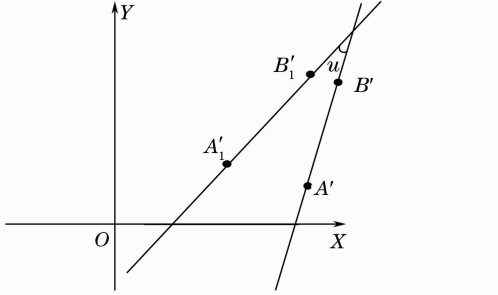


图 5 偏离角解算示意图

Fig. 5 Schematic of deviation angle settlement

投影平面(可看作水平面)，投影后 Z 值均相等，可转换为平面直角坐标系坐标进行计算，偏离角解算如图 5 所示。

两个钢球初始位置投影后的坐标为 $A'_1(x'_1, y'_1), B'_1(x'_2, y'_2), A'(x'_3, y'_3), B'(x'_4, y'_4)$ ，则直线 $A'_1B'_1$ 的方程为

$$y - y'_1 = \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1}(x - x'_1),$$

直线 $A'B'$ 的方程为

$$y - y'_3 = \frac{y'_4 - y'_3}{x'_4 - x'_3}(x - x'_3)$$

直线 $A'_1B'_1$ 与 $A'B'$ 的夹角为 u ，即为火炮偏离角，

$$u = \left| \arctan \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1} - \arctan \frac{y'_4 - y'_3}{x'_4 - x'_3} \right|. \quad (3)$$

4 精度分析

对(3)式求全微分可得

$$\begin{aligned} du &= \frac{\partial u}{\partial x'_1} dx'_1 + \frac{\partial u}{\partial x'_2} dx'_2 + \frac{\partial u}{\partial y'_1} dy'_1 + \frac{\partial u}{\partial y'_2} dy'_2 + \frac{\partial u}{\partial x'_3} dx'_3 + \frac{\partial u}{\partial x'_4} dx'_4 + \frac{\partial u}{\partial y'_3} dy'_3 + \frac{\partial u}{\partial y'_4} dy'_4, \\ \frac{\partial u}{\partial x'_1} &= -\frac{\partial u}{\partial x'_2}, \frac{\partial u}{\partial y'_1} = -\frac{\partial u}{\partial y'_2}, \frac{\partial u}{\partial x'_3} = -\frac{\partial u}{\partial x'_4}, \frac{\partial u}{\partial y'_3} = -\frac{\partial u}{\partial y'_4}, \end{aligned}$$

近似取两点的微元相等，由于系数绝对值相等，取其中一个即可。

$$\begin{aligned} du &= \left[\frac{y'_2 - y'_1}{(y'_2 - y'_1)^2 + (x'_2 - x'_1)^2} \right] dx + \left[\frac{x'_2 - x'_1}{(y'_2 - y'_1)^2 + (x'_2 - x'_1)^2} \right] dy - \\ &\quad \left[\frac{y'_4 - y'_3}{(y'_4 - y'_3)^2 + (x'_4 - x'_3)^2} \right] dx - \left[\frac{x'_4 - x'_3}{(y'_4 - y'_3)^2 + (x'_4 - x'_3)^2} \right] dy, \end{aligned}$$

以有限增量代替无穷小量，则

$$\begin{aligned} \Delta u &= \left[\frac{y'_2 - y'_1}{(y'_2 - y'_1)^2 + (x'_2 - x'_1)^2} \right] \Delta x + \left[\frac{x'_2 - x'_1}{(y'_2 - y'_1)^2 + (x'_2 - x'_1)^2} \right] \Delta y - \\ &\quad \left[\frac{y'_4 - y'_3}{(y'_4 - y'_3)^2 + (x'_4 - x'_3)^2} \right] \Delta x - \left[\frac{x'_4 - x'_3}{(y'_4 - y'_3)^2 + (x'_4 - x'_3)^2} \right] \Delta y. \end{aligned} \quad (4)$$

取钢球间距为 1 m 进行计算，所取坐标为

$$x_1 = 3.5, y_1 = 2, x_2 = 4.9, y_2 = 3.4, x_3 = 5.5, y_3 = 1, x_4 = 6, y_4 = 2.8 \text{ (单位: m)}$$

由激光雷达的产品用户手册可知，当使用工具球测量时，其单点测量不确定度 2σ 如表 1 所示，这

里包含距离测量和角度测量不确定度以及单点三维不确定度。

表 1 激光雷达测量距离与测量精度

Table 1 Distance and accuracy of laser radar measurement

Measuring distance / m	Angle (α, θ) measurement uncertainty $\sigma / \mu\text{m/m}$	Distance (ρ) measurement uncertainty $2\sigma / \mu\text{m/m}$	3D uncertainty $2\sigma / \mu\text{m}$
1	6.8	12.5	16
2	13.6	15	24
5	34	22.5	53
10	68	35	102
15	102	47.5	152
20	136	60	201
24	163.2	70	241

测量点距离激光雷达在 10 m 以内,激光雷达单点三维不确定度可取为 $\sigma=51 \mu\text{m}$,此误差为瞄准误差, $\Delta x, \Delta y$ 值在区间内可视为均匀分布,取 $k=\sqrt{3}$,则

$$\sigma(x) = \frac{\Delta x}{k}, \quad (5)$$

(5)式转换为 $\Delta x = \Delta y = \sqrt{3}\sigma, \Delta u = 0.0000267 \text{ rad}$,换算成密位为 0.025 mil。

影响测量精度的因素主要有激光雷达的测距误差、测角误差和标定靶球的误差^[11]。激光测距信号处理的各个环节都会带来一定的误差,特别是光学电子电路中激光脉冲回波信号处理时引起的误差,主要包括扫描仪脉冲计时的系统误差和测距技术中不确定间隔的缺陷引起的误差,脉冲计时的系统误差造成循环、混淆现象与测距的凸角相类似,测距技术中不确定间隔更能造成数据突变。扫描角的影响包括水平扫描角度和竖直扫描角度测量的影响,扫描角度引起的误差是扫描镜的镜面平面角误差、扫描镜转动的微小震动、扫描电机的非均匀转动控制误差等因素的综合影响。25 级标准钢球的直径变动量为 $0.6 \mu\text{m}$,按均匀分布估算其所造成的不确定度为 $0.35 \mu\text{m}$ 。

5 对比实验及数据分析

5.1 现行 GJB 测量实施过程

现行 GJB 中对火炮偏离角的测量是通过经纬仪、象限仪、百分表、钢卷尺和火炮总装参数光电检测系统来完成的。先将火炮放置在平坦的场地上成战斗状态并调整火炮纵、横水平,将经纬仪架设在炮口正前方约 2~2.5 倍身管长的位置上,并调整水平。使用经纬仪瞄准火炮炮口端面上的十字线和药室内带有十字线的药筒,用百分表来确定火炮身管在铅垂面的位置,用象限仪来装定火炮射角调整经纬仪或火炮身管,使经纬仪十字线与炮身的两个十字线相重合,并读取水平角值^[12],图 6 为测量原理图。

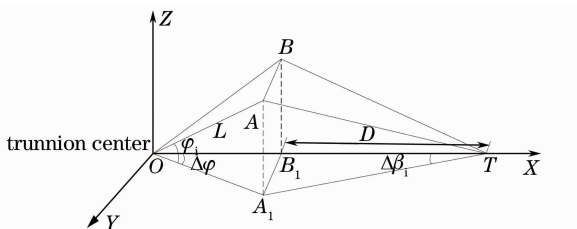


图 6 经纬仪对瞄观测法示意图

Fig. 6 Schematic of theodolite sight observation method

偏离角计算公式为

$$\Delta\varphi_i = \left(\frac{D+L}{L \cos \varphi_i} - 1 \right) \Delta\beta_i, \quad (6)$$

式中 $\Delta\varphi_i$ 为火炮高低角为 φ_i 时的偏离角 ($\angle B_1OA_1$); D 为仰角为 0° 时,炮口端面到经纬仪的距离 B_1T ; L 为火炮耳轴中心到炮口端面距离 OA ; $\Delta\beta_i$ 为经纬仪对瞄时的水平角(即经纬仪仰角为 α 时的方向角 β_i 与经纬仪水平时的方向角 β_0 之差 $\angle B_1TA_1$); φ_i 为火炮高低角 $\angle AOA_1$ 。

5.2 三维激光雷达测量实施过程

1) 布站。根据产品的几何尺寸、形状、空间姿态、测量环境、测试要求,合理科学地布置主机的位置,将激光雷达放置在火炮左上方 3~4 m 的位置。

2) 调整火炮身管初始位置成水平状态,借助炮口塞规(测平塞规)辅助进行。将水准仪放置在测平塞规处,调节火炮高低机使之水平,再将水平仪放置在水平台上,调节水平台使水平仪气泡居中,这样火炮身管即与水平台保持水平,将 3 个标定靶球分布在水平台上,此位置即为初始位置。

3) 具体参数测试。火炮调整为零位(身管轴线水平状态),将 2 个 0.1 inch (1 inch = 2.54 cm) 标准磁力工具球分别吸在身管外侧的炮口和炮尾处,距离尽量大,通过激光雷达扫描确定其轴线。测量炮身外侧标准磁力工具球的球心位置;调整火炮高低机至被测位,测量炮身外侧标准磁力工具球的球心位置。

4) 数据处理。数据拟合工具球球心,计算出初始位置与被测位置的身管轴线在水平面投影的方位角,计算火炮偏离角。

5.3 实验及数据分析

按前述方法进行相同高低角情况下的偏离角测量,测量 5 次,测量结果分别如表 2、表 3 所示。

表 2 GJB 偏离角测量记录表(单位: mil)

Table 2 Deviation angle measurement record by GJB method (Unit: mil)

Angle of site	15°	30°	45°	60°
Trials				
No. 1	0.61	1.08	2.09	2.64
No. 2	0.63	1.07	2.13	2.61
No. 3	0.57	1.14	2.08	2.57
No. 4	0.56	1.11	2.12	2.58
No. 5	0.64	1.10	2.07	2.59
Mean	0.61	1.10	2.09	2.59
σ	0.033	0.025	0.024	0.026

表3 三维激光雷达方法偏离角测量记录表(单位: mil)
Table 3 Deviation angle measurement record by 3D laser radar method (Unit: mil)

Angle of site Trials	15°	30°	45°	60°
No. 1	0.566	0.634	0.768	1.093
No. 2	0.569	0.627	0.774	1.090
No. 3	0.571	0.629	0.771	1.088
No. 4	0.573	0.631	0.770	1.087
No. 5	0.571	0.632	0.765	1.092
Mean	0.570	0.631	0.769	1.090
σ	0.0024	0.0025	0.0031	0.0025

对比两种方法的测量数据和方法,GJB方法测量偏离角的缺点是操作劳动强度大,计算测量比较麻烦。由于调整经纬仪的上下运动是靠伸缩三脚架的3个木腿,左右运动是靠移动整个三脚架,并同时调整经纬仪水平,所以使经纬仪望远镜十字线与炮口十字线、炮膛起始部十字线这三点成一线(称为“穿线”)很困难,仅“穿线”操作熟练者需要90 min左右,有的甚至整个上午,操作需4~5人。计算偏离角需要4个参量,其中 $\Delta\beta$ 还要进行正倒镜读数后的计算,计算复杂。利用三维激光雷达对火炮偏离角测量比现行GJB方法操作省时,劳动强度降低,工作人员减少2~3人,精度提高70%以上。

利用三维激光雷达测量过程中有时会出现某一数据偏大现象,考虑和周围环境震动有关,震动导致雷达信号的发射和接收受到干扰,从而导致测量数据失真。扬尘粒子也对测量结果有微小影响,但由于实验环境均为标准环境,此影响可忽略不计。

6 结 论

利用三维激光雷达可以使测试实现高精度、高效率、高可靠性,与传统的GJB方法相比缩短了测试时间,降低了测试劳动强度,人员减少2~3人,精度提高70%以上。利用三维激光雷达测量火炮偏离角在劳动强度、测试精度、测试效率方面都明显优于现行的GJB方法。

参 考 文 献

1 Meng Xiangfei, Wang Changming, He Boxia, *et al.*. Static

- multi-parameter measuring system for gun barrel[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(1): 117-132.
- 孟翔飞,王昌明,何博侠,等. 火炮身管静态多参数测量系统的研究[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(1): 117-132.
- 2 Kim L Boyer, Tolga Ozguner. Robust online detection of pipeline corrosion from range data[J]. Machine Vision and Applications, 2001, 12(6): 291-304.
- 3 The General Armaments Department. GJB 2977A-2006 Artillery static test method[S]. Beijing: China Standard Press, 2006. 39-41.
- 总装备部. GJB 2977A-2006 火炮静态检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. 39-41.
- 4 Wu Fan, Zhang Yong, He Jiang, *et al.*. Improved range-gating 3D imaging laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2388-2392.
- 吴凡,张勇,何姜,等. 改进的距离选通3D成像激光雷达系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2388-2392.
- 5 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, *et al.*. Research of ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. China J Laser, 2011, 38(5): 0514001.
- 姜海娇,来建成,王春勇,等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514001.
- 6 Liu Zhengjun, Li Qi, Wang Qi. Target recognition of coherent ladar range image using feature selection[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(8): 0814003.
- 刘正君,李琦,王骥. 基于特征选择算法的相干激光雷达目标识别[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814003.
- 7 Liu Zhengjun, Li Qi, Wang Qi. Object recognition of ladar range image using combined moment invariants[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(6): 0609002.
- 刘正君,李琦,王骥. 基于组合矩的激光雷达距离像目标识别[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0609002.
- 8 J-Angelo Beraldin, F Blais, P Boulanger, *et al.*. Real world modeling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 55(4): 230-250.
- 9 Sun Dongsong, Liu Shigang, Liu Zhaoyan. Chirp coherent ladar signal processing[J]. Infrared and Laser Engineering, 1997, 26(1): 21-24.
- 孙东松,刘世刚,刘兆岩. 线性调频相干激光雷达的信号处理[J]. 红外与激光工程, 1997, 26(1): 21-24.
- 10 Ziqin Li, Qi Li, Zhaoshuo Tian, *et al.*. Processing for laser radar range images[J]. Chinese Optics Letter, 2004, 2(4): 210-212.
- 11 Luo Hanjun, Yuan Xiuhua. Accuracy of photon pulsed heterodyne detection system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208004.
- 罗韩君,元秀华. 光子脉冲外差探测系统的测距精度[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208004.
- 12 Yang Shuqing, Zhang Huimin, Bao Junyan. The analyses of measuring gun by using teodolite and eiming sight at muzzle[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2002, 16(3): 184-188.
- 杨树青,张惠民,包俊彦. 火炮测量中使用经纬仪与炮口瞄准仪的分析[J]. 测试技术学报, 2002, 16(3): 184-188.

栏目编辑:胡冰