

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311309

基于双线激光基准的盾尾间隙测量方法研究

黄喆¹, 王浩森¹, 胡成军², 杜文阳³, 赵旭晔³

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院 天津 300202; 2. 中国矿业大学(北京) 北京 100083;
3. 中煤科工集团智能矿山有限公司 太原 030000)

摘要:针对现有众多盾尾间隙自动测量方法中普遍存在的精度低和可靠性差等问题,提出了一种基于双线激光基准标尺的视觉测量新方法。通过两道平行布设的窄线形激光构建观测基准,利用传统图像处理技术捕获盾壳与管片的关键特征,结合标尺反算误差补偿技术,实现在盾构掘进过程中盾尾间隙测量值的高精度实时解算。现场实验表明,本文所提出的方法的重复性测量精度优于1.2 mm,绝对测量精度优于2 mm,测量误差小于1.5 mm,该方法可以实现盾尾间隙自动化实时精确测量且具备较高的可靠性,现已应用在我国多个地铁隧道施工现场。

关键词: 盾尾间隙;视觉测量;误差仿真;标定

中图分类号: TH2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research on the measurement method of shield tail clearance based on double line laser datum

Huang Zhe¹, Wang Haosen¹, Hu Chengjun², Du Wenyang³, Zhao Xuyue³

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300202, China;
2. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Middling Coal Technology and Engineering Group Intelligent Mine Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: To address the problems of low accuracy and poor reliability in many existing automatic measurement methods of shield tail clearance, a new visual measurement method based on double line laser reference ruler is proposed in this article. The observation datum is constructed by two parallel narrow linear lasers, and the key features of shield shell and segment are captured by traditional image processing technology. Combined with the ruler back calculation error compensation technology, the high-precision real-time calculation of the measured value of shield tail clearance during shield tunneling is realized. Field experiments show that the repeatability measurement accuracy of the proposed method is better than 1.2 mm, the absolute measurement accuracy is better than 2 mm, and the measurement error is less than 1.5 mm. This method can realize the automatic real-time accurate measurement of shield tail clearance and has high reliability. It has been applied in many subway tunnel construction sites in China.

Keywords: tail shield gap; visual measurement; error simulation; calibration

0 引言

盾尾间隙是盾构施工时管片与盾壳之间的间隙,是盾构掘进过程中需要实时精确测量的关键技术参数,盾尾间隙值对于控制盾构机姿态,减缓盾尾刷磨损,规避管片损坏等至关重要^[1]。目前盾尾间隙大多采用人工手持

钢尺测量的方式,这种方式受人为因素影响大、自动化水平低,实时性差,数据严重滞后,难以反映盾尾间隙的实时变化规律^[2]。

许多专家学者对盾尾间隙测量方法进行了研究,郭京波等^[3]提出了基于数字图像处理技术的盾尾间隙测量方法,结合物理距离与像素距离的比例关系分别计算激光光斑至管片内沿和盾壳内壁的距离,利用盾尾间隙的

空间结构计算盾尾间隙长度,由于所使用的激光斑点都打在管片上,无法清晰分割管片与盾壳边界,对测量结果造成一定影响。孙连等^[4]提出了盾尾间隙检测仪盾尾间隙测量方法,通过步进电机驱动器控制旋转台的旋转,读取激光测距仪的测距结果计算盾尾间隙,该测量方式测量结果误差近1 cm,精度不高。路亚缙等^[5]提出预先在盾尾上留孔,将超声波设备嵌入到盾壳中进行盾尾间隙测量,该方法需要在盾尾和管片之间留出一定的空间以放置超声波传感器,因此需要盾构机厂家生产时特别定制相应的盾壳。王宁等^[6]提出了机械式盾尾间隙测量方法,滑块与管片外表面和盾壳内表面相连接,上位机控制旋转角度编码器测量转动角进而计算盾尾间隙,频繁使用时会对管片和盾壳造成一定磨损。王延年等^[7]设计了一种接触式测量盾尾间隙方法,控制箱操控机械臂接触盾壳内壁和管片内表面,上位机通过采集转动角度计算盾尾间隙,相比直接测量精度较高,由于测量装置安装在盾尾千斤顶靴板上,因此需要对盾构机进行改装加固。

基于上述研究,提出一种基于双线激光基准的盾构机盾尾间隙测量方法,能够实现非接触式盾尾间隙实时自动化测量,解决了现有盾尾间隙实时测量精度不高的问题,同时伴随有安装误差。

1 盾尾间隙测量原理

1.1 测量模型

双线激光测量系统利用两个与工业相机刚性固连的半导体激光器在盾壳和管片之间投射出两道窄线型指示激光,基于单目视觉成像原理和双线测量算法实现盾尾间隙的实时精确测量。双线激光测量系统的测量模型如图1所示, AB 和 CD 是盾尾间隙指示激光, ab 和 cd 是其对应像素平面的投影, $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 是以光心为原点的相机坐标系,其中 Z 轴与光轴重合,左右激光器与相机固连在相机两侧。其中,人工测量双激光器射出光线上下宽度,调整激光器位姿,使上下宽度相等,以达到两激光平面平行^[8],像面与盾尾间隙指示激光所在平面平行。

1.2 测量原理

如图2所示, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 是相机坐标系, $O_u - uv$ 是像素坐标系,盾尾间隙指示激光所在平面与像面平行,由1.1节可知双线激光器发射的两激光平面平行,故 $A_1 A_2$ 与 $A_3 A_4$ 平行,两条指示激光间的距离与盾尾间隙指示激光 $A_1 A_2$ 、 $A_3 A_4$ 的长度一起通过实际测量获取,记为 D 、 D_1 和 D_2 。

相机采集图像利用图像处理获取指示激光在像素平面的投影直线与端点坐标 $a_1(u_1, v_1)$ 、 $a_2(u_2, v_2)$ 、

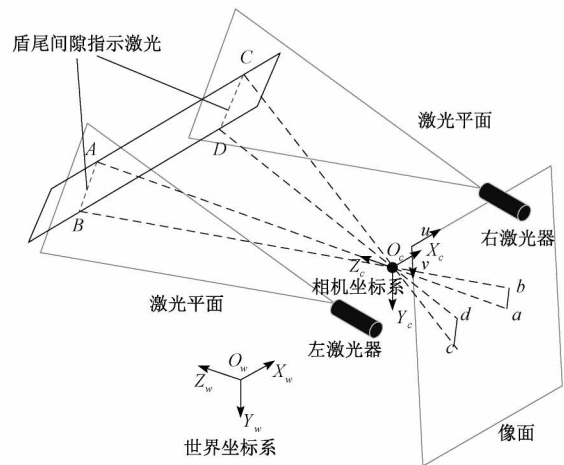


图1 双线激光测量模型

Fig. 1 Double line laser measurement model

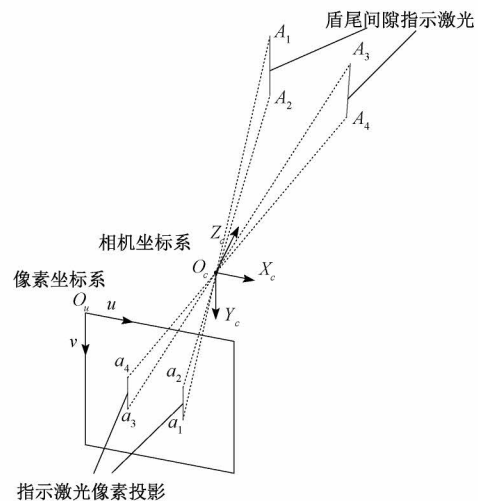


图2 盾尾间隙测量原理

Fig. 2 Measuring principle of shield tail clearance

$a_3(u_3, v_3)$ 、 $a_4(u_4, v_4)$ 。由端点坐标可知线段 $a_1 a_2$ 、 $a_3 a_4$ 方程,计算点 a_1 、 a_2 到线段 $a_3 a_4$ 的距离记为 d_1 、 d_2 ,计算点 a_3 、 a_4 到线段 $a_1 a_2$ 的距离记为 d_3 、 d_4 ,两条投影直线之间的距离:

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} \quad (1)$$

预设标尺 H ,令 $H = D/d$ 。用两点间距离公式对指示激光在像素平面的投影长度进行求解,记为 d_{dis} 。结合标尺与相似三角形原理可对实际盾尾间隙值进行计算。已知 $H = D/d$,即 $D = H \times d$ 。 H 为测量前已知, d_{dis} 为已知的现场测量数据,盾尾间隙实际距离为:

$$D = H \times d_{dis} \quad (2)$$

测量装置出厂前双激光器之间有默认间距,但是实际应用时激光器之间的距离会有变化,因此需要反向标

定,对激光器之间的实际值进行计算,以保证测量装置测量的准确性^[9]。假设两条盾尾间隙指示激光之间的实际距离为 T ,测量装置默认激光线之间的距离为 T_0 ,现场测量的间隙参考值是 F ,现场通过测量装置计算出的间隙值是 F_0 。测量装置得到的盾尾间隙为:

$$F_0 = \frac{T_0 \times d_{dis}}{d} \quad (3)$$

现场测量的盾尾间隙参考值:

$$F = \frac{T \times d_{dis}}{d} \quad (4)$$

联立式(3)和(4)可以得到双激光线之间的实际距离:

$$T = \frac{T_0 \times F}{F_0} \quad (5)$$

经过反向标定的结果:

$$H = \frac{T}{d} \quad (6)$$

将上述计算得到的参数代入既定程序即可完成对盾尾间隙的实时测量。

盾尾间隙示意图如图3所示,盾尾间隙指的是管片外沿与盾壳内沿在竖直平面上的距离,测量范围通常在60~75 mm。

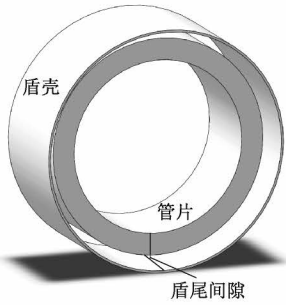


图3 盾尾间隙示意图

Fig. 3 Diagram of shield-tail clearance

2 误差处理

2.1 误差分析

在实际测量中,相机镜头会出现角度偏差导致像素平面和盾尾间隙平面不平行,此时双线激光测量算法会产生误差。相机镜头相对于理想位姿的偏转角度记为安装误差。

无安装误差时,设被测点在相机坐标系下的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) 。由相机标定的相关内容可知:

$$\begin{cases} X_c = Z_c \frac{(u - u_0)d_x}{f} \\ Y_c = Z_c \frac{(v - v_0)d_y}{f} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z_c 为被测点在相机坐标系下 Z 方向值^[10]。盾尾间隙指示激光在像素平面的投影线段端点为 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) 。盾尾间隙激光对应的像素长度为:

$$d_{dis} = \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \quad (8)$$

当存在安装误差时,把偏转角分解为空间中3个维度来分析,围绕 X 轴方向旋转了 α , 旋转矩阵为:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (9)$$

围绕 Y 轴方向旋转了 β , 旋转矩阵为:

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (10)$$

围绕 Z 轴方向旋转了 γ , 旋转矩阵为:

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

被测点在相机坐标系下坐标为:

$$\begin{pmatrix} X'_c \\ Y'_c \\ Z'_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} \quad (12)$$

代入 (X_c, Y_c, Z_c) 得:

$$\begin{cases} X'_c = (\cos \gamma \cos \beta + \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta) \cdot \\ Z_c \frac{(u - u_0)d_x}{f} + (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma) \cdot \\ Z_c \frac{(v - v_0)d_y}{f} + (\sin \beta \cos \alpha) \cdot Z_c \\ Y'_c = (\sin \gamma \cos \alpha) \cdot Z_c \frac{(u - u_0)d_x}{f} + \\ (\cos \alpha \cos \gamma) \cdot Z_c \frac{(v - v_0)d_y}{f} - \sin \alpha \cdot Z_c \\ Z'_c = (\sin \alpha \sin \gamma \cos \beta - \sin \beta \cos \gamma) \cdot \\ Z_c \frac{(u - u_0)d_x}{f} + (\sin \gamma \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma) \cdot \\ Z_c \frac{(v - v_0)d_y}{f} + (\cos \alpha \cos \beta) \cdot Z_c \end{cases} \quad (13)$$

被测点在像素坐标系下的坐标为 (u', v') , 像素坐标系与相机坐标系的转换关系为:

$$Z'_c \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X'_c \\ Y'_c \\ Z'_c \end{pmatrix} \quad (14)$$

解得:

$$\begin{cases} u' = f_x \frac{(\cos \gamma \cos \beta + \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta) \cdot (u - u_0) d_x + (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \gamma \cos \alpha) \cdot (v - v_0) d_y + (\sin \beta \cos \alpha) \cdot f}{(\sin \alpha \sin \gamma \cos \beta - \sin \beta \cos \gamma) \cdot (u - u_0) d_x + (\sin \gamma \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma) \cdot (v - v_0) d_y + (\cos \alpha \cos \beta) \cdot f} + u_0 \\ v' = f_y \frac{(\sin \gamma \cos \alpha) \cdot (u - u_0) d_x + (\cos \alpha \cos \gamma) \cdot (v - v_0) d_y + \sin \alpha \cdot f}{(\sin \alpha \sin \gamma \cos \beta - \sin \beta \cos \gamma) \cdot (u - u_0) d_x + (\sin \gamma \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma) \cdot (v - v_0) d_y + (\cos \alpha \cos \beta) \cdot f} + v_0 \end{cases} \quad (15)$$

盾尾间隙指示激光在像素平面的投影线段端点为 (u'_1, v'_1) 、 (u'_2, v'_2) 。盾尾间隙指示激光的投影线段长度为:

$$d'_{dis} = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2} \quad (16)$$

安装误差为:

$$error = d'_{dis} - d_{dis} \quad (17)$$

分别分析俯仰角,方位角和滚转角方向上存在安装误差时,被测点在像素平面的像素坐标值与对应偏转角度的关系表达式。

俯仰角方向为:

$$\begin{cases} u' = f_x \frac{(u - u_0) \cdot d_x}{\sin \alpha \cdot (v - v_0) \cdot d_y + f \cdot \cos \alpha} + u_0 \\ v' = f_y \frac{\cos \alpha \cdot (v - v_0) \cdot d_y + f \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha \cdot (v - v_0) \cdot d_y + f \cdot \cos \alpha} + v_0 \end{cases} \quad (18)$$

方位角方向为:

$$\begin{cases} u' = f_x \frac{\cos \beta \cdot (u - u_0) \cdot d_x + f \cdot \sin \beta}{-\sin \beta \cdot (u - u_0) \cdot d_x + f \cdot \cos \beta} + u_0 \\ v' = f_y \frac{(v - v_0) \cdot d_y}{-\sin \beta \cdot (u - u_0) \cdot d_x + f \cdot \cos \beta} + v_0 \end{cases} \quad (19)$$

滚转角方向为:

$$\begin{cases} u' = f_x \frac{\cos \gamma \cdot (u - u_0) \cdot d_x - \sin \gamma \cdot (v - v_0) \cdot d_y}{f} + u_0 \\ v' = f_y \frac{\sin \gamma \cdot (u - u_0) \cdot d_x + \cos \gamma \cdot (v - v_0) \cdot d_y}{f} + v_0 \end{cases} \quad (20)$$

为清晰的表示在不同方向上偏转角度对测量结果的影响,建立仿真模型,按照不同姿态角(俯仰角、方位角、滚转角)方向向测量模型里加入镜头偏转角度误差,每隔 0.2° 对盾尾间隙进行一次测量并计算与无安装误差模型之间的盾尾间隙激光对应的像素长度差值,最大偏转角度设置为 10° ,模拟现场出现的安装误差。将各项数据进行统计,得到了存在安装误差的情况下,盾尾间隙激光的投影像素长度与不同方向偏转角角度的关系图像。

仿真模型如图4所示。得到的数据图像如图5所示。

通过仿真重复性实验得到的数据可知,随着方位角与俯仰角的增大,盾尾间隙测量误差也随之增大。式(18)、(19)定量分析了测量误差和方位角角度与俯仰角角度的关系,在俯仰角方向上最大误差小于 0.85 mm ,在方位角方向上最大误差小于 1.6 mm ,仿真结果显示滚转角的变化不影响盾尾间隙的测量结果。

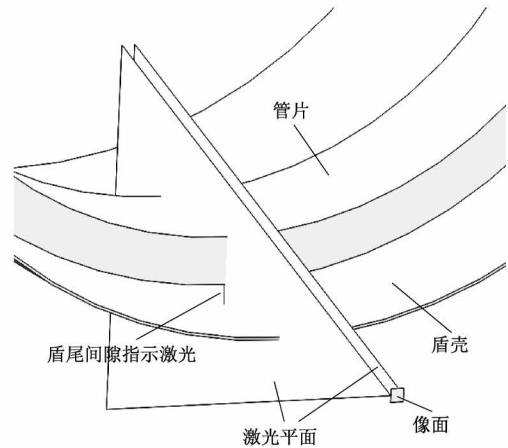


图4 双线激光测量盾尾间隙仿真模型

Fig. 4 Simulation model of shield tail clearance measurement by dual line laser

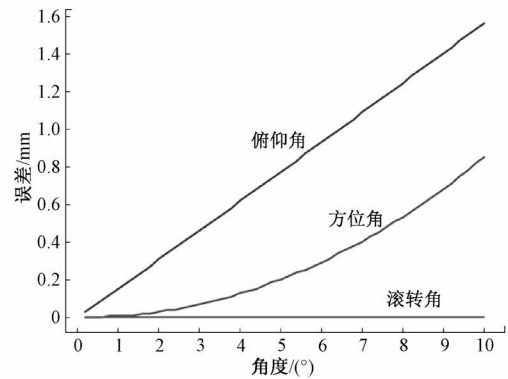


图5 存在安装误差的仿真误差数据

Fig. 5 Simulation error data with installation error

除了安装误差以外,直线提取过程、双线调平行过程和图像畸变都会对盾尾间隙测量结果造成影响。针对每种影响进行了重复性测量仿真实验,得到的最大误差分别小于 0.5 、 0.8 和 0.2 mm ,后续可以通过优化相关图像处理算法和畸变校正等手段提高测量精度。

2.2 误差补偿

由于现场条件限制等因素无法确定相机镜头的偏转角度,故对其进行误差补偿。根据得到的误差偏转角度公式,尝试缩小激光器之间的距离减少误差,将激光器之间的距离由 100 mm 缩短至 90 mm 的模型数据如图6所示。

分析图6可知,缩短双线激光器之间的距离后,俯仰角方向上最大误差减小为 0.84 mm ,方位角方向上最大

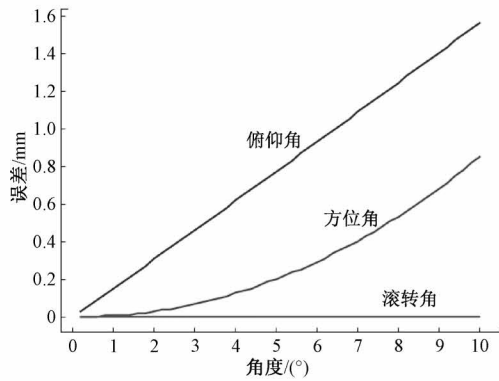


图 6 误差补偿后的仿真数据

Fig. 6 Simulation data after error compensation

误差减小为 1.46 mm,滚转角误差为 0。误差补偿对俯仰角方向上的误差影响较小,对方位角方向上的影响效果显著^[11]。

若需要进行精度更高的测量,可以自行缩短双线激光器之间的距离进行测试,以达到测量标准。

3 实验测试

盾尾间隙测量实验平台由双线激光测量装置和模拟盾尾间隙端面的测量工装组成,实验平台如图 7 所示。



图 7 盾尾间隙测量实验环境

Fig. 7 Experimental environment of shield tail clearance measurement

为保证测量结果精确并具有参考价值,在进行盾尾间隙测量时保持视觉测量装置不动,在 200~2 000 mm 移动测量工装,以此来模拟现场测量环境。为了验证测量系统的精度,本文将游标卡尺测量的盾尾间隙值作为参考值,将系统测量的盾尾间隙值定义为测量值。通过比较参考值和测量值之间的误差来评定盾尾间隙测量系统的精度。实验室环境下测量系统的测量精度绝对误差小于 1.2 mm。

在青岛某地铁盾构施工现场搭建测试系统并开展实验,现场如图 8 所示。

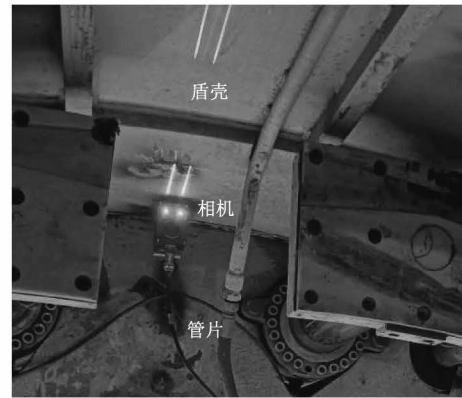


图 8 现场实验

Fig. 8 Diagram of field experiment

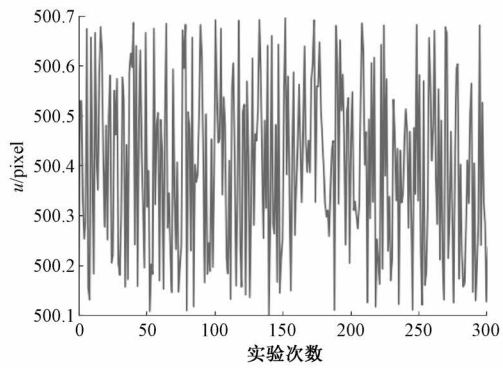
随着盾构机不断推进,相机镜头距离管片端面的距离从 200~2 000 mm,近距离时相机需要有足够大的观测视野,被测物与相机距离 2 000 mm 时依然可以清晰成像,因此测量系统的相机要具备广角、大景深及高分辨率等特性^[12],现场试验所选设备如表 1 所示。

对测量重复性精度进行验证,以保证本文所提出方法的测量稳定性。当盾构施工停机时,盾构机处于静止状态^[13],以 1 Hz 的频率对当前状态测量点对应像点的 u 、 v 和盾尾间隙值进行约 5 min 的连续测量,测量重复性精度评定实验结果如图 9 所示。经过对测量得到数据的分析可知,本次实验中投影点 u 、 v 的峰峰值分别为 0.6、0.35 pixel,标准差为 0.23、0.1 pixel,盾尾间隙的峰峰

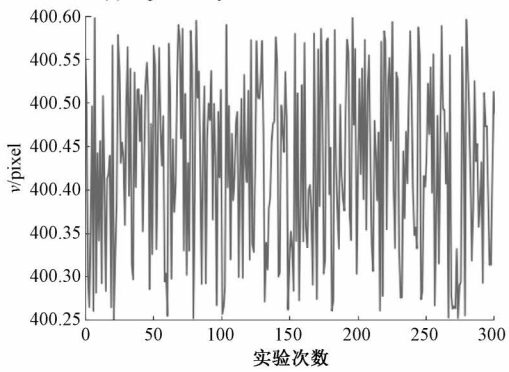
表 1 实验设备技术参数

Table 1 Technical parameters of the experimental equipment

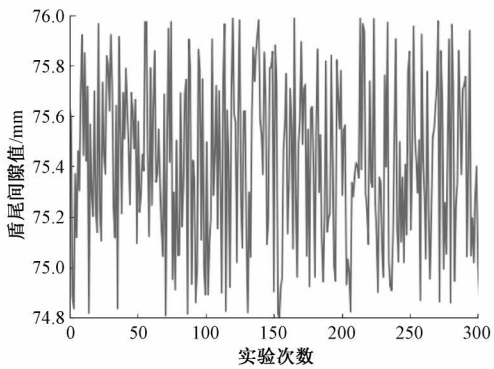
| 技术参数 | 相机 | 技术参数 | 激光器 |
|-----------|--------------------|--------|----------------|
| 型号 | DH-IPC-HFW1235M-I1 | 型号 | SDL635M5-K1250 |
| 分辨率/pixel | 1 920×1 080 | 波长/nm | 635±5 |
| 视场/mm | 206×112 | 线宽/mm | <2@1 900 |
| 焦距/mm | 8 | 功率/mW | 5 |
| - | - | 直线度/mm | 0.04 |



(a) u 值重复性测量结果
(a) Repeatability measurement result of u value



(b) v 值重复性测量结果
(b) Repeatability measurement result of v value



(c) 盾尾间隙值重复性测量结果
(c) Repeatability measurement result of the Shield tail clearance

图9 重复性测量精度评定实验结果

Fig. 9 Test results of measurement repeatability accuracy evaluation

值为 1.2 mm, 标准差 σ 为 0.3 mm, 满足现场使用要求。相机标定结果如表 2 所示。

为了保证本文所提出方法的测量准确性, 需要对测量绝对精度进行验证。在盾构机机身截面上安装测量装置, 利用本文提出的测量方法对机身截面的左侧 1 个测量点的 10 环盾尾间隙值进行测量, 并且用游标卡尺手动量取每环 2 个测量点的盾尾间隙值, 最后以游标卡尺测量值为基准验证本文所提出方法的绝对测量精度^[14]。盾尾间隙测量点位置如图 10 所示, 双线激光测量现场如图 11 所示。

表 2 标定结果

Table 2 Calibration results

| 参数类型 | 相机内参数 | 参数类型 | 相机畸变参数 |
|-------|------------------|-------|---------------|
| f_x | 2 797.202 797 25 | K_1 | -0.083 180 2 |
| f_y | 2 765.398 456 13 | K_2 | 0.380 104 41 |
| u_0 | 958.637 376 4 | K_3 | -0.174 236 65 |
| v_0 | 548.031 569 76 | P_1 | 0.000 364 821 |
| - | - | P_2 | 0.000 844 734 |

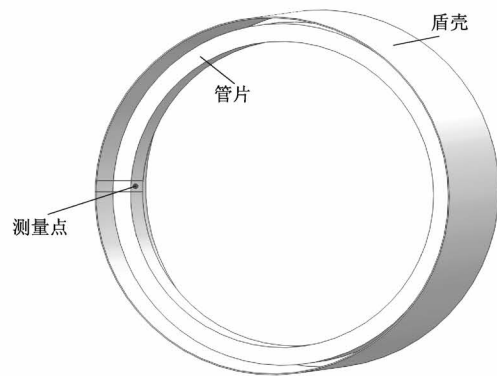


图 10 盾尾间隙测量点位置

Fig. 10 Location map of gap measurement points



图 11 双线激光测量盾尾间隙

Fig. 11 Shield tail clearance measured by double line laser

绝对测量精度评定实验数据如表 3 所示, 其中 D_1 、 D_2 分别代表本文方法测量的盾尾间隙值和游标卡尺测量的盾尾间隙值, e 代表两种测量方式之间的误差^[15]。

实验表明, 本文所提出的测量方法的绝对误差小于 2 mm, 满足现场需求。

表3 绝对测量精度评定实验数据

Table 3 Data of absolute measurement accuracy evaluation experiment

| 序号 | 测量点/mm | | |
|----|--------|-------|-------|
| | D_1 | D_2 | e |
| 1 | 75.71 | 74.44 | 1.27 |
| 2 | 74.75 | 75.76 | -1.01 |
| 3 | 75.96 | 74.01 | 1.95 |
| 4 | 74.57 | 75.71 | -1.14 |
| 5 | 75.72 | 74.56 | 1.16 |
| 6 | 74.41 | 75.76 | -1.35 |
| 7 | 74.62 | 75.73 | -1.11 |
| 8 | 75.79 | 74.59 | 1.20 |
| 9 | 75.80 | 75.54 | 0.26 |
| 10 | 75.66 | 75.50 | 0.16 |

4 结 论

本文提出了一种基于双线激光基准的盾尾间隙测量方法,介绍了该方法的测量原理和误差补偿之后,结合仿真、测量重复性精度实验和绝对测量精度评定实验验证该测量方法的准确性,对于出现的安装误差,给出了有效的补偿手段,补偿后的结果达到了现场使用的标准。测量设备尺寸基本适应所有盾构施工环境,且测试过程不影响现场施工,现场测试精度控制在2 mm以内。由于盾构测试环境复杂多变,在后续应用过程中可以对系统进一步测试,提高系统的可靠性与测试精度。

参考文献

- [1] 云锟. 浅析隧道盾构施. 中盾构机姿态控制技术[J]. 低碳世界, 2014(9): 325-327.
YUN K. Analysis of shield machine attitude control technology in tunnel shield construction[J]. Low Carbon World, 2014(9): 325-327.
- [2] 杜亚非,张劲涛,石燕平,等. 盾尾间隙自动测量方法及其系统[P]. CN111678447A, 2020-09-18.
DU Y F, ZHANG J T, SHI Y P, et al. Automatic measurement method of shield tail gap and its system[P]. CN111678447A, 2020-09-18.
- [3] 张立彬. 基于数字图像处理技术的盾构机盾尾间隙测量系统的研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2013.
ZHANG L B. Research on shield tail clearance measurement system based on digital image processing technology [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2013.
- [4] 孙连,庄欠伟. 盾构盾尾间隙测量装置试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1): 56-59.
SUN L, ZHUANG Q W. Experimental study on shield tail gap measurement device of shield machine [J]. Modern Tunnel Technology, 2016, 53(S1): 56-59.
- [5] 路亚缙,李光. 基于超声波测距技术的盾构盾尾间隙测量系统研制[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 135-140.
LU Y T, LI G. Development of shield tail clearance measurement system based on ultrasonic ranging technology [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2019, 39 (S2): 135-140.
- [6] 王宁,林福龙,李光,等. 一种新型机械式盾尾间隙测量装置[P]. CN211651507U, 2020-10-09.
WANG N, LIN F L, LI G, et al. A new type of mechanical shield tail gap measuring device [P]. CN211651507U, 2020-10-09.
- [7] 王延年,陈刚,王浩,等. 接触式盾尾间隙测量系统及其测量方法[P]. CN113945162A, 2022-01-18.
WANG Y N, CHEN G, WANG H, et al. Contact shield tail gap measurement system and its measurement method [P]. CN113945162A, 2022-01-18.
- [8] 邵震宇,戴璐璐,马鹏亮,等. 一种基于双线激光视觉的盾构机盾尾间隙测量方法[P]. CN114413775B, 2022-07-01.
SHAO ZH Y, DAI L L, MA P L, et al. A method for measuring shield tail clearance of shield machine based on dual line laser vision [P]. CN114413775B, 2022-07-01.
- [9] 魏振忠,孙文,张广军,等. 激光跟踪视觉导引测量系统的全局校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2262-2267.
WEI ZH ZH, SUN W, ZHANG G J, et al. Global calibration method of laser tracking vision guidance measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2262-2267.
- [10] 黄喆,沈小玲,张历,等. 面向双相机标靶的倾斜仪安装误差补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 152-159.
HUANG ZH, SHEN X L, ZHANG L, et al. Compensation method for installation error of tiltmeter facing double camera target [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (7): 152-159.
- [11] 黄喆,赵世艺,周卫斌,等. 面向盾构导向激光标靶的抗杂光算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 172-181.

- HUANG ZH, ZHAO SH Y, ZHOU W B, et al. Research on anti stray light algorithm for shield guided laser target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43 (4): 172-181.
- [12] 曲兴华,戴建芳,张福民. 基于激光测距的大尺寸测量应用研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(3):481-485.
QU X H, DAI J F, ZHANG F M. Application research of large size measurement based on laser ranging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(3): 481-485.
- [13] 黄喆,程二静,齐鹏,等. 基于线结构光的盾尾间隙测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(5):93-101.
HUANG ZH, CHENG ER J, QI P, et al. Research on the measurement method of shield tail clearance based on line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43 (5): 93-101.
- [14] 陶宇轩,刘秀峰,曹海印. 基于激光对刀仪的高精度在位测量及补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12): 1-8.
TAO Y X, LIU X F, CAO H Y. High-precision in-place measurement and compensation method based on laser tool setting instrument [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(12):1-8.
- [15] 黄喆,李佳雄,杜文阳,等. 基于双屏视觉标靶的掘锚机机身位姿测量技术[J]. 煤炭学报,2023,48(4): 1814-1824.
HUANG ZH, LI J X, DU W Y, et al. Research on the measurement technology of the position and orientation of the body of the digging windlass based on the dual screen visual target [J]. Journal of Coal Industry,2023,48(4): 1814-1824.

作者简介



黄喆,2011年于东北大学获得学士学位,2016年于天津大学获得博士学位,现为天津科技大学讲师,主要研究方向为地下掘进装备导航与监测和大尺度几何量精密测量。

E-mail: huangzhe@tust.edu.cn

Huang Zhe received his B.Sc. degree from Northeastern University in 2011, and Ph.D. degree from Tianjin University in 2016. He is currently a lecturer at Tianjin University of Science and Technology. His main research interests include navigation and monitoring of underground excavation equipment and precision measurement of large-scale geometric quantities.



胡成军(通信作者),2010年于河北工程大学获得学士学位,2014年于河北工程大学获得硕士学位,现为中国矿业大学(北京)博士研究生,中煤科工集团智能矿山有限公司员工,主要研究方向为煤矿采掘智能化。

E-mail: 289926387@qq.com

Hu Chengjun (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hebei University of Engineering in 2010, and M.Sc. degree from Hebei University of Engineering in 2014. He is currently a Ph.D. candidate at China University of Mining and Technology and works in Middling Coal (Tianjin) Underground Engineering Intelligent Research Institute Co., Ltd. His main research interests include intelligent coal mining and excavation.