

# 基于双激光标靶图像识别的掘进机位姿检测方法

周玲玲, 董海波, 杜雨馨

中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 针对煤矿井下巷道掘进机位姿的测量需求,采用双激光标靶的图像识别测量方式,构建了位姿实时检测系统。研究了激光标靶上光学特征点和特征光线的空间分布,提出一种基于双激光标靶的掘进机位姿解算方法。通过对图像数字处理得到精确的特征点、特征光线参数,实现对标靶参考点的精确定位,使用空间矩阵变换方法,解算出掘进机位姿参数。在实验室条件下建立机身位姿自动检测实验平台,模拟环境下的测试结果表明,在测量范围小于40 m时,位移误差小于2 mm,角度误差小于 $0.5^\circ$ 。该系统测量精度高,结构简单可靠,实时性强,能够很好地满足测量需求,实现对掘进机在煤矿井下掘进过程中的位姿检测。

**关键词** 测量; 位姿检测; 双激光标靶; 图像识别; 掘进机

中图分类号 TH741 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.041205

## Method of Roadheader Position Detection Based on Image Recognition of Double Laser Targets

Zhou Lingling, Dong Haibo, Du Yuxin

School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

**Abstract** To measure the roadheader position in coal mine, a real-time detection system of roadheader position is constructed, which uses the image recognition measurement method based on double laser targets. The spatial distributions of optical feature points and feature light on the laser target are researched, and the calculation method of roadheader position based on double laser targets is presented. With digital image processing technology, the accurate parameters of feature points and feature light are obtained, thus the precise localization of reference points on target is realized. Then, the space matrix transformation method is used to calculate the roadheader position parameters. In the simulation test, an automatic test platform of body position is established. The experimental results show that when the measurement range is less than 40 m, the system displacement error is less than 2 mm, and the angle error is less than  $0.5^\circ$ . The measure system has such advantages as high accuracy, simple and reliable structure, and good real-time performance. Therefore, it can meet the measurement requirements well, and achieve the position monitoring of roadheader in the tunneling process in the mine.

**Key words** measurement; pose detection; double laser targets; image recognition; roadheader

**OCIS codes** 120.2830; 120.6650; 140.3460

## 1 引言

目前煤矿开采深度在不断增加,部分煤矿的开采深度已突破1000 m,深层煤层开采危险系数大,因此综掘工作面无人化技术的研究极为重要<sup>[1]</sup>。综掘工作面是煤矿井下地质条件最危险、环境最恶劣、条件最艰苦、工况最复杂的生产地点之一。实现综掘工作面的无人化,切实降低综掘施工人员的劳动强度,保障施工人员人身安全,提高综掘工作面环境舒适度,是未来我国矿井生产的必然要求。悬臂式掘进机姿态自动检测

收稿日期: 2016-11-08; 收到修改稿日期: 2016-12-13

作者简介: 周玲玲(1992—),女,硕士研究生,主要从事检测技术与自动化装置方面的研究。E-mail: 122015274@qq.com

导师简介: 董海波(1973—),男,博士,副教授,主要从事检测技术与自动化装置、电气安全与保护方面的研究。

E-mail: cumtdhb@163.com

技术是实现综掘工作面无人化技术的核心,具有重大研究意义<sup>[2]</sup>。

现有的一些掘进机位姿测量方法存在一定的不足。全自动掘进机<sup>[3]</sup>采用的是远程控制的方式,通过采用航天导航定位仪,实时检测掘进机在惯性空间的绝对位置坐标,实时控制掘进机和截割头位置;该方案理论上可行,但由于航天仪器的精密性,易受煤巷井下恶劣环境的影响,具体实施有一定的困难,井下实施不具有实用性。悬臂式掘进机机身与截割头位姿检测方法<sup>[4]</sup>中提出采用线状激光器发射扇形激光光束,通过两路光敏元件感应掘进机机身的线性光斑,再通过检测光斑位置,结合已知的光敏元件与掘进机姿态与该设计轴线方向间的关系来实现掘进机位姿检测;但是采用基准为扇形的激光光束,限制了工作距离,需要频繁调整基准光束位置;另外在测量距离较远时,光敏器件接收的光线强度不足容易导致失灵。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。双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统<sup>[5]</sup>具有精度高、抗噪声能力强的优点,但是其结构复杂。

本文提出一种基于双激光标靶图像识别的掘进机位姿检测方法。在已成型巷道内安装激光发射器,激光发射器发射十字形激光照射到激光标靶上面。通过对标靶上的激光图像进行数字处理,得到十字激光在标靶上的特征点和特征光线参数,将其代入位姿解算模型,从而得到掘进机的位姿状态参数。与现有的方法相比,该方法具有结构简单可靠、实时性强、测量精度高等优点。

## 2 掘进机位姿测量系统结构

为实现对巷道中的掘进机位姿的检测,将指向激光与数字摄像机相结合,利用指向激光在标靶上的图像特征变化,构建立体模型,获得掘进机的各项位姿参数。

双激光标靶掘进机位姿测量系统主要由激光指向仪、激光标靶、摄像机、数字图像处理设备等构成,系统安装示意图如图 1 所示。两组的激光标靶和摄像机分别固定在掘进机机身的上表面,标靶 1 固定于掘进机机首的左侧,标靶 2 固定于机尾的右侧,两个激光标靶处于同一水平面,左右间距记为  $C_x$ ,前后间距记为  $C_z$ 。两台激光指向仪均采用十字激光,将激光指向仪固定在巷道中。十字激光与巷道掘进指向激光(一般为点状光源)平行,两台十字激光分别照射在激光标靶 1、2 的前面。在安装激光发射器和激光标靶的时候需要注意,初始时刻,十字激光线需要和对应标靶上水平中心线和垂直中心线重合,为防止阻挡光线,摄像机安装在标靶正后方,根据激光标靶的大小来决定其安装的位置和高度,要保证摄像机能够拍到激光标靶的整体。激光标靶采用半透光材料,这样进入摄像机的光线强度适中,利于产生较好的激光图像。通过处理拍摄的两组数字图像,建立求解模型,即可得到掘进机的位姿参数信息。

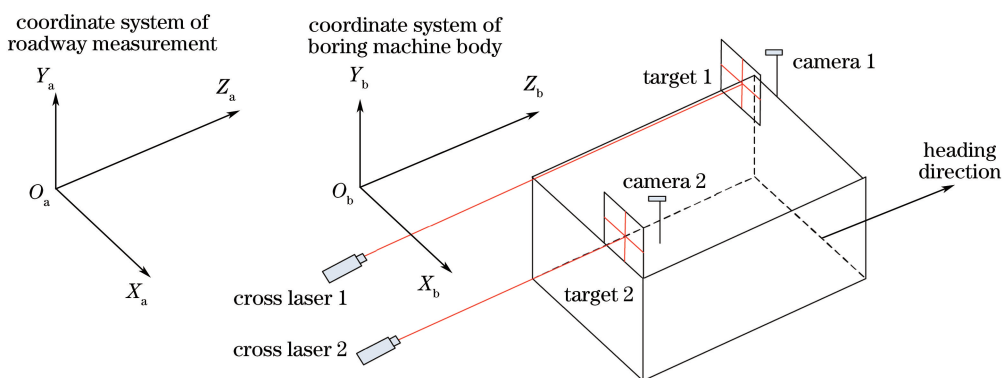


图 1 双激光标靶掘进机位姿检测系统安装示意图

Fig. 1 Installation schematic of roadheader posture monitoring system based on double laser targets

## 3 激光标靶的图像处理

在视觉测量中,特征点的精确定位直接决定视觉测量系统的精确度<sup>[6]</sup>。由于矿井巷道中照明条件较差,摄像机拍摄的图片清晰度较低,因此在设计系统时合理设计特征点和激光标靶的颜色,以得到高对比度的数字图像。在数字图像处理过程中,采用不同的特征点提取算法,精确度和效率各有不同。特征点提取的方法

主要有两种:一种是基于模板匹配的方法,另一种是基于几何特征的探测方法。模板匹配方法计算耗时长,为确保掘进机位姿检测的实时性,本设计采用基于几何特征的特征点提取算法,依据数字图像的边界曲率进行提取,即边缘检测。

在设计掘进机位姿检测系统中,激光标靶采用白色半透明的材料,激光标靶上规则分布着6个圆形黑色特征点,如图2所示,激光采用红色可见光,摄像机获取到高对比度的数字图像,目标特征点与背景之间存在边缘,所以采用基于几何特征的特征点提取算法中边缘检测的方法来提取特征点。本研究采用基于梯度的区域生长和距离直方图的快速圆检测方法求解特征点的圆心和半径距离<sup>[6]</sup>。边缘检测的方法有多种,根据矿井下灰尘多的特点,本研究采用改进的Canny算法<sup>[7]</sup>。与常见的Sobel算法、Prewitt算法、LoG算法相比较,文献<sup>[7]</sup>提出的改进的Canny算法在噪声环境中边缘检测效果更优,该算法将非边缘点判断为边缘点的概率低,同样将边缘判断为非边缘的概率也低;定位性能强,检测出来的边缘点和实际边缘点偏差小;对单个边缘仅有唯一的响应,虚假边缘响应得到最大抑制。通过边缘检测,得到特征点的边界,通过算法处理得到圆形边界的中心点坐标,定位到特征点坐标信息。

由于摄像机镜头的光学畸变、像主点偏移及镜像曲率的不同,摄像机拍摄到的数字图像存在桶形畸变,畸变情况如图2(a)所示。通过图像上的特征点的坐标信息计算畸变校正的参数,校正后的数字图像如图2(b)所示。

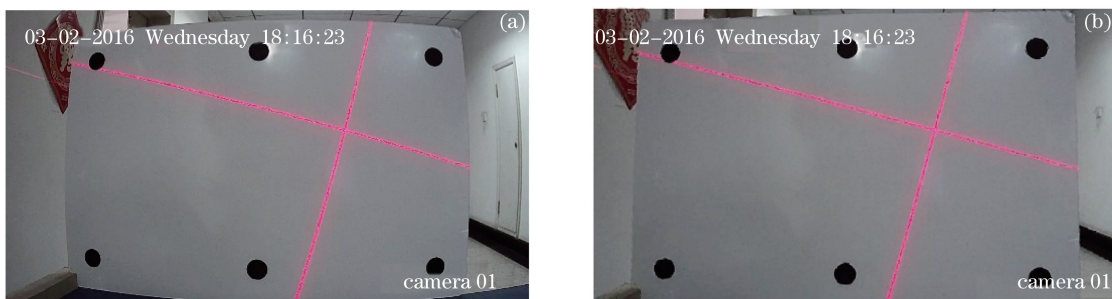


图2 数字图像畸变校正。(a)畸变校正前;(b)畸变校正后

Fig. 2 Distortion correction of digital image. (a) Before distortion correction; (b) after distortion correction

为获取数字图像上的有用位置信息,需要对整个数字图像进行进一步的预处理。首先,对矫正的图像进行截图,如图3(a)所示,再进行灰度化处理,如图3(b)所示。其次进行二值化处理,比较多组图片的不同阈值,当阈值取0.35时,二值化效果最佳,结果如图3(c)所示。十字激光指向仪远距离照射在激光标靶上面,存在一定的光散射,为准确获取特征光线的位置,对二值化后的图像进行膨胀和腐蚀运算。对数字图像进行膨胀和腐蚀运算能很好地区分特征光线的边缘,同时能很好地滤除图形二值化处理产生的噪声,本研究采用开闭操作,构造方形结构元,取值为5,结果如图3(d)所示。然后,采用改进的Canny算法<sup>[7]</sup>得到边缘信息,自适应平滑

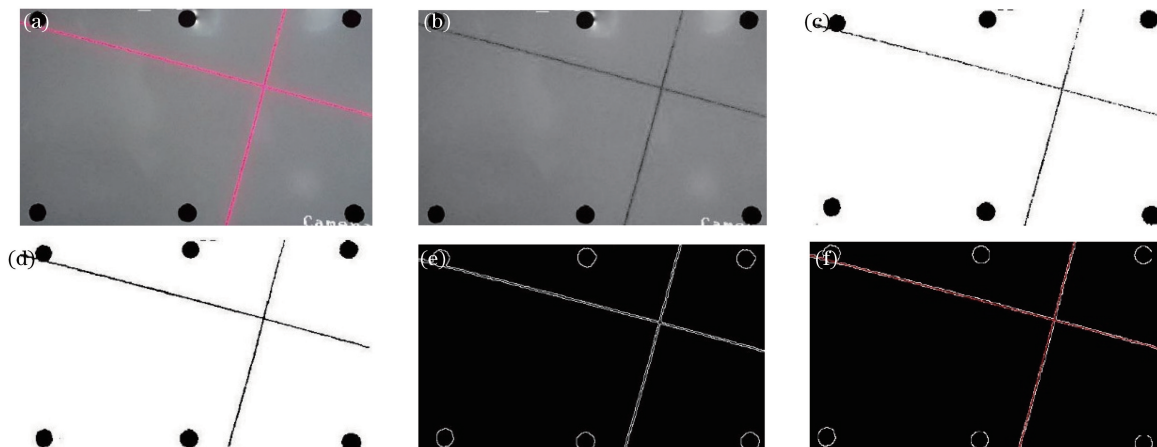


图3 图像处理过程。(a)截图;(b)灰度;(c)二值化;(d)腐蚀膨胀;(e)边缘检测;(f)Hough变换

Fig. 3 Image processing. (a) Capture image; (b) gray level; (c) binary; (d) corrosion and expansion; (e) edge detection; (f) Hough transform

滤波参数  $k$  取 10, 迭代次数取 5, 梯度幅值非极大值抑制采用水平、垂直、 $45^\circ$ 、 $135^\circ$  4 个方向上一阶梯度分量抑制, 低阈值取 0.05, 高阈值取 0.9, 如图 3(e) 所示。再经过 Hough 一维变换处理得到如图 3(f) 所示的红色十字特征线<sup>[8]</sup>, 最终得到的为两条相交直线  $l_1$  与  $l_2$ , 其极坐标形式的方程分别表示为  $\rho_1 = x \cos \theta_1 + y \sin \theta_1$  和  $\rho_2 = x \cos \theta_2 + y \sin \theta_2$ 。

## 4 空间坐标系与掘进机位姿的定义

为方便确定掘进机机身与施工巷道之间的相对位姿关系, 在位姿检测中需要分别对巷道和掘进机机身建立坐标系<sup>[8-10]</sup>。将掘进机看作刚体机械结构, 这样便可利用变换矩阵来表示位姿关系。如图 1 所示, 在双激光靶掘进机位姿测量系统中主要涉及两个坐标系, 巷道测量坐标系 ( $O_a X_a Y_a Z_a$ ) 和掘进机车体坐标系 ( $O_b X_b Y_b Z_b$ )。巷道坐标系取决于具体的掘进路线, 其中,  $O_a Z_a$  轴为激光指向仪指向的方向, 即掘进方向;  $O_a X_a$  轴垂直于掘进航向, 水平向右;  $O_a Y_a$  轴垂直于  $O_a X_a Z_a$  平面向上;  $O_a$  根据实际掘进巷道和掘进机尺寸综合确定, 选择在掘进机机身上平面高度位置且距离巷道两侧巷壁等距离处。掘进机车体坐标系的  $O_b Z_b$  指向掘进机的掘进方向;  $O_b X_b$  轴指向掘进机横轴, 方向向右;  $O_b Y_b$  轴垂直于  $O_b X_b Z_b$  平面向上。初始时刻, 巷道测量坐标系和掘进机机身坐标系重合。

需要检测的掘进机位姿参数包括: 掘进机机首横/纵向偏移 ( $\Delta X_1$ 、 $\Delta Y_1$ )、机尾横/纵向偏移 ( $\Delta X_2$ 、 $\Delta Y_2$ )、机身偏向角  $\alpha$ 、机身俯仰角  $\beta$  和机身横滚角  $\gamma$ , 如图 4 所示。掘进机位姿实际上就是车体坐标系  $O_b X_b Y_b Z_b$  对巷道测量坐标系  $O_a X_a Y_a Z_a$  的变换, 通过图像信息处理、坐标系转换等方法, 实现对掘进机位姿的检测。在这些基本参量中, 掘进机机首/尾横向偏移  $\Delta X_1$ 、 $\Delta X_2$  和偏向角  $\alpha$  用于判断悬臂式掘进机是否偏离设计巷道中线; 掘进机机首/尾纵向偏移  $\Delta Y_1$ 、 $\Delta Y_2$  和俯仰角  $\beta$  用于判断掘进机是否上下倾斜 (造成切顶或者切底); 横滚角  $\gamma$  用于判断截面是否合格。因此, 通过检测上述参数的变化即可完全反映出掘进机在巷道中的各种姿态。

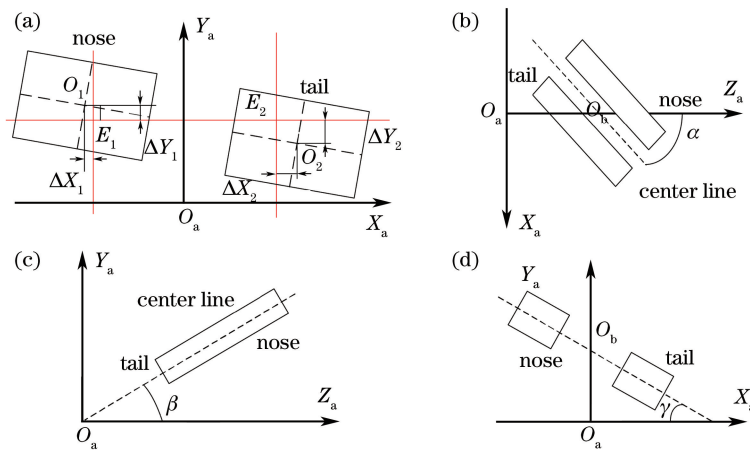


图 4 掘进机 4 种姿态。(a) 机首/尾的横/纵向偏移; (b) 机身偏向角  $\alpha$ ; (c) 机身俯仰角  $\beta$ ; (d) 机身横滚角  $\gamma$

Fig. 4 Four postures of tunnel boring machine. (a) Horizontal/vertical offset of nose/tail; (b) deviation angle  $\alpha$  of body; (c) pitch angle  $\beta$  of body; (d) roll angle  $\gamma$  of body

## 5 掘进机位姿解算方法

以机身坐标系为参考, 设定激光靶的初始几何参数 (单位为 mm) 如下: 两个激光靶的  $X$  轴中心距离记为  $C_x$ ,  $Y$  轴中心距离记为  $C_y$ , 实际  $C_y = 0$ ,  $Z$  轴距离记为  $C_z$ 。十字激光在靶 1、2 上各形成 5 个特征点, 分别标记为  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $E_1$  和  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 、 $D_2$ 、 $E_2$ , 两个靶的几何中心分别标为  $O_1$ 、 $O_2$ , 如图 5 所示。初始时刻, 十字激光中心  $E_1$ 、 $E_2$  与靶几何中心  $O_1$ 、 $O_2$  重合。当掘进机发生偏移时, 激光靶的几何中心相对激光十字中心发生偏离。为简化位姿解算, 将靶 2 沿  $O_b X_b$  轴向左平移  $C_x$ , 到达靶  $2'$  位置, 其激光特征点标记为  $A_2'$ 、 $B_2'$ 、 $C_2'$ 、 $D_2'$ 、 $E_2'$ 。将掘进机位姿参数的变化等效为单个十字激光在两个平行靶面 (靶 1 和靶  $2'$ ) 上投

影参数的变化,此时,掘进机机身的各向偏差可以等效为直线  $E_1E_2'$  相对直线  $O_1O_2'$  发生的偏差。将两个十字激光器产生的重叠水平面  $A_1C_1C_2'A_2'$  记为面  $\alpha$ ,左十字激光竖直面  $B_1D_1D_2'B_2'$  记为面  $\beta$ ,由图 5 可知,直线  $E_1E_2'$  的指向即为激光指向仪指向的方向  $O_aZ_a$  轴向,其方向可由  $\alpha, \beta$  两个平面的法向量共同确定。

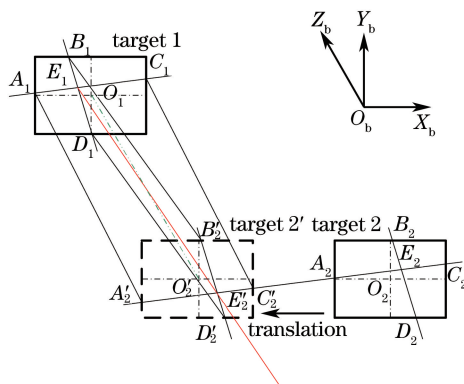


图 5 基于双视觉的前后激光标靶相对位姿解算立体模型

Fig. 5 Three dimensional model of front and back laser targets based on double visions to obtain relative position and orientation

首先以标靶 1 为例,根据图 3(f)得到的两条相交直线  $l_1$  与  $l_2$  的极坐标方程,直线  $l_1$  与  $l_2$  分别和激光标靶四边相交,确定十字线在标靶上的特征点  $A_1, B_1, C_1, D_1$  坐标,直线  $l_1$  与  $l_2$  的交点确定为特征点  $E_1$ ,这些特征点的图像坐标依次表示为  $(x_{1,i}, y_{1,i})$ ,  $(i=1,2,3,4,5)$ 。设标靶尺寸为  $l$ , 高为  $h$ , 可推算出 5 个点  $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1$  在机身坐标系下的坐标

$$(X_{1,i} \ Y_{1,i} \ Z_{1,i}) = \left( \frac{x_{1,i}}{\max(x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, x_{1,4}, x_{1,5})} l \quad \frac{y_{1,i}}{\max(y_{1,1}, y_{1,2}, y_{1,3}, y_{1,4}, y_{1,5})} h \quad C_z \right), \quad (1)$$

$(i=1,2,3,4,5)$ 。

同理可计算标靶 2 上 5 个点  $A_2, B_2, C_2, D_2, E_2$  在机身坐标系下的坐标

$$(X_{2,i} \ Y_{2,i} \ Z_{2,i}) = \left( \frac{x_{2,i}}{\max(x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}, x_{2,4}, x_{2,5})} l \quad \frac{y_{2,i}}{\max(y_{2,1}, y_{2,2}, y_{2,3}, y_{2,4}, y_{2,5})} h \quad 0 \right), \quad (2)$$

$(i=1,2,3,4,5)$ 。

平移后的标靶 2' 上  $A_2', B_2', C_2', D_2'$  点在机身坐标系下的坐标如下:

$$\begin{pmatrix} X'_{2,1} & Y'_{2,1} & Z'_{2,1} \\ X'_{2,2} & Y'_{2,2} & Z'_{2,2} \\ X'_{2,3} & Y'_{2,3} & Z'_{2,3} \\ X'_{2,4} & Y'_{2,4} & Z'_{2,4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} + \tan \theta_{2,1} \cdot C_x & 0 \\ X_{2,2} & Y_{2,2} & 0 \\ X_{2,3} & Y_{2,3} + \tan \theta_{2,1} \cdot C_x & 0 \\ X_{2,4} & Y_{2,4} & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

点  $E_2'$  为直线  $A_2'C_2'$  与  $B_2'D_2'$  的交点,利用两直线方程容易计算出该交点坐标。

根据两个标靶上共 10 个点的坐标,可得到平面  $\alpha, \beta$  在坐标系  $O_b X_b Y_b Z_b$  下的法向量  $\mathbf{N}_y, \mathbf{N}_x$ ,  $O_a Z_a$  轴向即为  $\mathbf{N}_y \times \mathbf{N}_x$  (表示为  $\mathbf{N}_z$ )。所得到的  $\mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y, \mathbf{N}_z$  分别平行于巷道坐标系中的  $X_a, Y_a, Z_a$  三轴,为得到  $O_a X_a Y_a Z_a$  坐标系中机身的方向向量,需进行坐标转换,示意图如图 6 所示。

先将法向量矩阵  $(\mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y, \mathbf{N}_z)^T$  与转换矩阵  $\mathbf{R}$  相乘转换为单位矩阵,即掘进机坐标系三个轴的单位向量:  $\mathbf{N} \cdot \mathbf{R} = \mathbf{E}$ 。而在  $O_b X_b Y_b Z_b$  坐标系下轴向量  $\mathbf{X}_b, \mathbf{Y}_b, \mathbf{Z}_b$  同为单位矩阵  $\mathbf{E}$ , 其与转换矩阵  $\mathbf{R}$  相乘得到的矩阵  $\mathbf{M} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{R}$ , 即为巷道坐标系  $O_a X_a Y_a Z_a$  下的机身位姿,  $\mathbf{M} = \mathbf{N}^{-1}$ 。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} X'_{X_b} & Y'_{X_b} & Z'_{X_b} \\ X'_{Y_b} & Y'_{Y_b} & Z'_{Y_b} \\ X'_{Z_b} & Y'_{Z_b} & Z'_{Z_b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{N_x} & Y_{N_x} & Z_{N_x} \\ X_{N_y} & Y_{N_y} & Z_{N_y} \\ X_{N_z} & Y_{N_z} & Z_{N_z} \end{pmatrix}^{-1}. \quad (4)$$

由图 6 可知,机身旋转角即偏向角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  与横滚角  $\gamma$  分别为

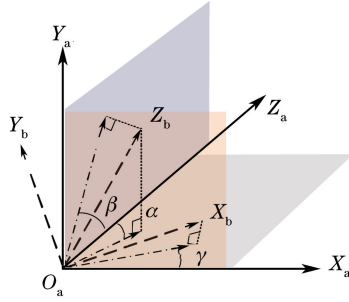


图6 坐标转换与机身旋转角示意图

Fig. 6 Schematic diagram of coordinate transformation and rotation angle of body

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan(X'_{Z_b}/Z'_{Z_b}) \\ \arctan(Y'_{Z_b}/Z'_{Z_b}) \\ \arctan(Y'_{X_b}/X'_{X_b}) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

在完成机身偏向角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  与横滚角  $\gamma$  的计算后,根据机身坐标系下的两个激光靶像中心点  $E_1$  和  $E'_2$  的坐标进行旋转变换,可得其在巷道坐标系  $O_a X_a Y_a Z_a$  下的坐标:

$$\begin{pmatrix} X'_{E_1} & Y'_{E_1} & Z'_{E_1} & 1 \\ X'_{E'_2} & Y'_{E'_2} & Z'_{E'_2} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{E_1} & Y_{E_1} & Z_{E_1} & 1 \\ X_{E'_2} & Y_{E'_2} & Z_{E'_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot T_\alpha \cdot T_\beta \cdot T_\gamma, \quad (6)$$

$$\text{式中 } T_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

则机首横/纵向偏移( $\Delta X_1$ 、 $\Delta Y_1$ )、机尾横/纵向偏移( $\Delta X_2$ 、 $\Delta Y_2$ )分别为

$$\begin{cases} \Delta X_1 = X'_{E_1} - X_{O_1}, \Delta Y_1 = Y'_{E_1} - Y_{O_1} \\ \Delta X_2 = X'_{E'_2} - X_{O_1}, \Delta Y_2 = Y'_{E'_2} - Y_{O_1} \end{cases}. \quad (7)$$

## 6 测量实验结果与分析

参照图1所示双激光靶掘进机位姿检测系统安装示意图,搭建实验平台,模拟掘进机机身在巷道内的不同位姿,对整个检测系统进行了测试与验证,分别在不同位置处对处于不同姿态的机身进行姿态检测,实验结果如表1所示。为验证检测结果的正确性,使用倾角传感器测得的测试平台静止时的三轴角度以及人工测量的位置偏移作为真实值与本系统解算出的位姿参数对照。因篇幅原因,此处只列出10组数据。

表1 实验测量数据与真实值对比

Table 1 Comparison of experimental data and actual data

No.	Experimental data							Actual data						
	$\alpha /$ ( $^\circ$ )	$\beta /$ ( $^\circ$ )	$\gamma /$ ( $^\circ$ )	$\Delta X_1 /$ mm	$\Delta Y_1 /$ mm	$\Delta X_2 /$ mm	$\Delta Y_2 /$ mm	$\alpha /$ ( $^\circ$ )	$\beta /$ ( $^\circ$ )	$\gamma /$ ( $^\circ$ )	$\Delta X_1 /$ mm	$\Delta Y_1 /$ mm	$\Delta X_2 /$ mm	$\Delta Y_2 /$ mm
1	10.54	-15.13	-7.62	-62	-86	21	6	10.51	-15.27	-7.56	-63	-87	20	-5
2	26.31	-5.46	21.28	-74	19	376	-24	27.63	-5.69	20.82	-75	20	375	-25
3	-3.92	17.88	13.64	-300	-91	-345	99	-4.33	17.91	13.37	300	-90	-344	100
4	10.62	18.07	-7.16	-68	47	23	-30	10.24	18.42	-7.72	-67	45	22	-29
5	-7.76	12.55	3.64	402	-174	-432	261	-7.63	12.36	3.77	400	-172	-431	262
6	-15.34	16.23	7.45	367	220	-384	164	-15.71	16.14	7.79	368	221	-384	163
7	15.09	9.01	-23.62	10	9	28	17	15.31	8.94	-23.35	9	10	29	15
8	-7.92	2.68	28.87	310	-104	-550	316	-7.99	2.42	28.63	309	-103	-549	315
9	-29.87	2.32	-8.24	238	6	-145	231	-29.45	2.41	-7.88	237	7	-144	232
10	16.72	-9.09	-15.89	-100	104	-206	-319	16.29	-8.80	-15.78	-100	106	-205	-317

根据图 1 搭建的模拟平台对上述方法进行了验证测试,受标靶尺寸限制,倾角的测量范围为±标靶尺寸,机身前进距离的测量范围在 2~100 m。在静态验证条件下分别将 7 个参数的真实值与测量值作对比,结果表明,当测量范围小于 40 m 时,系统位移误差小于 2 mm,角度误差小于 0.5°,满足系统位姿检测的精度要求。本掘进机位姿检测方法的实时性在 0.1 s 范围内,满足掘进机施工过程中的实时性要求。

## 7 结 论

针对煤矿井下无人化巷道掘进系统对悬臂式掘进机位姿的测量需求,采用双激光标靶图像识别的测量方式,构建了掘进机位姿检测系统。研究了光学特征点和特征光线在空间标靶上的图像识别技术,提出基于双激光标靶图像识别的掘进机位姿解算方法。在模拟测试环境下的结果表明,系统检测精度高,实时性强,能够很好地满足测量需求,实现煤矿井下掘进机施工过程中的位姿测量。

## 参 考 文 献

- [1] 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.  
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.
- [2] Li Rui. Research on an automatic detection system for the position and orientation parameters of boom-type road header body[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2012: 41-48.  
李 睿. 悬臂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.
- [3] Li Tiening, Li Wanpeng, Xu Wei, *et al.* Application of space navigation and positioning system in automatic boring machine[J]. Coal Mining Machinery, 2010, 31(8): 33-60.  
李铁宁, 李万鹏, 徐 伟, 等. 航天导航定位仪在全自动掘进机上的应用[J]. 煤矿机械, 2010, 31(8): 33-60.
- [4] Wu Sen, Zhang Minjun, Jia Wenhao, *et al.* A body of roadheader cutting head and position detection method: China. CN 104776843 A[P]. 2015-07-15.  
吴 森, 张敏骏, 贾文浩, 等. 一种悬臂式掘进机机身与切割头位姿检测方法: 中国. CN 104776843 A[P]. 2015-07-15.
- [5] Yang Wenhui, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.* Double shield hard rock tunnel boring machine position measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112005.  
杨文辉, 林嘉睿, 高 扬, 等. 双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112005.
- [6] Cai Jia, Huang Panfeng, Zhang Bin. Fast circle detector based on region-growing of gradient and histogram of euclidean distance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0315001.  
蔡 佳, 黄攀峰, 张 彬. 基于梯度的区域生长和距离直方图的快速圆检测方法[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0315001.
- [7] Xu Hongke, Qin Yanyan, Chen Huiru. An improved edge detection algorithm based on Canny [J]. Infrared Technology, 2014, 36(3): 44-75.  
许宏科, 秦严严, 陈会茹. 一种基于改进 Canny 的边缘检测算法[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 44-75.
- [8] Wang Hui, Xu Zhuo. Position detection and localization of the tunneling robot[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(3): 57-60.  
王 慧, 许 琢. 掘进机器人的位姿检测与机体定位[J]. 制造业自动化, 2013, 35(3): 57-60.
- [9] Tian Jie, Wang Suyu, Mu Jing, *et al.* Spatial pose kinematics model and simulation of boom-type roadheader[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2617-2622.  
田 劫, 王苏戡, 穆 晶, 等. 悬臂式掘进机空间位姿的运动学模型与仿真[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2617-2622.
- [10] Dai Yingjie, Wang Wei, Deng Shijie, *et al.* Position and posture measurement of dynamic target based on stereo machine vision[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 188-212.  
歹英杰, 汪 伟, 邓士杰, 等. 基于立体机器视觉的动目标空间位姿测试研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 188-212.