

文章编号 1004-924X(2016)增-0216-08

基于激光扫描技术的采煤机精确定位系统

刘一鸣, 刘万里*, 杨滨海

(中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116)

摘要:针对目前煤矿井下现有定位方法精度不高的问题,提出了基于激光扫描的高精度定位系统。该系统采用前方三角交汇与扇面激光扫描相结合的采煤机精确定位方案;基于两基站,利用系统的时间信号差,推导了定位系统对安装于采煤机身上的接收器的基本定位原理,将系统坐标下接收器采集的俯仰角和水平角信息转换成采区局部地理坐标系下的采煤机坐标;最后在实验室模拟综采工作面环境下(15.341 m×4.125 m)进行了实验研究。结果表明,X轴、Y轴、Z轴上的最大误差分别为0.116,0.093,0.132 m,系统的三维定位精度为0.139 97 m,单位距离的三维精度为0.018 763 m/m,能够满足综采工作面采煤机在机头或机尾处的定位精度的要求。

关键词:采煤机;精确定位;激光扫描;三角交汇

中图分类号:TD67;TP311 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0216

Shearer precision positioning system based on laser scanning technology

LIU Yi-ming, LIU Wan-li*, YANG Bin-hai

(School of Mechanical and Electrical Engineering,
China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

* Corresponding author, E-mail: lwl412101@cumt.edu.cn

Abstract: Aiming at the inaccuracy of existing positioning technology underground coal mine, a precision positioning system by using coal cutter with combination of front triangle intersection and sector laser scanning was proposed. The basic positioning principle of the receiver installed on the body of coal cutter was derived based on two-station-system by using the difference of time signal of system. Then the position information receiver in the coordinate of system, involving pitch angles and horizontal angles, was transformed into coordinated of the coal cutter in local geographic coordinate system in mining area. Finally, positioning experiments were performed in the area(15.341 m×4.125 m) of fully mechanized face by simulation. The results show that the maximal errors on X-axis, Y-axis and Z-axis are 0.116, 0.093 and 0.132 m respectively, while the three-dimensional positioning accuracy of the system and the unit distance is 0.139 97 m and 0.018 763 m/m respectively. The proposed system can meet the requirements of positional accuracy for coal cutter of fully mechanized face on head-piece or tail.

Key words: coal cutter; precision positioning; laser scanning; triangle intersection

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51304190, No. U150116)

1 引言

采煤机定位技术是实现长壁综采工作面自动化的关键技术之一^[1]。目前,采煤机定位技术主要有红外定位法^[2]、无线传感器网络法^[3-4]、轨道里程计法^[5]、超声波定位法^[6]、计算机视觉定位技术^[7]以及基于捷联惯性导航^[8]的采煤机定位技术。其中,红外定位法、无线传感器网络法、超声波定位法、计算机视觉定位技术是基于外部传感器的定位方法,轨道里程计法与基于捷联惯性导航的采煤机定位技术是基于自包含传感器的定位方法^[9]。红外定位法、无线传感器网络法和超声波定位法的定位精度主要与信号接收装置的布置密度有关,由于这些定位法基于已知的支架坐标信息,在实际的生产过程中,工作面支架移架频繁,位置不能实时获取,所以无法实现实时与精确的定位^[10]。计算机视觉定位技术的定位精度受煤矿井中粉尘和潮湿环境等因素的影响,此外,其定位距离较近的特点也影响了该技术在井下环境中的应用和发展。

近年来,基于惯性导航的采煤机定位技术成为国内外研究热点。本课题组提出的利用带自动寻北功能的惯性导航装置与轴编码器结合的采煤机定位技术,其误差在百米三十厘米左右^[11],虽然采煤机在综采工作面工作完一刀后仍存在一定的误差,但较前文叙述的几种采煤机定位方式已有所提高。为提高基于惯性导航装置与轴编码器结合的采煤机定位技术的定位精度,当采煤机工作完一刀到达管板输送机机头处时,需要定位出采煤机的位置信息,并提供采煤机的校准定位坐标。激光具有方向性好、能量高以及相干性好等特点,所以在定位方面具有明显的优势。国内外学者提出了基于激光跟踪仪的定位系统、iGPS 定位系统^[12]和 wMPS 定位系统^[13]。这些系统的精度非常高,但价格都比较昂贵。其中,激光跟踪仪定位技术仅能测量单点^[14],iGPS 定位系统与 wMPS 定位系统在综采工作面环境中安置于巷道中高位置时盲区比较大,并不适于采煤机定位。本文提出利用前方三角交汇原理与激光扫描相结合的定位方式定位到达管板输送机机头位置的采

煤机。该方法成本低、精度高,满足煤采工作面采煤机的定位需求。

2 技术方案与定位模型

图 1 所示为综采面中基于激光扫描的采煤机精确定位系统的基站与接收器布置示意图,采煤机摇臂上安装了一个接收器,基站布置在巷道中。采煤机来到刮板输送机的机头处时,接收器获取信号,计算出此时接收器的位置坐标,通过坐标转换得到接收器在采区局部地理坐标系中的位置信息。

图 2 为采煤机定位算法的主要流程。定位系统至少需要两个基站(D_1 与 D_2),定位开始后基站发射激光信号,接收器接收信号,单片机记录时间信号,通讯模块将信号传送到上位机。然后上位机通过算法处理时间信息,计算出接收器在这两个基站组成的局部坐标系中相对于基站 D_1 的俯仰角与水平角,以及相对于基站 D_2 的水平角,得到接收器在局部坐标系中的位置坐标。最后,根据接收器在局部坐标系中的坐标算出接收器在系统坐标系中的坐标信息。

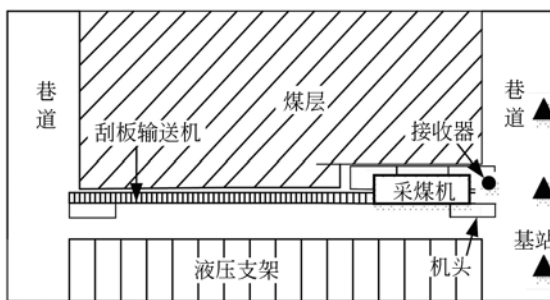


图 1 基于激光扫描的采煤机精确定位系统的基站与接收器布置俯视图

Fig. 1 Overview of based station and receiver arrangement of shearer positioning system based on laser scanning technology

如图 3 与图 4 所示,单基站中安装的激光发射器发射出两个扇面激光,即图 4 中的扇面激光 1 与扇面激光 2。系统工作时,两个基站产生的 4 个扇面激光在转台电机的带动下进行 360°扫描,接收器接收到激光信号,通过解算时间信号可定位出采煤机上目标点的位置。对单一基站而言,

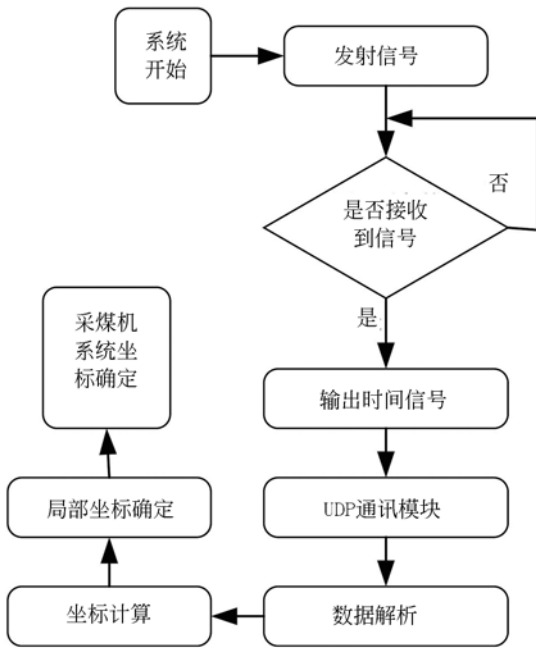


图 2 采煤机定位算法主要流程

Fig. 2 Basic flows of shearer positioning algorithm

以扇面激光与水平面的交线为轴, 旋转扇形激光面, 使得其与垂直平面的夹角为 θ ; 以扇面激光 1 和扇面激光 2 与基站 1 所在水平面的交线为两边, 得到图中所示的 α 角。以单基站为例, 电机的转速为 ω , 当扇面激光 1 从转台开始运动扫描到激光信号接收器, 记录下此时的时间 t_{11} , 扇形激光 2 扫描到接收器的时间为 t_{12} 。当扇面激光 1 转到转台零位时, 基站转台上安装的对射管通路, 红外 LED 灯发出光亮, 接收器接收到红外 LED 灯的光信号, 记录下此时的时间 t_{01} 。利用 t_{11}, t_{12}, t_{01} 这 3 个时间可以计算出接收器基于基站 D_1 的俯仰角, 以及基于转台零位的水平夹角。

电机在 $t_{11} \sim t_{12}$ 这段时间中转动的角度为

$$y_p = \arcsin \frac{\sqrt{\tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \sin^2 \left[\frac{2\pi(t_{11} - t_{12})\omega}{2} \right] + \tan^2 \theta - \tan \theta}}{\sin \left[\frac{2\pi(t_{11} - t_{12})\omega}{2} \right] + \tan \left[\frac{\alpha}{2} \right]} \quad (2)$$

接收器 T 基于基站 D_1 的水平角度 H_1 :

$$H_1 = 2\pi\omega(t_{01} - t_{11}) \quad (3)$$

同理得到接收器 T 基于基站 D_1 的水平角度 H_2 。零位信号与基站 $D_1 D_2$ 连线向接收器 T 方向

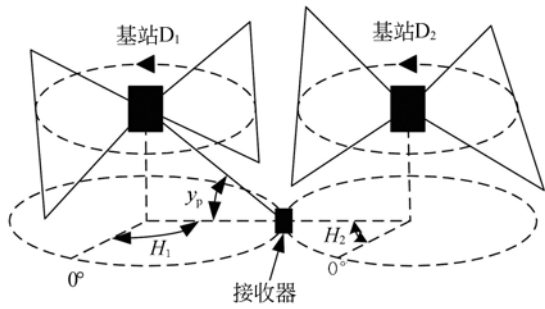


图 3 双基站系统测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system with two based stations

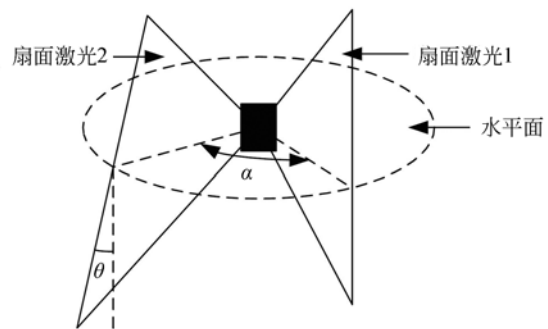


图 4 单个基站的扇面激光发射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of launch of two fan-shaped laser on one based station

$2\pi\omega(t_{11} - t_{12})$ 。接收器 T 对基站的俯仰角为 y_p , 则 $y_p, x_1, y_1, \alpha, \theta$ 的关系为:

$$\begin{cases} \tan \left[\frac{\alpha}{2} \right] \cos y_1 - \tan \theta \sin y_1 = \sin \left[\frac{x_1}{2} \right] \\ y_p = \arcsin \frac{\tan y_1}{\sqrt{\left[\frac{\sin(x_1/2)}{\cos y_1} \right]^2 + \left[\frac{1}{\cos y_1} \right]^2}} \end{cases} \quad (1)$$

则接收器 T 对基站的俯仰角 y_p 为:

的垂线的夹角为 H_0 , 基站 D_1 与基站 D_2 之间的水平距离为 d_{12} 。以基站 D_1 指向基站 D_2 方向为 X 轴, 垂直于 X 轴并在同一水平面上指向综采面方向为 Y 轴, 垂直向上为 Z 轴, 计算可

得接收器 T 点的坐标 (x, y, z) 为:

$$x = \frac{d_{12} \cos(2\pi(t_{01} - t_{21})\omega - H_0) \sin(2\pi(t_{01} - t_{11})\omega - H_0)}{\sin(2\pi(t_{01} - t_{11})\omega + 2\pi(t_{01} - t_{21})\omega)}, \quad (4)$$

$$y = \frac{d_{12} \cos(2\pi(t_{01} - t_{21})/\omega - H_0) \cos(2\pi(t_{01} - t_{11})/\omega - H_0)}{\sin(2\pi(t_{01} - t_{11})/\omega + 2\pi(t_{01} - t_{21})/\omega)}, \quad (5)$$

$$z = \frac{d_{12} \cos(2\pi(t_{01} - t_{21})\omega - H_0) \tan \left[\arcsin \frac{\sqrt{\tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \sin^2 \left(\frac{2\pi(t_{11} - t_{12})\omega}{2} \right) + \tan^2 \theta} - \tan \theta}{\sin \left(\frac{2\pi(t_{11} - t_{12})\omega}{2} \right) + \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right]}{\sin(2\pi(t_{01} - t_{11})\omega + 2\pi(t_{01} - t_{21})\omega)}. \quad (6)$$

3 采区局部地理坐标系下的采煤机位置信息

为了直观地描述位于综采工作面中的采煤机位置,这里建立一个与采煤机工作的采区固联的采区局部地理坐标系,如图 5 所示。以该采区内采煤机的工作起始点作为采区局部地理坐标系的原点 O_g ,以当地纬线的指向东方向为 X_g 轴,当地子午线的指向北方向为 Y_g 轴,垂直向上方向为 Z_g 轴。

基站 D_1 与基站 D_2 布置在综采工作面巷道中的已知地理坐标点,在采区局部地理坐标系中的坐标分别为 $[x_{d1}, y_{d1}, z_{d1}]$, $[x_{d2}, y_{d2}, z_{d2}]$ 。则接收

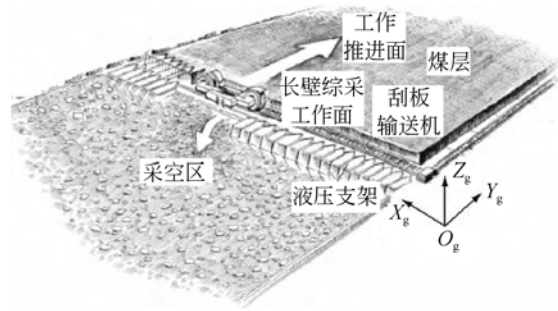


图 5 采区局部地理坐标系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of local geographic coordinate system in shearer area

器 T 在采区局部地理坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 中的坐标 $[x_g, y_g, z_g]$ 为:

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{|y_{d1} - y_{d2}|}{\sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2}} & -\frac{|x_{d1} - x_{d2}|}{\sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2}} & 0 \\ \frac{|x_{d1} - x_{d2}|}{\sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2}} & \frac{|y_{d1} - y_{d2}|}{\sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{d1} \\ y_{d1} \\ z_{d1} \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

基站 D_1 与基站 D_2 之间的水平距离 d_{12} 为:

$$d_{12} = \sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2}. \quad (8)$$

4 模拟定位实验

如图 6 所示,在实验室进行模拟实验时基站应排成一排,接收器安装在采煤机模型的摇臂上。移动采煤机模型,使得安装有接收器的摇臂始终到达画线位置,模拟采煤机切完一刀后来到管板输送机机头处。

首先为单基站对于接收器的水平角与俯仰角的测量,测量数据主要有接收器接收基站 a 两个

扇面激光的时间 t_{a1} 与 t_{a2} ,以及接收到零位信号的时间 t_{01} ,接收器程序收到的时间间隔为 0.000 2 s,产生的数据为十六进制数据,换算成十进制数据;利用安装在水平尺上的激光测距仪,测出接收器与基站之间的位置关系,包括水平距离和垂直距离。基站 a 激光器的发射口到地面的垂直距离为 0.935 m,接收器与水平面两基站连线的垂线之间的夹角利用测得距离的三角关系计算,零位与两基站垂线之间的夹角通过测量得到为 29°。移动采煤机模型,模拟采煤机到达管板输送机机头处,共定位了 18 个点的位置信息模拟采煤机运行 18 刀之后到达机头处的数据。表 1

为基站 a 与接收器之间的俯仰角和水平角信息，图 7 为基站 a 与接收器的俯仰角和水平角差值。

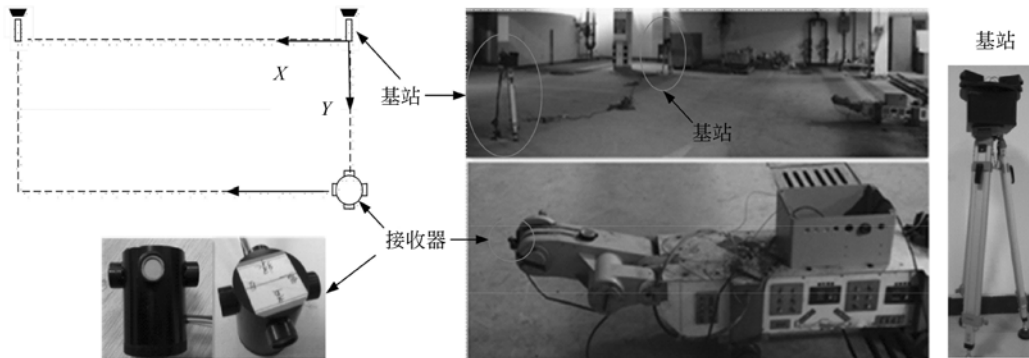


图 6 基于激光扫描技术的采煤机精确定位系统的模拟试验示意与场景图

Fig. 6 Schematic and photograph of simulation experiment of shearer precision positioning system based on laser scanning technology

表 1 基站 a 与接收器之间的俯仰角和水平角误差值

Tab. 1 Errors of pitch angle horizontal angle of based station a

序号	俯仰角差值/(°)	水平角差值/(°)
1	0.133	0.160
2	0.122	-0.088
3	0.145	-0.375
4	0.272	-0.111
5	0.301	0.013
6	0.205	-0.065
7	0.127	-0.118
8	0.140	-0.077
9	0.233	-0.107
10	0.207	-0.123
11	0.116	-0.135
12	0.132	-0.192
13	0.146	-0.134
14	0.203	-0.147
15	0.176	-0.181
16	0.243	-0.081
17	0.226	-0.145
18	0.169	-0.165

俯仰角与水平角的测量值主要通过直角三角形的三边关系计算得到, 基站 a 与接收器之间的水平距离为 4.125~15.886 m, 俯仰角的最大误差为 0.301°; 除去序号 3 的误差水平角的最大误差为 0.192°。

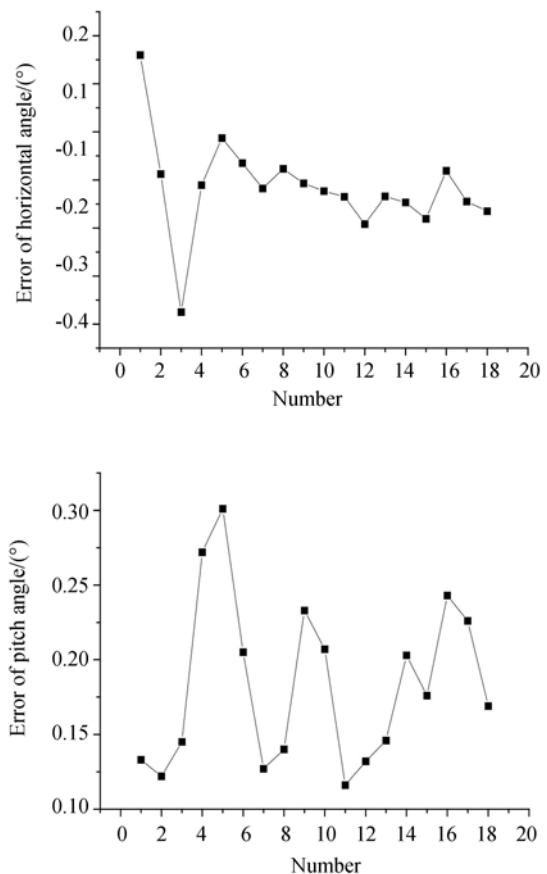


图 7 接收器与基站 a 俯仰角差值与水平角差值图

Fig. 7 Errors of pitch angle and horizontal angle of based station a

双基站摆放时利用挡板测得的水平中心距离为 15.341 m,双基站对接收器的定位主要有以下几个数据:接收器接收到基站 a 的时间 t_{a1} 与 t_{a2} , 接收到基站 b 的时间 t_{b1} 与 t_{b2} (仅利用到其中的 t_{b1}), 接收到零位信号的时间 t_{01} 。表 2 与图 8 为基站 b 与接收器之间的水平角误差,最大值为 0.32° , 主要分布在 $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ 。

表 2 单基站 b 与接收器之间水平角计算值与测量值

Tab. 2 Differences between computed and measured horizontal angles of base station b

序号	水平角差值/(°)
1	0.229
2	0.320
3	0.195
4	0.141
5	0.193
6	0.096
7	0.027
8	0.106
9	-0.161
10	-0.198
11	-0.140
12	-0.028
13	-0.141
14	-0.132
15	0.082
16	0.092
17	0.104
18	0.108

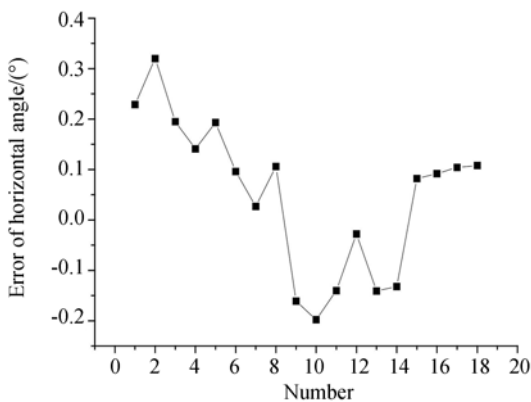


图 8 接收器与基站 b 水平角差值图

Fig. 8 Errors of horizontal angle of based station b

表 3 和图 9 为接收器在以 a 基站为原点的坐标系中的 XYZ 轴计算值与测量值以及差值, X 轴上的误差为 $0.030 \sim 0.116$ m, Y 轴上的误差为 $0.053 \sim 0.093$ m, Z 轴上的误差为 $0.043 \sim 0.129$ m。利用贝塞尔(Bessel)公式衡量系统的三维定位精度, 即有:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)}{n-1}}, \quad (9)$$

算得 $\sigma=0.129 97$, 表明系统的三维定位精度为 $0.129 97$ m。根据单位误差公式:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{x_{si}^2 + y_{si}^2 + z_{si}^2}}, \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}. \quad (11)$$

算得单位距离的三维精度为 $0.017 863$ m/m。

表 3 接收器在以 a 基站为原点的坐标系中的 X, Y, Z 轴计算值与测量值

Tab. 3 Differences between computed and measured of X, Y, Z in coordinate system with base station a as origin via receiver

序号	X 轴上差值	Y 轴上差值	Z 轴上差值
1	0.084	0.079	-0.049
2	0.074	0.081	-0.043
3	0.116	0.089	-0.052
4	0.094	0.093	-0.061
5	0.030	0.069	-0.073
6	0.038	0.053	-0.079
7	-0.076	0.067	-0.079
8	-0.068	0.081	-0.083
9	-0.074	0.087	-0.103
10	-0.108	0.091	-0.109
11	-0.096	0.089	-0.111
12	-0.093	0.079	-0.129
13	-0.097	0.069	-0.088
14	-0.066	0.079	-0.093
15	-0.082	0.094	-0.132
16	0.086	0.106	-0.126
17	0.082	0.096	-0.114
18	0.102	0.092	-0.096

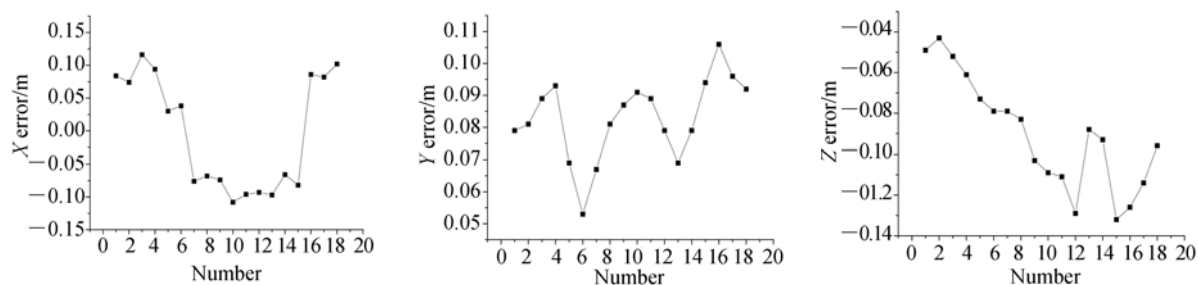


图9 接收器在以a基站为原点的坐标系中测得的X,Y,Z轴计算值与测量值的差值图

Fig.9 Differences of computed and measured X,Y,Z coordinates in coordinate system with based station a as origin via receiver

5 结 论

本文根据综采工作面对采煤机高精度定位的要求,提出了基于激光扫描技术的采煤机定位系统。该系统采用前方三角交汇原理与扇面激光扫描方式相结合的采煤机定位技术方案,推导了系统的定位原理,将系统坐标系下的接收器坐标换

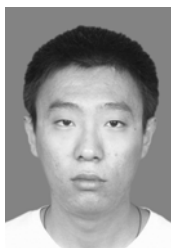
算到采区局部地理坐标系下采煤机的位置坐标。模拟试验结果表明,X轴上的最大误差为0.116 m,Y轴上的最大误差为0.093 m,Z轴上的最大误差为0.132 m,系统的三维定位精度为0.139 97 m,单位距离三维精度为0.018 763 m/m,小于其他综采面采煤机定位技术的误差,符合综采工作面采煤机定位精度的要求。

参考文献:

- [1] 郝尚清,王世博,谢贵君,等.长壁综采工作面采煤机定位定姿技术研究[J].工矿自动化,2014,40(6): 21-25.
HAO SH Q, WANG SH B, XIE G J, *et al.*. Research of determination technologies of position and attitude of shear on long-wall fully mechanized coal mining face [J]. *Industry and Mine Automation*, 2014, 40(6): 21-25. (in Chinese)
- [2] 李俊士,魏文艳.红外线采煤机位置检测装置的研究[J].机械工程与自动化,2013,6:143-144.
LI J SH, WEI W Y. Research on position detection device of infrared coal mining machine [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2013, 6: 143-144. (in Chinese)
- [3] 田丰,秦涛,刘华艳,等.煤矿井下线型无线传感器网络节点定位算法[J].煤炭学报,2010,35(10): 1760-1764.
TIAN F, QIN T, LIU H Y, *et al.*. Nodes localization algorithm for linear wireless sensor network in underground coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(10): 1760-1764. (in Chinese)
- [4] 杨维,周嗣勇,乔华.煤矿安全监测无线传感器网络节点定位技术[J].煤炭学报,2007,32(6):652-656.
YANG W, ZHOU S Y, QIAO H. Node location in wireless sensor networks for coal mine security monitoring [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(6): 652-656. (in Chinese)
- [5] 王亦清,项止武,刘振坚,等.采煤机位置监测智能节点设计[J].煤矿机械,2010,31(12):11-13.
WANG Y Q, XIANG ZH W, LIU ZH J, *et al.*. Design of intelligent node of shearer position monitor [J]. *Coal Mine Machinery*, 2010, 31(12): 11-13. (in Chinese)
- [6] 张连昆,谢耀社,周德华,等.基于超声波技术的采煤机位置监测系统[J].煤炭科学技术,2010,38(5): 104-106.
ZHANG L K, XIE Y SH, ZHOU D H, *et al.*. Position monitoring and measuring system of coal shearer based on ultrasonic wave technology [J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(5): 104-106. (in Chinese)
- [7] YANG S Y, GE W M, ZHANG CH, *et al.*. De-

- tecting and tracking moving targets on omnidirectional vision[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2009, 15(1):13-18.
- [8] SAMMARCO JJ. mining machine orientation using inertial magnetic and gravitational sensors[C]. Industry Applications Society Meeting, 1988, 2: 1260-1262.
- [9] 孙继平. 煤矿监控技术装备与标准[M]. 北京:煤炭工业出版社,2011.
SUN J P. New technologies and new equipments of coal mine monitoring [M]. *Beijing: Industry and Mine Automation*, 2011. (in Chinese)
- [10] 葛世荣, 苏忠水, 李昂, 等. 基于地理信息系统(GIS)的采煤机定位定姿技术研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2503-2508.
GE SH R, SU ZH SH, LI A, *et al.*. Study on positioning and orientation of ashearer based on geographic information system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2503-2508. (in Chinese)
- [11] 李昂. 采煤机采区绝对定位定姿技术研究[D]. 江苏:中国矿业大学,2015.
LI A. *Research on Shearer Absolute Positioning and Attitude Technology in Mining Area* [D]. Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese)
- [12] 康海东, 范百兴, 李宗春, 等. iGPS 测量原理及其精度分析[J]. 测绘通报, 2012, 3: 12-15.
KANG H D, FAN B X, LI Z CH, *et al.*. iGPS measurement principle and precision analysis[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012, 3: 12-15. (in Chinese)
- [13] 端木琮. wMPS 系统的硬件平台优化及动态坐标测量关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
DUAN MU Q. *Research on Hardware Platform Optimization and Key Technologies of Dynamic Metrology for wMPS*[D]. Tianjing: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [14] 刘万里. 激光制导测量机器人系统及应用技术研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
LIU W L. *Study on Laser Guided Measurement Robot System and Its Applications*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)

作者简介:



刘一鸣(1991—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事 UWB 采煤机定位等方面的研究。E-mail: 1285106490@qq.com

通讯作者:



刘万里(1979—),男,河南商丘人,副教授,2009 年于天津大学获得博士学位,硕士生导师,主要从事基于激光技术的地下精确定位等方面的研究。E-mail: lw412101@cumt.edu.cn