

基于四点式光靶的掘进机自动定位方法研究与试验

田 原^{1,2}

(1.中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,山西 太原 030009;

2.煤矿采掘机械装备国家工程实验室,山西 太原 030009)



扫码移动阅读

摘 要:为了利用惯性导航技术方位与姿态检测优势,实现组合式掘进机导航定位,提出基于四点式光靶的掘进机定位方法。阐述了四点式光靶的特点,分析了系统定位机理,建立了解算模型,通过仿真研究了主要参数对解算模型的影响,仿真结果表明:所建立模型在掘进机机身偏转角不超过 15° 时,对机身横向偏移量的估计精度较高,并且对距离不敏感,对距离的估计则受偏转角和距离的影响,精度较差;搭建了试验装置并用全站仪完成试验验证,试验结果显示在导航仪与光靶间距离为39~94 m的断面内最大定位偏差为0.063 m,巷道进尺方向的距离检测最大偏差为1.064 m,并呈现距离越远,偏差越大的规律,验证了仿真结论。基本满足与惯性导航系统组合实现掘进机自动导航定位的精度要求。

关键词:掘进机;定位;机器视觉;四点式光靶

中图分类号:TD421

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)12-0035-06

Research and test on automatic positioning method of roadheader based on four point light target

TIAN Yuan^{1,2}

(1.Taiyuan Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030009, China; 2. National Engineering

Laboratory of Coal Mining Machinery and Equipment, Taiyuan 030009, China)

Abstract: In order to realize navigation and positioning of roadheader in combination with inertial navigation technology, a positioning method of roadheader based on four point light target is put forward. The characteristics of the four point type optical target are described. The system positioning mechanism is analysis. The mathematical model is established. The effect of main parameters on the calculation model of the research is simulated. The simulation results show that the high estimation accuracy on lateral offset when the yaw angle is less than 15 degrees, and is not sensitive with the distance between the roadheader and the device. The simulation results show that a poor estimation accuracy to the distance; the experiment device is built and a test is completed by the total station. The test results show that the maximum positioning error of the proposed method is 0.063 mm in the section within the range of about 39~94 m away from the target. The maximum deviation from the direction of the roadway is 1.064 m, and the farther the distance, the greater the deviation and the basic rules and simulation results is verified. The positioning method of roadheader based on the four point light target can meet the accuracy requirement of automatic navigation and positioning of the roadheader with the combination of inertial navigation system.

Key words: roadheader; positioning; machine vision; four point light target

0 引 言

煤矿巷道截割过程中产生的大量粉尘、噪声和

存在的安全隐患对掘进机自动化和无人化作业提出了迫切要求,其中掘进机自动导航技术成为关键技术之一^[1]。煤矿巷道尤其是主巷道对巷道成型精

收稿日期:2018-06-03;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.12.006

基金项目:山西省煤基重点科技攻关资助项目(MJ2014-03-03)

作者简介:田 原(1976—),男,山西忻州人,副研究员,博士。E-mail:33231495@qq.com

引用格式:田 原. 基于四点式光靶的掘进机自动定位方法研究与试验[J]. 煤炭科学技术,2018,46(12):35-40.

TIAN Yuan. Research and test on automatic positioning method of roadheader based on four point light target[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 35-40.

度有较高要求,GB 50213—2010《煤炭井巷工程质量验收规范》第 7.2.6 中规定“基础掘进断面规格的允许偏差为 $-25 \sim +150 \text{ mm}$ ”^[2],这一偏差是最终成型偏差,包含检测、控制和执行等多个环节的偏差,考虑到掘进机装配和控制精度不高、工况恶劣等因素,通常在执行环节会产生较大偏差;另一方面,掘进机通过悬臂末端的截割部截割并控制断面轮廓的位置和精度,机身位置和姿态偏差会被放大后反映到截割部,因此,自动截割过程中掘进机定位检测精度应达到厘米级,姿态和航向检测精度达到角分级才有可能实现《煤炭井巷工程质量验收规范》要求的断面成型精度。

掘进机自动导航技术从原理上可划分为 3 类:基于光电原理的导航技术;基于惯性元件的导航技术;多信息融合的导航技术^[3-6]。

基于光电原理的导航技术的基准信号传输介质包括激光(如点激光、线激光和全站仪等)、红外、可见光、机器视觉等^[7-8],导航系统分为 2 个部分,一部分作为检测和信号装置固定在巷道基准中,一部分作为信号发射装置配置在掘进机机身上随机身一起运动,或者反之^[9-11]。

光电导航装备技术成熟、成本低、精度高,是非煤行业常见的传感方式和导航定位技术,但在煤矿井下,存在环境适应性问题。近年来也有利用超宽带技术进行掘进机定位定向的研究,与传统电磁波定位方式相比,扩大了测量距离并提高了抗干扰能力^[12]。

惯性导航技术不依赖外部环境,具有较强的环境适应性。基于惯性导航的掘进机导航技术,国内 2007 年由重庆大学提出并进行了部分理论研究^[13]。近年来国内已有基于陀螺仪的技术用于巷道定向掘进的试验^[14-15]。国外,德国、澳大利亚相关研究机构在 20 世纪末即开始研究其用于煤矿井下移动装备的定位导航的可行性,并已有综采工作面上的应用报道。

惯性导航技术利用高精度陀螺仪可实现较高精度的方位和姿态检测,然而,其通过 2 次积分实现位移检测的原理导致当加速度检测有偏差时,运行时间越长,定位偏差越大,无外部辅助定位时惯性导航系统的定位偏差可达 1.852 km/h ,虽然通过零速校准等误差补偿技术,可以有效控制惯性导航系统长时间工作的误差积累,提高系统的精度^[16],但惯性导航系统的长时定位精度仍然难以满足厘米级定位精度要求。而机器视觉技术借助高分辨率的成像器

件可在一定距离范围内实现厘米级定位精度。这一特点表明惯性导航技术与视觉导航技术在掘进机导航定位方面存在互补性。

就目前技术现状而言,多信息多传感器融合的导航技术更有希望完美解决掘进机的导航定位问题,如惯性导航技术与机器视觉技术组合或其他方式的多信息多传感融合技术等^[14,17-20]。

为了与惯性导航技术的高精度方位姿态检测能力相结合,实现基于多信息融合的组合式掘进机导航定位,笔者提出基于四点式光靶的掘进机定位方法,利用机器视觉技术实现掘进机的自动定位,通过四点式光靶设计,简化并放大了光靶结构,提高了定位导航系统检测分辨率和精度,改善了其环境适应性。

1 四点式光靶设计

光靶是机器视觉导航定位方法中用于强化目标几何特征的装置。文献[7]中视觉导航利用视觉系统标定的思路,光靶各特征点分布在同一平面内且均匀分布,光靶平面朝向摄像机,考虑到掘进机从后端出料的影响,光靶只能布置在机身上部,而机身上部到巷道顶板之间空间极为有限,有时仅为 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$,因此光靶尺寸被限制在 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 内。

文献[21]的研究表明,掘进机机身偏转角改变引起光靶特征点对应图像之间的距离改变与特征点间距离的平方成正比,与光靶和摄像机之间距离的平方成反比,这反映了检测系统的灵敏度并决定检测系统的精度。

四点式光靶采用新的定位方法,允许组成光靶的 4 个特征光源设置在机身上表面 4 个角点,实现光靶分布范围最大化,与此同时抑制了多个特征光源集中在小范围时互相干扰的缺点,一定意义上改善了系统的环境适应性,此外,选择近红外光源作特征光源,单频特性抑制了背景光的影响,长波特性增强了粉尘穿透性^[21]。

2 成像几何模型和导航机理

基于四点式光靶的掘进机定位方法以激光指向仪的安装位置和指向为测量基准,借助摄影测量技术,完成目标自动识别、自动匹配和目标空间位置参数的自动解算,系统布置如图 1 所示,由激光视频导航仪、导航终端和靶标组成,其中,激光视频导航仪由指向激光和工业摄像机组成,通过指向激光确定导航仪的基准;导航终端由工业计算机组成,用于采

集导航仪的图像数据并进行分析和解算,同时显示实时导航参数;光靶由 4 个分别设置在掘进机机身上表面 4 个角的光源组成。摄影测量技术通过合理的成像模型、目标的先验信息及其图像特征完成目标识别和匹配及测量,测量精度除与环境有关外,主要取决于成像几何模型。

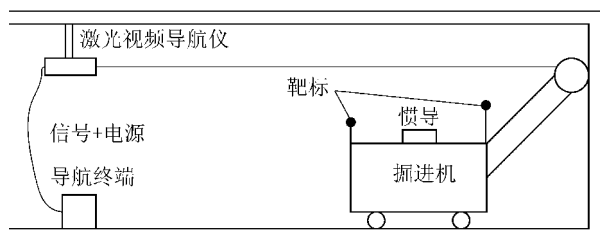


图 1 基于四点式光靶的掘进机定位方法系统布置示意

Fig.1 Schematic layout of positioning method of roadheader based on the four point light target

按照摄像机成像模型,当目标线段平行于摄像机成像器件时,其位置可以用相似三角形很容易计算得到。当目标线段不平行于摄像机成像器件即存在偏转却仍然用这一方法计算时,就必须考虑偏转引起的成像变形以及由此引起的解算误差。

假定机身处于水平或近水平状态,只存在偏航和横向偏移,事实上,对于掘进机来说通过控制铲板和后支撑做到机身基本水平是容易的,在组合式导航系统中,惯性导航系统可以实时检测机身的横滚角和俯仰角,用于判断掘进机是否水平。解算模型如图 2 所示,设 MN 为机身纵向轴线, A 、 B 、 C 、 D 分别表示其上表面 4 个特征点, A 、 B 关于 MN 对称, C 、 D 关于 MN 对称。

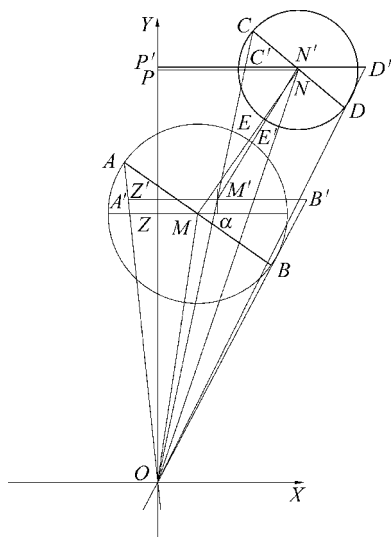


图 2 解算模型示意

Fig.2 Schematic diagram of solution model

建立摄像机坐标系,其中光轴定义为 Y 轴,假设与巷道指向方向一致(巷道方向由激光指向仪给定,激光指向与摄像机光轴方向固定并标定), X 轴水平且与其正交于原点 O 。则机身偏转角为 MN 与 Y 轴的夹角。定义 MN 的中点 E 的横坐标为机身的横向偏移距离。

按照光学成像原理,物点和像点及光心三点一线,此直线上任何一点对应同一像点,因此,当 A 、 A' 、 O 共线, B 、 B' 、 O 共线, C 、 C' 、 O 共线, D 、 D' 、 O 共线,且有长度 $l_{A'B'} = l_{AB}$, $l_{C'D'} = l_{CD}$, $A'B' \parallel OX$, $C'D' \parallel OX$ 时,目标 AB 等效于 $A'B'$,目标 CD 等效于 $C'D'$ 。

相应地, $A'B'$ 和 $C'D'$ 的中点 M' 和 N' 的连线 $M'N'$ 与 Y 轴的夹角 γ 成为等效偏转角,其中点 E' 成为掘进机的等效几何中心,其横坐标 E'_x 成为等效横向偏移量,由纵坐标可计算机身等效前进距离 E'_y ,高度方向的偏移量不受等效影响,因此不进行分析。四点法定位方法机理研究就是研究等效横向偏移量与实际横向偏移量之间的关系,等效(进尺方向)距离与实际距离之间的关系等。

设 MN 与巷道方向夹角(即偏转角)为 α ,则

$$E_x = l_{ZM} + \frac{l_{MN} \sin \alpha}{2} \quad (1)$$

$$E_y = l_{OZ} + \frac{l_{MN} \cos \alpha}{2} \quad (2)$$

$$E'_x = \frac{l_{P'N'} + l_{Z'M'}}{2} \quad (3)$$

$$E'_y = \frac{l_{OZ'} + l_{OP'}}{2} \quad (4)$$

等效偏转角

$$\gamma = \arctan \left(\frac{l_{P'N'} - l_{Z'M'}}{l_{OP'} - l_{OZ'}} \right) \quad (5)$$

式(3)、式(4)、式(5)构成基于四点式光靶的掘进机定位方法的计算模型。

3 摄像机成像模型仿真分析

摄像机参数及光靶结构尺寸给定后,影响解算模型的参数只有横向偏移量、光靶到摄像机的距离及光靶的偏转角等,为此,在 Matlab 软件中

对解算模型进行仿真以了解各参数对模型的影响程度。

设 $l_{MA}=0.9\text{ m}$, $l_{MB}=0.9\text{ m}$, $l_{NC}=0.8\text{ m}$, $l_{ND}=0.8\text{ m}$, $l_{MN}=1.15\text{ m}$, $l_{ZM}=0.01\text{ m}$, 距离 l_{OZ} 从 30 m 增加到 100 m 时, 给定偏转角 α 分别为 3° 、 6° 、 10° 、 12° 、 15° 所对应的横向偏移量偏差分布如图3所示(实际作业中掘进机机身偏转角一般小于 10°)。不同给定偏转角时进尺方向引起的偏差随靶标到摄像机之间距离增加的变化趋势如图4所示。

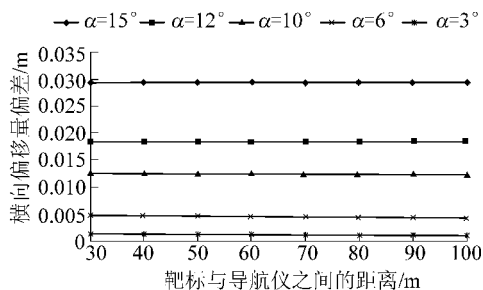


图3 横向偏移量偏差与距离的关系

Fig.3 Relationship between deviation of lateral offset and distance

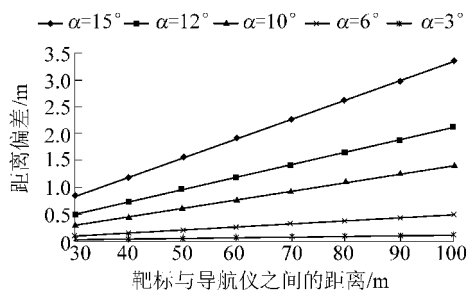


图4 距离偏差与距离的关系

Fig.4 Relation between distance deviation and distance

由图3和图4可知:

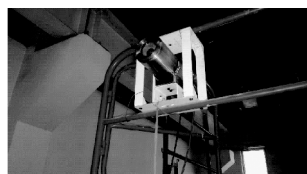
1) 偏转角小于 15° 时, 等效处理在 $30\sim 100\text{ m}$ 距离范围内对横向偏移的影响小于 0.03 m , 且对距离不敏感, 并且横向偏移量偏差随偏转角度 α 增大而增大。

2) 等效处理对靶标与导航仪之间距离的检测结果影响要明显得多, 不仅随二者间的距离增加而增加, 而且偏转角增大时, 这种影响更加明显; 需要说明的是, 仿真未包括摄像机成像部分, 因此距离范围可不设限, 但为了与试验数据对比, 根据试验装置参数设置了仿真距离范围。其中, 最小距离取决于光靶在摄像机视场中的分布范围, 与摄像机及光靶结构参数有关, 在机器视觉技术中,

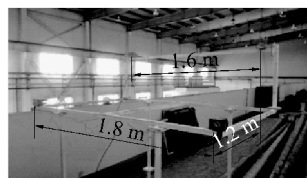
目标分布范围占图像幅面的 $1/2\sim 2/3$ 为佳, 对应距离 $28\sim 38\text{ m}$, 距离过小则光靶图像过大, 首先可能引起机身姿态改变时光靶超出摄像机视场的情况, 其次光靶图像进入图像传感器边缘区域后畸变增大导致检测精度下降; 最大距离则取决于验证所得精度和允许精度及能见度。从仿真结果看, 横偏偏差对距离不敏感, 仅受偏转角度影响; 距离偏差受距离和偏转角度的影响, 呈线性增长趋势, 因此从仿真结果可以预测仿真距离范围之外的偏差趋势。

4 掘进机自动定位试验及结果分析

为了验证基于四点式光靶的掘进机自动定位方法的检测精度, 搭建了试验装置如图5所示, 所用工业摄像机为大恒水星系列, 型号为 MER-125-30GM, 镜头焦距为 50 mm 。如图5b所示, 由4个近红外光源组成的光靶固定在模拟掘进机机身的特制台架上, 导航仪安置在光靶后方 $40\sim 100\text{ m}$ (实测为 $39.16\sim 94.22\text{ m}$) 处, 导航终端采集导航仪获取的光靶图像并进行分析, 分析算法按照第3节所述等效方式进行计算, 在上述范围内改变光靶与导航仪之间的相对位置, 记录导航终端显示的光靶空间位置检测结果。



(a) 导航仪



(b) 光靶

图5 掘进机自动定位试验装置

Fig.5 Test device of roadheader automatic positioning

采用全站仪检测光靶光源位置的方法计算光靶在全站仪坐标系中的位置和姿态, 全站仪通过与导航仪中的激光对准建立二者间的基准关系, 全站仪数据与激光视频导航系统测得的导航数据进行对比, 利用全站仪毫米级的测距和定位性能验证定位系统的性能。

试验中,在上述距离范围内不同距离处采集了四点法和全站仪关于横向偏移量、纵向偏移量和距离的检测数据,分别见表 1、表 2、表 3,表格中真值表示全站仪测得数据。

表 1 横向偏移量检测数据

Table 1 Detection datas of lateral offset m				
序号	距离真值	横向偏移真值	系统检测数据	偏差
1	94.224 9	1.542 5	1.48	0.062 5
2	88.239 4	1.200 0	1.17	0.030 0
3	81.841 6	0.961 9	0.95	0.011 9
4	75.970 6	1.227 9	1.21	0.017 9
5	70.077 1	0.840 2	0.82	0.020 2
6	62.002 5	0.937 2	0.92	0.017 2
7	39.156 3	0.268 3	0.27	-0.001 7

不同距离处横向偏移量、纵向偏移量和距离比对曲线如图 6 所示。

由上述试验数据可以看出,试验装置在设定距离范围内,横向偏移量、纵向偏移量、距离最大偏差分别为 0.063、0.025、1.065 m,总体上呈现距离越远,偏差越大,距离越近,偏差越小的趋势。

表 2 纵向偏移量检测数据

Table 2 Detection datas of vertical offset m				
序号	距离真值	纵向偏移真值	系统检测数据	偏差
1	94.224 9	1.325 6	1.314 8	0.010 8
2	88.239 4	1.331 0	1.314 8	0.016 2
3	81.841 6	1.333 6	1.324 8	0.008 8
4	75.970 6	1.329 9	1.304 8	0.025 1
5	70.077 1	1.338 6	1.324 8	0.013 8
6	62.002 5	1.331 3	1.314 8	0.016 5
7	39.156 3	1.323 6	1.311 2	0.012 4

注:纵向高度由系统检测结果即导航仪检测值与全站仪导航仪的高差相加得出,其中的高差利用全站仪测得。

表 3 距离检测数据

Table 3 Distance detection datas m			
序号	距离真值	系统检测数据	偏差
1	94.224 9	93.16	1.064 9
2	88.239 4	87.42	0.819 4
3	81.841 6	81.02	0.821 6
4	75.970 6	75.28	0.690 6
5	70.077 1	69.45	0.627 1
6	62.002 5	61.42	0.582 5
7	39.156 3	38.76	0.396 3

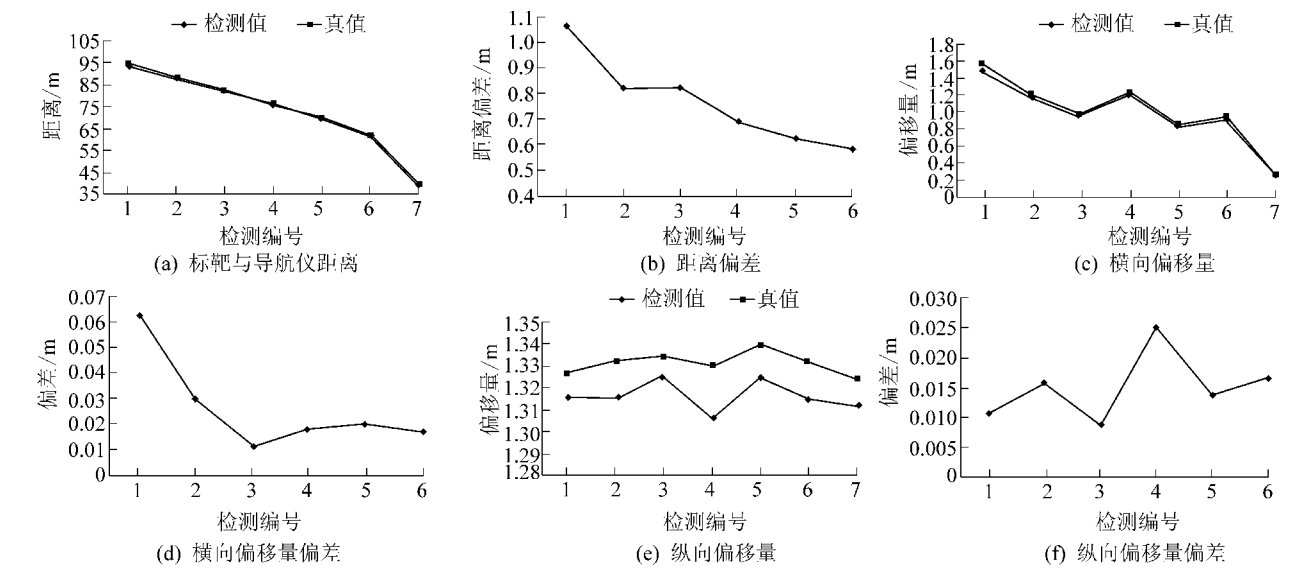


图 6 不同距离处横向偏移量、纵向偏移量和距离比对曲线

Fig.6 Curves of lateral offset, longitudinal offset and distance

5 结 语

1) 仿真结果表明本文模型在掘进机机身偏转角不超过 15°时对机身横向偏移量的估计精度较高,并且对距离不敏感,对距离的估计则受偏转角和

距离的影响,精度较差。

2) 试验结果表明在标靶与导航仪距离 39~94 m 范围内,巷道轴线法平面即巷道断面内最大定位偏差为 0.063 m,巷道进尺方向的距离检测最大偏差为 1.065 m,并且基本呈现距离越远,偏差越大,反之

则越小的规律,基本验证了仿真结论。

3)若只考虑巷道断面内的定位精度,基于四点式光靶的掘进机定位方法可以满足与惯性导航系统组合实现掘进机自动导航定位的精度要求。下一步将研究基于四点式光靶的掘进机定位系统的误差补偿方法,以实现包括进尺距离在内的掘进机三维高精度定位。

参考文献(References):

- [1] 王焱金,张建广,马 昭.综掘装备技术研究现状及发展趋势[J].煤炭科学技术,2015,43(11):87-90,21.
WANG Yanjin, ZHANG Jianguang, MA Zhao. Research status and development tendency of mine fully-mechanized heading equipment technology[J]. Journal of coal science and technology, 2015, 43(11): 87-90, 21
- [2] GB 50213—2010 煤炭井巷工程质量验收规范[S].
- [3] 田 原.悬臂式掘进机导航技术现状及其发展方向[J].工矿自动化,2017,43(8):37-43.
TIAN Yuan. Present situation and development direction of navigation technology of boom-type roadheader[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(8): 37-43.
- [4] 朱信平,李 睿,高 娟,等.基于全站仪的掘进机机身位姿参数测量方法[J].煤炭工程,2011(6):113-115.
ZHU Xinping, LI Rui, GAO Juan, et al. Position parameter measuring method of mine roadheader body base on total station[J]. Coal Engineering, 2011(6): 113-115.
- [5] 李军利,邢建华,廉自生,等.悬臂掘进机头位姿的测量系统及其方法:中国,CN101266134[P].2008-07-12.
- [6] 吴 森,刘建功,魏景生,等.掘进机机身位姿参数测量系统及其方法:中国,CN101629807[P].2010-04-09.
- [7] 田 原.基于机器视觉的掘进机空间位姿检测技术研究[J].矿山机械,2013,41(2):27-30.
TIAN Yuan. Research on automatic inspection of spatial attitude and position for roadheader based on machine vision technology[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(2): 27-30.
- [8] 杜雨馨,刘 停,童敏明,等.基于机器视觉的悬臂式掘进机机身位姿检测系统[J].煤炭学报,2016,41(11):2897-2906.
DU Yuxin, LIU Ting, TONG Minming, et al. Pose measurement system of boom-type roadheader based on machine vision[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2897-2906.
- [9] 陶云飞,宗 凯,张敏敏,等.基于iGPS的掘进机单站多点分时机身位姿测量方法[J].煤炭学报,2015,40(11):2611-2616.
TAO Yunfei, ZONG Kai, ZHANG Minjun, et al. A position and orientation measurement method of single-station, multipoint and time-sharing for roadheader body based on iGPS[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2611-2616.
- [10] 吴 森,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.
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.

- [11] 齐宏亮.掘进机器人位姿测控系统研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [12] 符世琛,李一鸣,杨健健,等.基于超宽带技术的掘进机自主定位定向方法研究[J].煤炭学报,2015,40(11):2603-2610.
FU Shichen, LI Yiming, YANG Jianjian, et al. Research on autonomous positioning and orientation method of roadheader based on Ultra Wide-Band technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2603-2610.
- [13] 冯大龙.捷联式惯导系统在无人掘进机中的应用[D].重庆:重庆大学,2007.
- [14] 黄 东,杨凌辉,罗 文,等.基于视觉/惯导的掘进机实时位姿测量方法研究[J].激光技术,2017(1):19-23.
HUANG Dong, YANG Linghui, LUO Wen, et al. Study on measurement method of real-time position and attitude of roadheader based on vision/inertial navigation system[J]. Laser Technology, 2017(1): 19-23.
- [15] 陶云飞,杨健健,李嘉庚,等.基于惯性导航技术的掘进机位姿测量系统研究[J].煤炭技术,2017,36(1):235-237.
TAO Yunfei, YANG Jianjian, LI Jiageng, et al. Research on the attitude measurement system based on inertial navigation technology[J]. Coal Technology, 2017, 36(1): 235-237.
- [16] 奔粤阳,孙 枫,高 伟,等.惯导系统的零速校正技术研究[J].系统仿真学报,2008(17):4639-4642.
BEN Yueyang, SUN Feng, GAO Wei, et al. Study of zero velocity update for inertial navigation[J]. Journal of System Simulation, 2008(17): 4639-4642.
- [17] JUSTIN M Barrett, MICHAEL A Gennert, WILLIAM R Michalson, et al. Development of a low-cost, self-contained, combined vision and inertial navigation system[C]. IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications, 2013
- [18] 童敏明,杜雨馨,李高军,等.多传感器的掘进机定位系统研究[J].煤矿机械,2013,34(6):146-148.
TONG Minming, DU Yuxin, LI Gaojun, et al. Study on positioning system of roadheader by multi-sensor[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(6): 146-148.
- [19] 张 涛.悬臂式掘进机定位方法研究[D].上海:复旦大学,2012.
- [20] 高 奔.悬臂式掘进机巷道位置及机身姿态检测方法[J].煤矿机电,2016(4):38-41.
GAO Ben. Roadway position and body attitude detection method of boom type tunneling machine[J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology, 2016(4): 38-41.
- [21] 田 原.基于机器视觉的空间位姿检测系统性能改进的研究[C]//第22届全国煤矿自动化与信息化学术会议暨第4届中国煤矿信息化与自动化高层论坛论文集.北京:中国煤炭学会煤矿自动化专业委员会,中国煤炭工业技术委员会信息与自动化专家委员会,2012.