

吴淼,贾文浩,华伟等. 基于空间交汇测量技术的悬臂式掘进机位姿自主测量方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2596–2602. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.7065

Wu Miao, Jia Wenhao, Hua Wei et al. Autonomous measurement of position and attitude of boom-type roadheader based on space intersection measurement[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2596–2602. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.7065

基于空间交汇测量技术的悬臂式掘进机位姿自主测量方法

吴淼,贾文浩,华伟,符世琛,陶云飞,宗凯,张敏骏

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要: 根据深部危险煤层无人化开采的需求,要实现无人环境下对悬臂式掘进机位姿的高精度测量。提出一种基于空间交汇测量技术的悬臂式掘进机自主位姿测量方法,由悬臂式掘进机搭载激光发射器并发射旋转激光平面,在其后方安装位置固定的激光接收器并通过激光平面获取激光发射器相对于其自身的方位,从而得到悬臂式掘进机相对于由激光接收器确定的巷道坐标系的位姿状态。构建悬臂式掘进机位姿测量的数学模型,运用仿真软件对该模型进行仿真并分析位姿测量精度。仿真表明:在激光发射器与激光接收器相距 25 m 时悬臂式掘进机定位点的最大测量误差在 X 轴,测量误差为 0.082 3 m;姿态角的最大测量误差为横滚角,测量误差为 2.018 4°。基本满足目前煤矿综掘工作面对于悬臂式掘进机位姿测量精度的要求。

关键词: 悬臂式掘进机;位姿;空间交汇测量技术;自主测量;激光平面

中图分类号:TD421.5 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2015)11-2596-07

Autonomous measurement of position and attitude of boom-type roadheader based on space intersection measurement

WU Miao, JIA Wen-hao, HUA Wei, FU Shi-chen, TAO Yun-fei, ZONG Kai, ZHANG Min-jun

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: According to the requirements of unmanned mining in deep dangerous coal seam, a high accurate measurement on the attitude and position of boom-type roadheader in unmanned environment is of significance. Now an autonomous measuring method of the position and attitude of boom-type roadheader was proposed based on space intersection measurement. A laser transmitter on the body of boom-type roadheader transmits the revolving laser planes, laser receivers installed behind the boom-type roadheader get the position of laser transmitters through laser planes, then obtain the position and attitude of boom-type roadheader in the tunnel coordinate frame constructed by laser receivers. A mathematical model on the measurement of position and attitude of boom-type roadheader was built to do the mathematical simulation through simulation software and analyze the measuring accuracy of the position and attitude of boom-type roadheader. Simulation results indicate that in the distance of 25 m from laser transmitter to laser receiver, the maximum measurement error of the location point of boom-type roadheader is the value of X-axis, the measurement error is 0.082 3 m; the maximum measurement error of the attitude angles of boom-type roadheader is the value of roll angle, the measurement error is 2.018 4°, which basically satisfies the requirements of measurement accuracy of the attitude

收稿日期: 2015-08-25 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046302); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2008AA062201)

作者简介: 吴淼(1958—),男,山东泰安人,教授,博士生导师。通讯作者: 贾文浩(1991—),男,山东泰安人,硕士研究生。Tel: 010-62339113, E-mail: iawenhao2012@163.com

and position of roadheader in the current production of coal mines.

Key words: boom-type roadheader; position and attitude; space intersection measurement; autonomous measurement; laser plane

目前煤炭开采深度在不断增加,部分煤矿的开采深度已突破 1 000 m,深部煤层开采危险系数大,故综掘工作面无人化技术的研究极为重要。悬臂式掘进机位姿自主测量技术是综掘工作面无人化技术的核心,具有重大研究意义^[1]。吴森研究团队进行了利用激光指向器引导悬臂式掘进机定向掘进的研究^[2],毛君研究团队提出基于多传感器融合的悬臂式掘进机位姿检测方法^[3]。以上方法具有一定的自主性,但利用激光指向器只能得到若干参数判断悬臂式掘进机是否沿设计方向掘进,无法在空间坐标系下表示悬臂式掘进机位姿状态。基于多传感器融合的悬臂式掘进机位姿检测方法的系统构成较为复杂,测量数据可靠性低^[4]。

笔者提出一种基于空间交汇测量技术的悬臂式掘进机位姿自主测量方法^[5]。由悬臂式掘进机搭载激光发射器,在已成型煤巷顶部安装激光接收器。激光发射器在不同位置自主发射旋转激光平面,交汇到激光接收器后得到该点在机身坐标系下的三维坐标,将若干点的三维坐标代入位姿解算模型,得到悬臂式掘进机在固定坐标系(由激光接收器构建)下的位姿状态。与现有方法相比,该方法具有自主性高、抗障碍物遮挡能力强的优点,是目前实现悬臂式掘进机位姿自主测量,乃至自主导航的最优方式^[6]。

1 测量方案

测量系统组成如图 1 所示,包括激光发射器、激光接收器、二维运动平台及高精计时模块。激光发射器在悬臂式掘进机机身的不同位置自主旋转发射激光平面,并记录激光平面旋转的角度数据,当同一激光接收器接收到来自不同位置的激光平面(≥ 3)后,对角度数据进行解算即可得到激光接收器三维坐标^[7]。角度测量技术是现代精密测量技术的重要领域,高精度测角仪器主要有光电编码器、光栅编码器和基于匀速旋转电机的测角系统,其中光电编码器、光栅编码器的测角精度已达到角秒级^[8-9],基于锁相环控制的匀速旋转电机实际旋转误差也在 0.002% 以内^[10],可满足悬臂式掘进机位姿测量中对测角精度的要求。笔者选择基于匀速旋转电机的测角系统,即保持旋转激光平面发射器转速恒定,通过与激光接收器相连的高精密计时模块计算激光平面的旋转时间来计算激光平面转过角度^[11]。

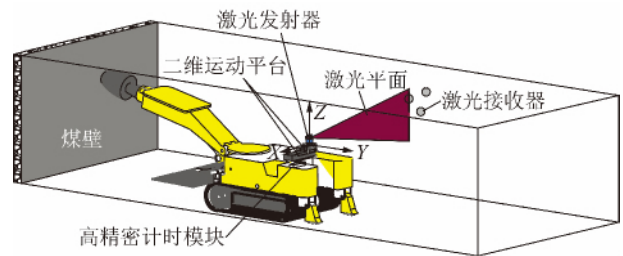


图 1 测量系统组成示意

Fig. 1 Schematic configuration of measuring system

图 2 为激光接收器三维坐标测量原理。 A 点代表激光接收器; OD 、 γ 表示激光发射器在二维运动平台作用下移动距离和摆动角度; BAE 、 CAE 、 DAF 为交汇到 A 点的 3 束激光平面; α 、 β 、 θ 为激光平面旋转角度。

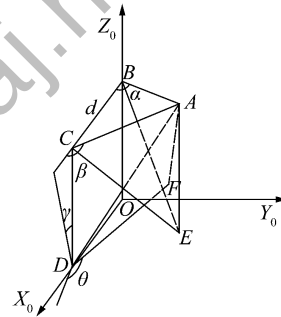


图 2 激光接收器三维坐标测量原理

Fig. 2 Spatial point measurement model

A 点的三维坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta} d \\ y = \frac{\tan \alpha \sin \beta \cos \alpha}{\cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta} d \\ z = \frac{\cot \gamma \sin \alpha \sin \gamma \cos \beta - \tan \alpha \cot \theta \sin \beta \cos \alpha}{\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma} d \end{cases}$$

将 3 个激光接收器的三维坐标代入悬臂式掘进机位姿解算模型,即可得到悬臂式掘进机位姿状态。

2 位姿解算模型

2.1 坐标系定义

在悬臂式掘进机机身上和巷道中构建如图 3 所示的 2 种坐标系:①巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$,用于表示悬臂式掘进机的位姿状态;②悬臂式掘进机坐标系^[12],包括测量坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 、机身坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 、截割坐标系 $O_3-X_3Y_3Z_3$,分别用于获取机身-

巷道坐标系变换关系,表示悬臂式掘进机上的固定点,计算截割头轨迹^[13]。

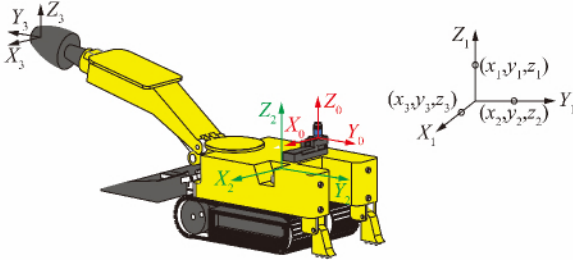


图3 坐标系构建示意

Fig. 3 Schematic configuration of coordinate systems

建立测量-巷道坐标系、机身-测量坐标系齐次变换矩阵,使悬臂式掘进机上的固定点的坐标能在巷道坐标系中表示,对其计算得到悬臂式掘进机的位姿参数。测量-巷道坐标系的齐次变换矩阵由激光接收器的三维坐标数据计算得到,并随巷道掘进不断变化;机身-测量坐标系的齐次变换矩阵由二维运动平台在悬臂式掘进机上的安装参数计算得到。

$${}^0_1T = RPY(\gamma \beta \alpha) \text{Trans}(S_x S_y S_z) = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & A & B & \cos \gamma \sin \beta S_x + AS_y + BS_z \\ \sin \gamma \cos \beta & C & D & \sin \gamma \sin \beta S_x + CS_y + DS_z \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha & -\sin \beta S_x - \cos \beta \sin \alpha S_y + \cos \beta \cos \alpha S_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha$$

$$B = \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha$$

$$C = \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha$$

$$D = \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha$$

2.3 机身-测量坐标系变换

悬臂式掘进机可以看作由截割部分和机身部分组成^[14]。机身部分可简化为空间矩形刚体,机身坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 的原点 O_2 与刚体中心重合, O_2X_2 轴与机身部分横轴平行, O_2Y_2 轴与机身部分纵轴平行, O_2Z_2 轴与机身部分纵轴平行。

如图5所示,该测量系统安装在悬臂式掘进机机身上,测量坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 的 X, Y, Z 轴与机身坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 的 X_2, Y_2, Z_2 轴平行。机身坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 原点在测量坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 的三维坐标为 $\left(\frac{f}{2}-d, m+\frac{e}{2}-\frac{k}{2}, -h-\frac{j}{2}\right)$ 。

测量坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 由机身坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 经1个步骤变换即可得到:沿 O_2O_0 平移矢量 $S\left(\frac{f}{2}-d, m+\frac{e}{2}-\frac{k}{2}, -h-\frac{j}{2}\right)$, 得到机身-测量坐标系齐次变换矩阵,即

2.2 测量-巷道坐标系变换

如图4所示,由激光接收器构建的坐标系即为巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 。

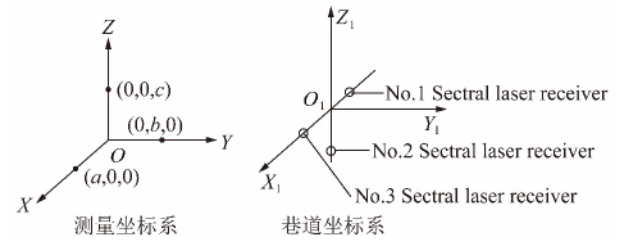


图4 测量-巷道坐标系变换

Fig. 4 Conversion of body-tunnel coordinate frames

根据空间坐标变换原理,巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 可由测量坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 经4个步骤变换得到:先绕 X 轴旋转角 α , 然后绕 Y 轴旋转 β 角,再绕 Z 轴旋转 γ 角,最后沿 OO_1 平移矢量 $S(S_x, S_y, S_z)$ 。以上参数均可由激光接收器的三维坐标数据计算得到。

巷道-测量坐标系齐次变换矩阵为

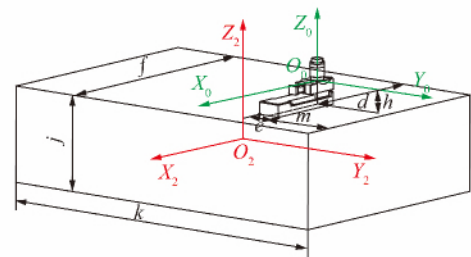


图5 机身-测量坐标系变换

Fig. 5 Conversion of body-measuring coordinate frames

$${}^2_0T = \text{Trans}(S_x S_y S_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{f}{2}-d \\ 0 & 1 & 0 & m+\frac{e}{2}-\frac{k}{2} \\ 0 & 0 & 1 & -h-\frac{j}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 悬臂式掘进机位姿

对悬臂式掘进机结构进行简化,其结构近似于空

间刚体。其位姿可由定位点和姿态角描述。定位点是其机身上固定一点, 姿态角包括航向角、俯仰角、横滚角^[15]。

设定位点为机身坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中的 $(0 \ 0 \ 0)$ 点, 即悬臂式掘进机机身中心^[16]。设定位点在巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的坐标值为 $({}^2_1X \ {}^2_1Y \ {}^2_1Z)$, 计算公式为

$$({}^2_1X \ {}^2_1Y \ {}^2_1Z \ 1) = (0 \ 0 \ 0 \ 1) \cdot {}^2_0T \cdot {}^0_1T \quad (1)$$

如图 6 所示, 俯仰角看作是悬臂式掘进机(刚体)纵轴线在巷道坐标系内与 $X_1O_1Y_1$ 平面的夹角, 航向角可以看作是其在 $X_1O_1Y_1$ 平面上的投影线与坐标轴的夹角, 如图 6 所示 $\delta \ \eta$ 。

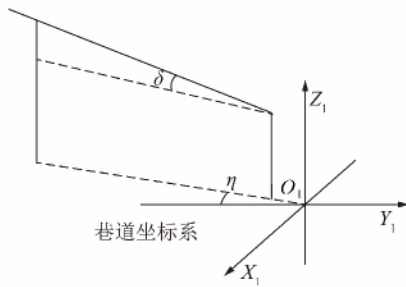


图 6 俯仰、航向角计算模型

Fig. 6 Pitching and drifting angles computation model

设机身坐标系中 $(0 \ \frac{k}{2} \ 0)$, $(0 \ -\frac{k}{2} \ 0)$ 点在巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的坐标值为 $({}^2_1X_1 \ {}^2_1Y_1 \ {}^2_1Z_1)$, $({}^2_1X_2 \ {}^2_1Y_2 \ {}^2_1Z_2)$ 。根据式(1), 在巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的表达式为

$$({}^2_1X_1 \ {}^2_1Y_1 \ {}^2_1Z_1 \ 1) = (0 \ \frac{k}{2} \ 0 \ 1) \cdot {}^2_0T \cdot {}^0_1T$$

$$({}^2_1X_2 \ {}^2_1Y_2 \ {}^2_1Z_2 \ 1) = (0 \ -\frac{k}{2} \ 0 \ 1) \cdot {}^2_0T \cdot {}^0_1T$$

悬臂式掘进机纵轴的方向向量表达式为

$$\mathbf{n}_1 = ({}^2_1X_1 \ -{}^2_1X_2 \ {}^2_1Y_1 \ -{}^2_1Y_2 \ {}^2_1Z_1 \ -{}^2_1Z_2)$$

以图 6 所示俯仰、航向角为正, 得

$$\delta = \arcsin [({}^2_1Z_2 - {}^2_1Z_1) / \sqrt{({}^2_1X_1 - {}^2_1X_2)^2 + ({}^2_1Y_1 - {}^2_1Y_2)^2 + ({}^2_1Z_1 - {}^2_1Z_2)^2}] \quad (2)$$

$$\eta = \arctan [({}^2_1X_1 - {}^2_1X_2) / ({}^2_1Y_1 - {}^2_1Y_2)] \quad (3)$$

横滚角看作是悬臂式掘进机(刚体)横轴在巷道坐标系内与 $X_1O_1Y_1$ 平面的夹角, 如图 7 所示的 σ ^[17]。

机身坐标系中 $(\frac{f}{2} \ 0 \ 0)$, $(-\frac{f}{2} \ 0 \ 0)$ ($G \ H$ 点)

点在巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的坐标值为 $({}^2_1X_3 \ {}^2_1Y_3 \ {}^2_1Z_3)$, $({}^2_1X_4 \ {}^2_1Y_4 \ {}^2_1Z_4)$, 根据式(1), 在巷道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的表达式为

$$({}^2_1X_3 \ {}^2_1Y_3 \ {}^2_1Z_3) = (\frac{f}{2} \ 0 \ 0 \ 1) \cdot {}^2_0T \cdot {}^0_1T$$

$$({}^2_1X_4 \ {}^2_1Y_4 \ {}^2_1Z_4) = (-\frac{f}{2} \ 0 \ 0 \ 1) \cdot {}^2_0T \cdot {}^0_1T$$

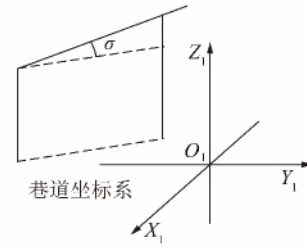


图 7 横滚角计算模型

Fig. 7 Rolling angle computation model

悬臂式掘进机横轴的方向向量表达式为

$$\mathbf{n}_1 = ({}^2_1X_3 - {}^2_1X_4 \ {}^2_1Y_3 - {}^2_1Y_4 \ {}^2_1Z_3 - {}^2_1Z_4)$$

以图 7 所示横滚角为正, 得

$$\sigma = \arcsin [({}^2_1Z_4 - {}^2_1Z_3) / \sqrt{({}^2_1X_3 - {}^2_1X_4)^2 + ({}^2_1Y_3 - {}^2_1Y_4)^2 + ({}^2_1Z_3 - {}^2_1Z_4)^2}] \quad (4)$$

3 测量精度仿真

悬臂式掘进机位姿解算模型的初始测量参数有激光发射器所测 $\alpha \ \beta \ \theta$ 以及二维运动平台移动和转动参数 d 。设 $d=0.3 \text{ m}$, $\gamma=10^\circ$, 激光发射器的旋转速度为 1500 r/min , 锁相环电机转速控制精度高于 0.002% , 单次角度测量误差应小于 0.43° 。设定角度测量精度冗余系数为 2, 将随机角度 $\alpha \ \beta \ \theta$ 取为标准正态分布, 在 0.83° 误差范围内的概率为 95% ^[18]。

运用仿真软件对该方法的测量精度进行模拟计算, 得到在不同距离下定位点的仿真计算结果。定位点在巷道坐标系的分布如图 8 所示。由图 8 可知定位点的分布呈一定规律, 大部分点都分布在一定区域内, 仅少部分误差特别大的点。对离散点取平均值, 作为该测量模型定位点的仿真值^[19]。

表 1 为 1 000 次测量仿真(系统测得 1 000 组角度数据)后得到的定位点仿真值与理论值关系。

由图 4 可知, Y 轴方向基本与巷道掘进方向平行, 可大致代表该测量系统的作用距离。由表 1 可知, 在 10 m 距离下定位点三维坐标值的最大测量误差为 0.32 cm 。随着激光发射器与接收器的距离不断增大, 20 m 距离下定位点三维坐标值的最大测量误差为 4.58 cm , 25 m 距离下定位点三维坐标值的最大测量误差为 8.23 cm , 30 m 距离下定位点三维坐标值的最大测量误差达到 14.72 cm 。

图 9 为对应悬臂式掘进机在上述 4 个位置的姿态角仿真值分布。

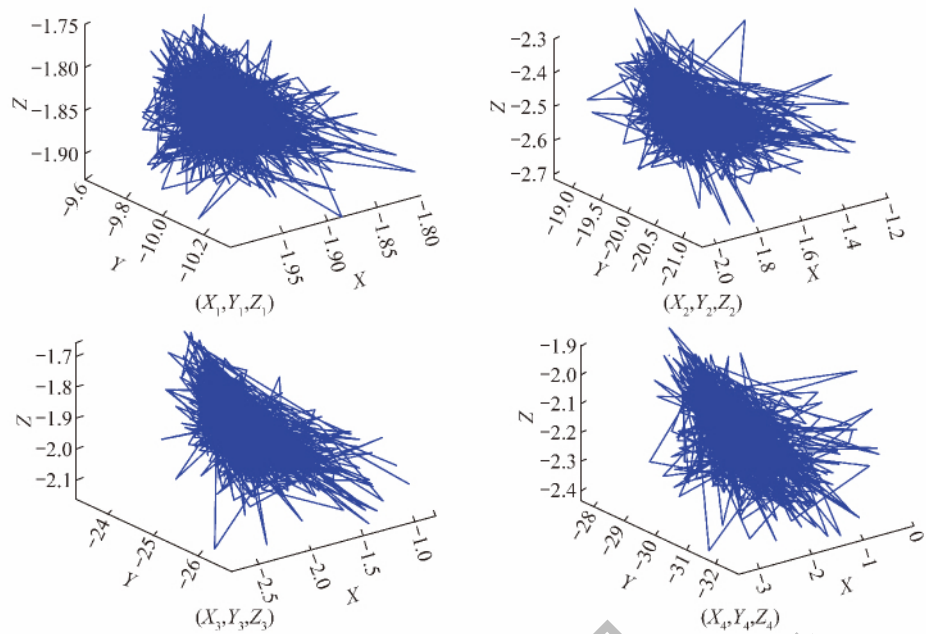


图 8 定位点分布

Fig. 8 Distribution of location points

表 1 1 000 次定位点测量仿真结果

Table 1 Simulation outcome of position measurement for 1 000 times

m

坐标	理论值	仿真值	误差	坐标	理论值	仿真值	误差
X_1	-1.925 3	-1.922 1	0.003 2	X_3	-1.949 6	-1.867 3	0.082 3
Y_1	-9.933 2	-9.937 3	0.004 1	X_4	-24.934 3	-24.992 3	0.058 1
Z_1	-1.835 1	-1.838 7	0.003 6	Z_3	-1.854 7	-1.900 2	0.044 5
X_2	1.781 5	-1.735 7	0.045 8	X_4	-1.909 0	-1.761 8	0.147 2
Y_2	-19.933 3	-19.944 8	0.011 5	Y_4	-29.936 3	-29.973 1	0.036 8
Z_2	-2.474 3	-2.480 1	0.005 8	Z_4	-2.131 8	-2.163 1	0.031 3

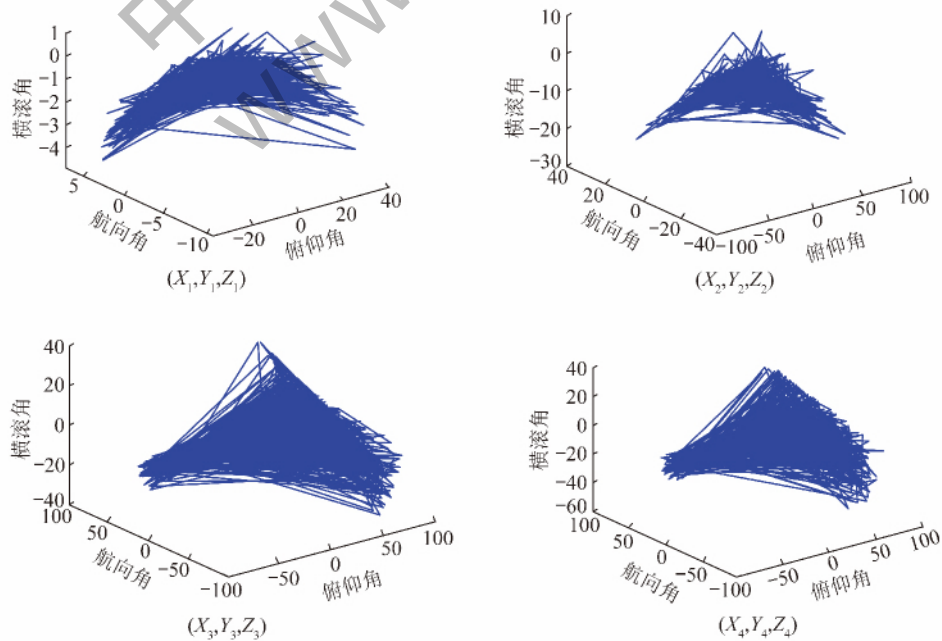


图 9 姿态角分布

Fig. 9 Distribution of attitude angles

与定位点仿真值计算方法类似,对离散点进行平均值计算,得到该测量模型姿态角的仿真值。

表 2 为 1 000 次测量仿真(系统测得 1 000 组角度数据)后得到的姿态角仿真值与理论值关系。

表 2 1 000 次姿态角测量仿真结果
Table 2 Simulation outcome of attitude angles measurement for 1 000 times

距离/m	姿态角	理论值/(°)	仿真值/(°)	误差/(°)
10	俯仰角	0.036 2	0.242 9	0.206 7
	航向角	0.004 1	0.137 1	0.133 0
	横滚角	-0.742 7	0.156 8	0.899 5
20	俯仰角	-0.008 3	0.822 2	0.830 5
	航向角	-0.001 6	-0.302 5	0.304 1
	横滚角	-6.134 1	-6.937 0	0.802 9
25	俯仰角	-0.251 3	0.923 7	1.175 0
	航向角	0.012 0	0.419 6	0.407 6
	横滚角	2.333 1	0.314 7	2.018 4
30	俯仰角	-0.167 6	1.852 6	2.020 2
	航向角	0.042 6	-0.409 8	0.452 4
	横滚角	-1.810 4	-4.332 7	2.522 3

由表 2 可知,航向角测量精度最高,在 10 m 距离上的测量误差为 0.133 0°,测量误差随距离增大而不断增大,30 m 距离时测量误差达到 0.452 4°。俯仰角、横滚角测量精度相对较低,在 10 m 距离上的测量误差分别为 0.206 7°和 0.899 5°,测量误差随距离增大而不断增大,30 m 距离时测量误差达到 2.020 2°和 2.522 3°。

4 结 论

(1) 该位姿测量方法在激光接收器构建的巷道坐标系中描述悬臂式掘进机位姿状态,为其远程精准控制奠定基础。

(2) 激光发射器自主发射旋转激光平面扫描激光接收器,是目前实现悬臂式掘进机自主位姿测量的最优方式。

(3) 仿真表明该测量方法在 25 m 距离上对定位点三维坐标值的最大测量误差为 8.23 cm,满足现行煤巷工程质量标准。

(4) 仿真表明:煤巷狭长空间下,该测量方法的横轴方向精度最低,竖轴方向精度最高;横滚角精度最低,航向角精度最高。在下一步测量数据优化研究中,要重点研究定位点 X 轴坐标及横滚角的计算参数优化,提高其测量精度。

参考文献:

[1] 王 虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40 a[J]. 煤炭学报,

2010, 35(11): 1815-1820.

Wang Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(11): 1815-1820.

[2] 李 睿. 悬臂式掘进机机身位姿参数检测系统研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012: 41-48.

Li Rui. Research on an automatic detection system for the position and orientation parameters of boom-type roadheader body[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2012: 41-48.

[3] 齐宏亮. 悬臂式掘进机器人位姿测控系统研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011: 20-25.

Qi Hongliang. Research on estimating and control system of pose and position for robotic roadheaders[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011: 20-25.

[4] 岳元龙. 提高测量可靠性的多传感器数据融合有偏估计方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1843-1852.

Yue Yuanlong. Improving measurement reliability with biased estimation for multi-sensor data fusion[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(9): 1843-1852.

[5] 张晓辉. 空间交会测量技术在计算机辅助装调中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2510-2516.

Zhang Xiaohui. Application of space intersection measurement to computer aided alignment[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2510-2516.

[6] 杨东方. 基于 Kinect 系统的场景建模与机器人自主导航[J]. 机器人, 2012, 34(5): 581-589.

Yang Dongfang. Scene modeling and autonomous navigation for robots based on kinect system[J]. Robot, 2012, 34(5): 581-589.

[7] 杨凌辉. 采用光平面交汇的大尺寸坐标测量方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1105-1109.

Yang Linghui. Large-scale coordinates measurement method based on intersection of optical planes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1105-1109.

[8] 齐荔荔. 图像式光电编码器的测角技术及其硬件实现[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412001-1-0412001-10.

Qi Lili. Angle measurement technology of an optical pattern rotary encoder and its hardware implementation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412001-1-0412001-10.

[9] 潘 年. 拼接式钢带光栅编码器测角误差分析与修正[J]. 中国激光, 2013, 36(5): 788-794.

Pan Nian. Error analysis and correction of scale tape grating encoder[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 36(5): 788-794.

[10] 王志文. 不同锁相机制的双馈电机对电力系统小干扰稳定的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6167-6176.

Wang Zhiwen. Analysis on impact of doubly fed induction generators with different phase lock mechanism on power system small signal stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6167-6176.

[11] 端木琼. 基于光电扫描的三维坐标测量系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2015-2019.

Duan Muqiong. 3D coordinate measurement system based on optoelectronic scanning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011,

- 40(10): 2015–2019.
- [12] 李军利. 机器人化悬臂式掘进机的运动分析及车体定位[J]. 煤炭学报 2008, 33(5): 583–587.
Li Junli. Kinematics analysis and carriage position ing of roboticized roadheader[J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(5): 583–587.
- [13] 田 劫. 纵轴式掘进机巷道断面自动截割成形控制方法[J]. 煤炭学报 2009, 34(1): 111–115.
Tian Jie. Automatic section cutting and forming control of longitudinal axial roadheaders [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 111–115.
- [14] 赵丽娟. 纵轴式掘进横摆运动参数的优化设计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2112–2117.
Zhao Lijuan. Horizontal swing movement parameters design of longitudinal roadheader [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2112–2117.
- [15] 陈 文. 四环空间稳定平台姿态角的解算[J]. 中国惯性技术学报 2008, 16(3): 269–273.
Chen Wen. Attitude calculation of four-gimbal space-stable platform [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(3): 269–273.
- [16] 唐争气. 盾构机实时姿态测量和计算方法的研究[J]. 土木工程学报 2007, 40(11): 92–97.
Tang Zhengqi. Measurement and calculation method for real-time attitude of tunneling machines [J]. China Civil Engineering Journal 2007, 40(11): 92–97.
- [17] 潘国荣. 引入倾斜等效观测值的盾构姿态解算方法[J]. 中国矿业大学学报 2014, 43(3): 502–507.
Pan Guorong. Shield attitude calculation method based on importing equivalent observations of tilt-angle [J] Journal of China University of Mining & Technology 2014, 43(3): 502–507.
- [18] 耿 磊. wMPS 测角不确定度研究[J]. 光电工程, 2011, 38(10): 6–11.
Geng Lei. Research on angle measurement uncertainty of wMPS [J]. Opto-Electronic Engineering 2011, 38(10): 6–11.
- [19] 杨凌辉. 基于光电扫描的工作空间测量定位系统误差分析[J]. 光电子·激光 2010, 21(12): 1829–1833.
Yang Linghui. Error analysis of workspace measurement positioning system based on optical scanning [J]. Journal of Optoelectronics • Laser 2010, 21(12): 1829–1833.