

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108980

基于线结构光的盾尾间隙测量方法研究*

黄喆¹,程二静¹,齐鹏²,燕庆德¹,徐叶倩¹

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院 天津 300222; 2. 沈阳建筑大学机械工程学院 沈阳 110168)

摘要:针对现有盾构施工中盾尾间隙难以实时精确测量的问题,本文提出了一种基于线结构光的盾尾间隙自动测量方法。该方法首先利用线激光器在管片和盾壳之间投射出一道窄线型指示激光并通过工业相机实时采集线激光器投射在盾壳和管片之间的线激光图像,然后通过图像处理对图像目标特征进行识别并根据单目视觉成像原理和线结构光坐标测量算法提取盾尾间隙端点坐标,进而实现盾尾间隙值的精确解算。实验结果表明,本文所提出方法的重复性测量精度优于0.3 mm,绝对测量精度优于1.7 mm。该方法可以实现相机纵深方向0.2~1.9 m范围内盾尾间隙的实时精确测量,满足城市地铁隧道施工应用需求。

关键词:盾尾间隙;线结构光;坐标测量;机器视觉

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 560.4530

Research on the shield tail clearance measurement method based on line structured light

Huang Zhe¹, Cheng Erjing¹, Qi Peng², Yan Qingde¹, Xu Yeqian¹

(1. School of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The shield tail clearance is difficult to be accurately measured in real time during the on-site construction. To address this issue, this article proposes an automatic shield tail clearance measurement method based on the linear structured light. Firstly, a linear laser is used to project a narrow line-shaped indicator laser between the shield shell and the tube. The line laser image projected by the line laser between the shield shell and the tube is collected in real time through an industrial camera. Then, the target features are recognized by image processing and the end coordinates of shield tail clearance are extracted according to monocular vision imaging principle and line structured light coordinate measurement algorithm. In this way, the accurate solution of shield tail clearance value is realized. Experimental results show that the repeatability measurement accuracy of the proposed method is better than 0.3 mm, and the absolute measurement accuracy is better than 1.7 mm. This method can realize the real-time accurate measurement of the shield tail clearance within the range of 0.2~1.9 m in the depth direction of the camera, which can meet the application requirements of the urban subway tunnel construction.

Keywords: shield tail clearance; line structured light; coordinate measurement; machine vision

0 引言

随着我国城市化进程的快速推进,城市地铁隧道施工建设的速度日益提升^[1]。现阶段,盾构是地铁建设的主要方法^[2],而盾构机又是地铁施工的核心装备。在盾构施工过程中,盾尾与管片之间的间隙被称为盾尾间隙。盾尾间隙是管片选择的重要依据,如果间隙过小,盾尾会

与管片发生干扰,轻则增加盾构机向前掘进的阻力,降低掘进速度,重则盾尾会挤压损坏管片。如果间隙过大则会导致盾尾刷密封效果不好,从而出现水泥浆渗漏等现象^[3]。因此,探索一种适合盾构施工的高性能盾尾间隙测量方法,对保障盾构施工的质量与安全有着至关重要的作用。

目前,国内外学者针对“如何实现盾构施工过程中盾尾间隙的高效测量”这一问题,开展了大量研究。德国

收稿日期:2021-12-03 Received Date: 2021-12-03

* 基金项目:天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室开放课题(pilab1905)项目资助

VMT公司研发了一种基于超声波测距的盾尾间隙测量系统,该系统将超声波测距模块预埋于盾壳中与盾构机系统信号直连,能够将超声波测距实时发送给盾构机主控室,实现了盾尾间隙实时测量,但受限于超声波测距传感器的性能。这种方法的局限性在于难以更换维护且测量精度较低,难以在我国国产盾构机上大规模推广。力信测量(上海)有限公司研发了一款基于激光雷达的盾尾间隙测量系统^[4],将两个盾尾间隙测量仪对向安装在管片拼装机固定部分,通过顺次完成对盾壳和管片的点云扫描,结合管片厚度先验信息,利用某一测量角度下激光雷达几何中心到盾壳和管片内部的距离差值计算盾尾间隙值。这种方法的优点是测量范围较大,可以满足同时获取多点间隙值的需求,缺点是激光雷达传感器的绝对测距误差通常大于2 cm,测量准确性不高,且受限于安装位置,传感器在施工过程中易被现场灰尘覆盖进而难以被较好维护。由此可见,传感器的测量性能与施工环境的匹配性是能否实现盾尾间隙可靠测量的关键因素。

视觉是一种能实现可靠非接触高精度测量的传感方式^[5]。在盾尾间隙测量领域,国内众多单位普遍认同视觉测量是解决该问题的方法,并进行了广泛深入的研究,诸如铁建重工、米度测量、石家庄铁道大学、成都泰昌云图科技等单位已经开发出了视觉盾尾间隙测量仪^[6-11]。但目前基于视觉的盾尾间隙测量系统还存在如下2方面缺陷:1)图像处理通适性不足,盾构施工环境恶劣,工业相机对不同管片和盾壳体成像效果不同,难以找到适应不同施工场景的图像处理算法;2)与盾构机自身耦合关联性过高,使用过程中多依赖于油缸行程等盾构机推进参数参与解算,面对不同型号的盾构机时可扩展性较差。因此,基于对现有系统的调研,提出了一种基于线结构光的盾尾间隙测量方法,该方法兼具高通适性和低耦合性,对提升我国盾构施工质量具有重要意义。

1 算 法

1.1 基本原理

本文所设计的盾尾间隙测量模型如图1所示。该测量模型由线激光器和工业相机组成且二者为刚体关系。在测量过程中,工业相机需实时拍摄线激光器投射到管片端面的激光光条,因此将测量模型安装在管片端面正前方。由于盾尾间隙的存在,线激光器所投射线激光在管片和盾壳端面呈现出两条空间不相交的线段 l_1 、 l_2 。在相机标定完成的基础上,通过这两条空间线段投影在相机成像平面上的图像信息及其所在光平面的方程参数,并结合线结构光空间坐标测量算法,即可实现盾尾间隙的高精度实时测量。

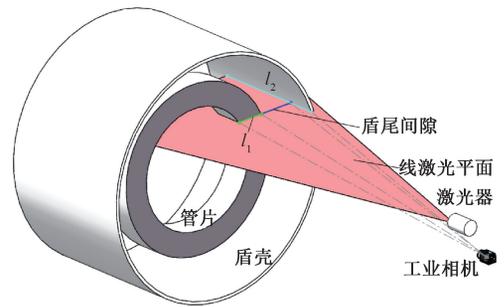


图1 盾尾间隙测量模型

Fig. 1 Shield tail clearance measurement model

1.2 相机标定

相机标定即求解相机的内部参数和外部参数。相机成像模型如图2所示, $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $O_1 - XY$ 为图像坐标系, $o - uv$ 为像素坐标系。

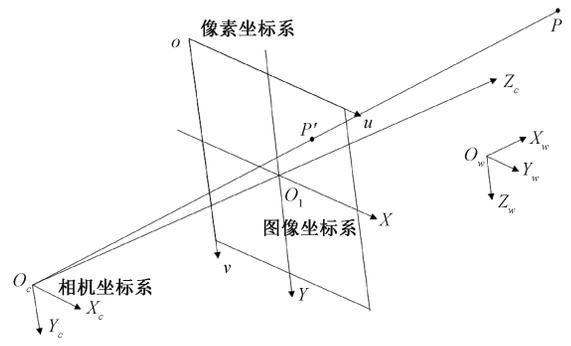


图2 相机成像模型

Fig. 2 Camera imaging model

根据小孔成像模型和世界坐标系与相机坐标系之间的转换关系^[12]可知世界坐标系中的点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 与其在像素坐标系下的投影点 $P'(u, v)$ 之间存在如下关系:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为相机内参矩阵的增广

矩阵, $\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$ 为相机外参矩阵的增广矩阵, z_c 为空间点对应像点在相机坐标系下 Z 轴方向的距离。

相机内外参数标定完成后,只需获取激光光平面方程即可完成盾尾间隙值的解算。

1.3 光平面标定

光平面标定即获取激光光平面在相机坐标系下的方程参数,标定原理如图3所示。将带有棋盘格的高精度标定板在光平面内移动多个位置,保证每个位置下激光光条能够投射在标定板上且激光光条和标定板均能清晰成像。将标定板上已知精确位置信息的棋盘格角点作为特征点并结合投影直线方程、激光光条直线方程即可完成激光光平面方程参数的求解。

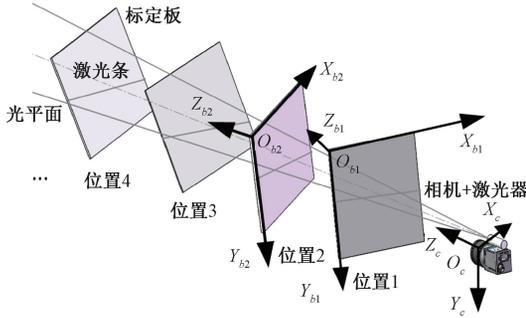


图3 光平面标定原理图

Fig.3 Schematic diagram of light plane calibration

1) 投影直线方程解算

基于相机成像模型可知投影直线为过相机光心和像点的直线。投影直线方程解算原理如图4所示, $O_b - X_b Y_b Z_b$ 为标定板坐标系,位于标定板平面上。 L 为线激光投射在标定板平面形成的激光光条, Q 为光条上某一特征点, Q' 为 Q 点在相机成像面上的投影点。

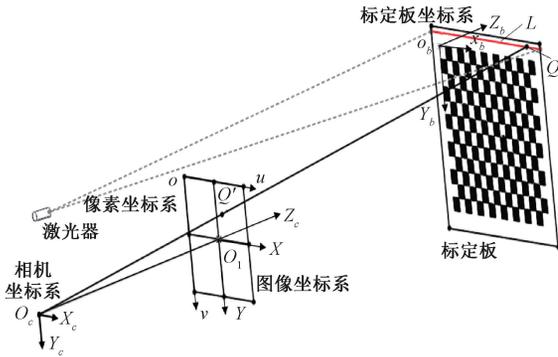


图4 投影直线方程解算原理图

Fig.4 Schematic diagram of the solution of the projection line equation

根据式(1)并结合空间坐标转换关系^[13]可知,相机坐标系与像素坐标系之间的转换矩阵为:

$$M = M_1 = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: f_x, f_y 分别为图像坐标系 x 轴、 y 轴上的归一化焦距,

(u_0, v_0) 为图像平面中心点的像素坐标。

结合式(1)和(2)可知相机坐标系下的点与其在像素坐标系下的投影点存在如下关系:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

即:

$$\begin{cases} z_c \cdot u = f_x \cdot x_c + u_0 \cdot z_c \\ z_c \cdot v = f_y \cdot y_c + v_0 \cdot z_c \\ z_c = z_c \end{cases} \quad (4)$$

由图4可知投影直线 QQ' 满足相机的小孔成像模型,可通过两个相交的平面表示:

$$\begin{cases} f_x \cdot x_c + (u_0 - u) \cdot z_c = 0 \\ f_y \cdot y_c + (v_0 - v) \cdot z_c = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: u, v 为 Q' 在像素坐标系下的横、纵坐标。

2) 激光光条直线方程解算

激光光条直线为标定板平面和投影平面的交线,其解算原理如图5所示。

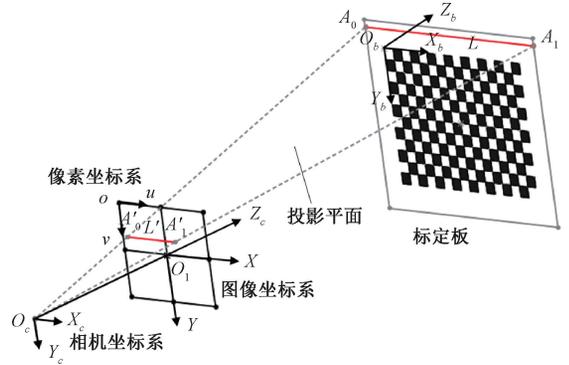


图5 激光光条直线方程解算原理图

Fig.5 Schematic diagram of solving linear equation of laser light bar

以标定板棋盘格区域左上角为原点建立标定板坐标系,则标定板平面在标定板坐标系下的方程为:

$$z_b = 0 \quad (6)$$

标定板坐标系与相机坐标系之间的转换关系可由旋转矩阵 R_b^c 和平移向量 T_b^c 表示为:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^c & T_b^c \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: R_b^c 与 T_b^c 可通过标定板上已知精确位置信息的棋盘格角点与其在成像平面上的投影点之间的对应关系获得,则标定板平面在相机坐标系下的方程如式(8)所示。

$$(0 \ 0 \ 1 \ 0) \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^c & \mathbf{T}_b^c \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

为获取激光光条直线在相机坐标系下的方程,还需对投影平面进行求解。如图5所示,相机采集激光光条图像并获取像点 A'_0 、 A'_1 在像素坐标系下的坐标 (u, v) ,像素坐标系与相机坐标系之间的转换关系可表示为:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \mathbf{mtx}^{-1} \cdot \frac{f_x \cdot d_x + f_y \cdot d_y}{2} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{mtx} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 为相机内参数矩阵, f_x 、 f_y 分别为

为图像坐标系 x 轴、 y 轴上的归一化焦距, d_x 、 d_y 分别为单位像素在 x 轴、 y 轴方向上的距离。

已知 A'_0 、 A'_1 、 O_c 三点在相机坐标系下的坐标并结合 GeoMeas 库相关算法可知 $O_c A'_0 A'_1$ 平面方程为:

$$A_a x_c + B_a y_c + C_a z_c + D_a = 0 \quad (10)$$

式中: A_a 、 B_a 、 C_a 、 D_a 为 $O_c A'_0 A'_1$ 平面在相机坐标系下的平面方程系数。根据小孔成像模型可知面 $O_c A'_0 A'_1$ 与面 $O_c A_0 A_1$ 共面,即完成投影平面方程的解算。

联立式(8)和(10)可得激光光条直线方程:

$$\begin{cases} A_a x_c + B_a y_c + C_a z_c + D_a = 0 \\ A_b x_c + B_b y_c + C_b z_c + D_b = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: A_b 、 B_b 、 C_b 、 D_b 为标定板平面在相机坐标系下的方程系数。

3) 光平面方程解算

为简化计算,设投影直线的方向向量 $\vec{s} = (m \ n \ p)$ 。由于投影直线过相机光心 O_c ,则投影直线在相机坐标系下的方程可表示为:

$$\frac{x_c}{m} = \frac{y_c}{n} = \frac{z_c}{p} \quad (12)$$

由于两直线相交有且只有一个交点,联立式(11)和(12),可获得激光光条上任一特征点的空间坐标:

$$\begin{cases} x_c = \frac{B_a D_b m - B_b D_a m}{A_a B_b m - A_b B_a m - B_a C_b p + B_b C_a p} \\ y_c = -\frac{A_a D_b m - A_b D_a m + C_a D_b p - C_b D_a p}{A_a B_b m - A_b B_a m - B_a C_b p + B_b C_a p} \\ z_c = \frac{B_a D_b p - B_b D_a p}{A_a B_b m - A_b B_a m - B_a C_b p + B_b C_a p} \end{cases} \quad (13)$$

两条相交直线可以确定一个平面,因此为获取激光光平面在相机坐标系下的方程则至少需要该平面上的2条相交激光光条。保持激光光平面不动,将标定板在

光平面范围内移动2个以上位置,确保每个位置下激光光条能够投射在标定板上且激光光条和标定板均能在相机成像平面上清晰成像。重复上述过程获取每个位置下激光光条上任意特征点空间坐标,并采用最小二乘法拟合激光光平面在相机坐标系下的方程:

$$Ax_c + By_c + Cz_c + D = 0 \quad (14)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为激光光平面在相机坐标系下的平面方程系数。

1.4 盾尾间隙测量

盾尾间隙测量数学模型如图6所示。

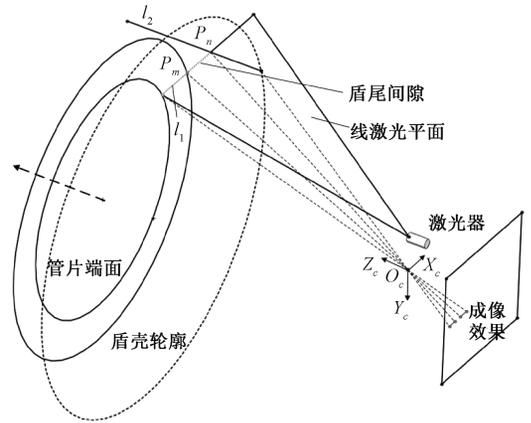


图6 盾尾间隙测量数学模型

Fig. 6 Mathematical model of shield tail gap measurement

图6中,激光光平面与管片靠近盾壳一侧的棱线相交于 P_m 点,与管片端面相交成 l_1 直线,与盾壳内侧曲面相交成 l_2 直线,延长直线 l_1 与 l_2 相交于 P_n 点,盾尾间隙值即为线段 $P_m P_n$ 的长度。 P_m 和 P_n 点均为过相机光心和像点的投影直线与激光光平面的交点,因此联立式(12)和(14)可得 P_m 和 P_n 点在相机坐标系下的三维坐标:

$$\begin{cases} x = \frac{-Dm}{Am + Bn + Cp} \\ y = \frac{-Dn}{Am + Bn + Cp} \\ z = \frac{-Dp}{Am + Bn + Cp} \end{cases} \quad (15)$$

为简化计算,设 $P_m = [x_m \ y_m \ z_m]^T$ 、 $P_n = [x_n \ y_n \ z_n]^T$ 。利用两点间距离公式即可对盾尾间隙值进行求解:

$$d = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + (z_m - z_n)^2} \quad (16)$$

1.5 盾尾间隙端点识别

盾尾间隙端点 P_m 、 P_n 的精确识别是实现盾尾间隙高精度测量的关键因素,因此盾尾间隙在图像中的识别与提取^[14-16]也至关重要,即建立物理空间中盾尾间隙与图像特征之间准确的映射关系。

盾尾间隙与激光平面之间的空间位置关系如图6所示。基于小孔成像模型,激光光条与盾尾间隙在相机中的理想成像效果如图7所示,现场实测成像效果如图8所示。

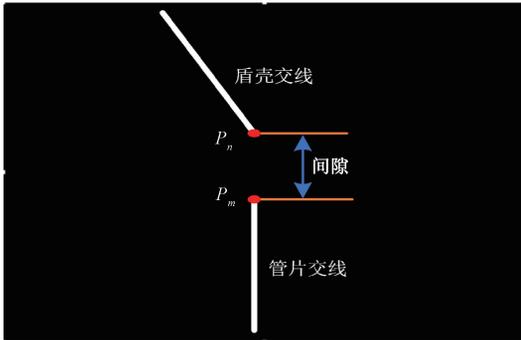


图7 理想成像效果
Fig.7 Ideal imaging effect



图8 现场实测成像效果
Fig.8 Measured imaging effect on site

复杂的盾构施工环境降低了盾尾间隙测量的可靠性。为了减少恶劣的施工环境对盾尾间隙测量的影响,现场采用双线激光模式对盾尾间隙进行测量,只要其中任意一条激光能够成功识别即可完成盾尾间隙测量。针对图8所示图像,本文采用如下流程对图像进行处理。

- 1) 图像预处理,对图像进行增强、锐化、滤波、二值化等操作以降低噪声影响并凸显出目标轮廓;
- 2) 形态学处理^[17],通过膨胀和腐蚀运算弥合激光光条内部的缝隙并消除激光光条边缘的毛刺;
- 3) 基于Canny算子对处理后的图像进行光条边缘提取;
- 4) 基于霍夫变换^[18]进行直线检测并根据获取的点集数据拟合直线方程;
- 5) 根据拟合直线斜率对“管片光线”和“盾壳光线”进行分类;
- 6) 提取背景为黑色的“管片光线”图片并逆时针旋转 90° ;
- 7) 结合“管片光线”直线方程从左到右依次求解

“管片光线”上点同时判定该点灰度值与阈值关系,进而确定光线的左右端点;

8) 求解端点质心坐标并根据 u 值确定靠近盾壳侧端点(P_m);

9) 联立“管片光线”和“盾壳光线”直线方程求解两光线交点(P_n)并计算质心坐标;

10) 图像识别完成,重新抓取图像,返回步骤1)重新识别。

2 实 验

为了验证本文所提出方法的可靠性和准确性,在青岛某地铁盾构施工现场搭建测试系统并开展实验,实验场景如图9所示。



图9 现场实验图
Fig.9 Field experiment diagram

2.1 光学系统参数

在掘进过程中,管片为撑靴油缸提供支撑,油缸缓慢伸长进而推动盾构机盾体不断向前掘进。在掘进过程中相机距离管片的位置由200 mm逐渐变化为1 900 mm,为保证盾尾间隙能够实现高精度实时测量,不但需要相机在近端位置有足够大的观测视场,还需要相机在纵深1 900 mm范围内可保持清晰成像,因此测量系统采用的光学系统须要具备广角、大景深及高分辨率等特性。实验所需光学系统的综合选型结果如表1所示。

基于文献^[14]所述方法,相机内参数/畸变系数与激光光平面方程参数标定结果如表2所示。

2.2 测量重复性精度评定实验

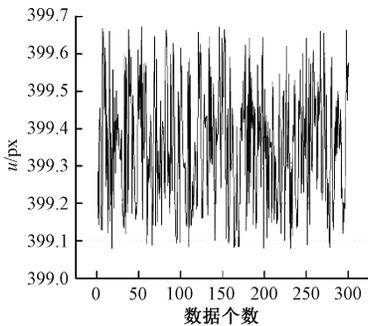
为了保证文章所提出方法的测量稳定性,需要对测量重复性精度进行验证。当盾构施工停机时,盾构机处于静止状态,以1 Hz的频率对当前状态测量点对应像点的 u 、 v 和盾尾间隙值进行约5 min的连续测量,测量重复性精度评定实验结果如图10所示。经过统计分析可知,本次实验中投影点 u 、 v 的峰峰值分别为0.59、0.35 pixel,标准差为0.17、0.1 pixel,盾尾间隙的峰峰值为1.35 mm,标准差 σ 为0.23 mm,满足现场使用要求。

表1 实验设备技术参数
Table 1 Technical parameters of the experimental equipment

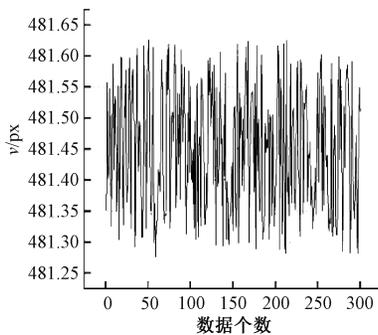
设备	相机		激光器	
技术参数	型号	DH-IPC-HFW1235M-II	型号	SDL635M5-K1250
	分辨率/pixel	1 920×1 080	波长/nm	635±5
	视场/mm	206×112	线宽/mm	<2@1 900
	焦距/mm	6	功率/mW	5
	-	-	直线度/mm	0.04

表2 标定结果
Table 2 Calibration results

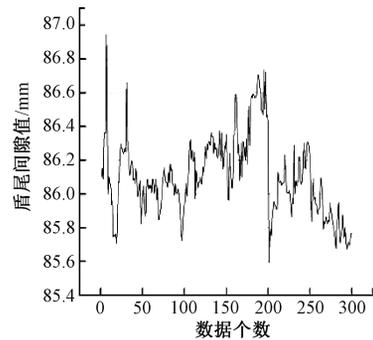
参数类型	相机内参数		相机畸变参数		激光光平面方程系数	
标定结果	f_x	2 142.984 421 23	K_1	-0.083 180 2	A	-0.001 563 28
	f_y	2 108.277 475 2	K_2	0.380 104 41	B	-0.999 654 15
	u_0	958.637 376 4	K_3	-0.174 236 65	C	-0.026 251 45
	v_0	548.031 569 76	P_1	0.000 364 821	D	23.972 685 19
	-	-	P_2	0.000 844 734	-	-



(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10 测量重复性精度评定实验结果

Fig. 10 Test results of measurement repeatability accuracy evaluation

2.3 绝对测量精度评定实验

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模型,利用本文提出的测量方法对机身截面的左上、右上、正左、正右4个测量点的10环盾尾间隙值进行测量,并用游标卡尺手动量取每环4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。盾尾间隙测量点位置如图11所示,游标卡尺

手动量取盾尾间隙如图 12 所示,绝对测量精度评定实验数据如表 3 所示,表中 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。

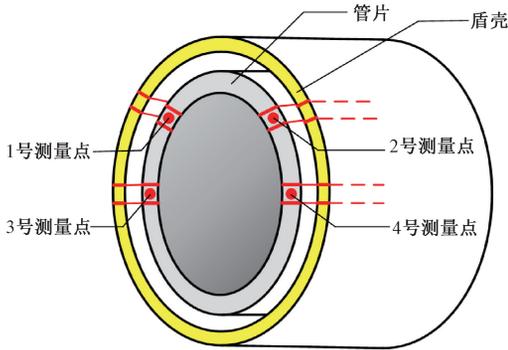


图 11 盾尾间隙测量点位置图

Fig. 11 Location map of gap measurement points

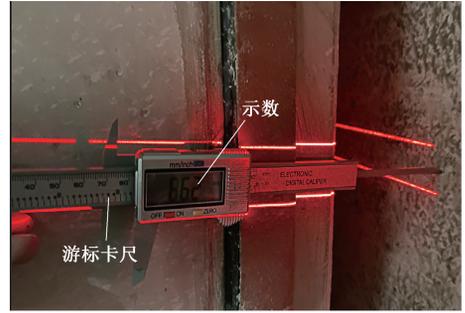


图 12 游标卡尺手动量取盾尾间隙图

Fig. 12 Manual measurement figure of shield tail clearance with vernier caliper

实验表明,本文所提出测量方法的绝对误差小于 1.7 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	1号测量点			2号测量点			3号测量点			4号测量点		
	d_1	d_2	e									
1	87.09	85.74	1.35	86.68	86.03	0.65	87.02	85.98	1.04	86.76	86.05	0.71
2	87.25	86.35	0.90	87.30	85.86	1.44	87.29	86.42	0.87	87.27	85.96	1.31
3	86.52	86.94	-0.42	86.68	87.03	-0.35	86.69	87.01	-0.32	86.81	87.13	-0.32
4	84.67	86.31	-1.64	85.08	86.26	-1.18	84.54	86.16	-1.62	85.13	86.21	-1.08
5	84.86	86.02	-1.16	84.52	85.97	-1.45	84.92	86.13	-1.21	84.48	85.68	-1.20
6	86.92	86.12	0.80	86.95	86.23	0.72	86.85	86.25	0.6	86.68	85.82	0.86
7	84.96	86.06	-1.10	84.87	85.96	-1.09	84.72	85.96	-1.24	84.62	85.61	-0.99
8	85.56	86.05	-0.49	85.32	86.15	-0.83	85.61	86.02	-0.41	85.26	86.06	-0.80
9	86.63	85.93	0.70	86.58	85.82	0.76	86.43	85.89	0.54	86.43	85.83	0.60
10	86.29	85.76	0.53	86.18	85.53	0.65	86.16	85.62	0.54	86.23	85.62	0.61

3 结 论

本文提出了一种基于线结构光的盾尾间隙测量方法,在对其测量原理进行深入分析后,开展了面向实际盾构施工应用的测量重复性精度实验和绝对测量精度评定实验,并验证了该方法的可行性与准确性。但是该算法还存在着如下两点不足:1)盾构机掘进至岩石地质层时会产生强烈的机械振动,这种振动遵循何种规律以及对测量系统的负面影响还需要进行深入分析;2)某些管片生产质量较差,管片端面经常出现止水条凸出或破损现象,激光投射在这种状态下的管片端面上会出现严重的变形,需要利用鲁棒性更强的图像处理算法对其进行识别。

象,激光投射在这种状态下的管片端面上会出现严重的变形,需要利用鲁棒性更强的图像处理算法对其进行识别。

参考文献

[1] 周双禧,李志华,陈飞龙,等. 城市轨道交通盾构法隧道施工新技术及应用[J]. 施工技术, 2020,49(19): 87-92.
 ZHOU SH X, LI ZH H, CHEN F L, et al. New technology and application of shield tunnel construction in urban rail transit [J]. Construction Technology, 2020,

- 49(19):87-92.
- [2] 李盈斌, 郭为忠, 郭文韬, 等. 盾构推进载荷模拟的多维加载机制与试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10):207-216.
LI Y B, GUO W ZH, GUO W T, et al. Multi-dimension loading mechanism and experimental research of shield propulsion load simulation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10):207-216.
- [3] 韩日美, 宋战平, 吴焕通. 盾尾间隙注浆对地表沉降的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(3):353-357.
HAN R M, SONG ZH P, WU H T. Research on the influence of shield tail gap grouting on ground settlement[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(3):353-357.
- [4] 张晓日, 张凯伦, 邵震宇, 等. 一种基于激光雷达的盾尾间隙测量装置:CN209927093U[P]. 2020-01-10.
ZHANG X R, ZHANG K L, SHAO ZH Y, et al. A laser radar-based shield tail gap measurement device: CN209927093U[P]. 2020-01-10.
- [5] 路亚缙, 徐智良. 基于 Labview 的视觉盾尾间隙测量系统研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1):197-202.
LU T Y, XU ZH L. Research on the vision shield tail gap measurement system based on labview[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(1):197-202.
- [6] 刘巍, 李肖, 李辉, 等. 基于双目视觉的数控机床动态轮廓误差三维测量方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10):1-9.
LIU W, LI X, LI H, et al. Three-dimensional measurement method of dynamic contour error of CNC machine tool based on binocular vision [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10):1-9.
- [7] 赵栓峰, 耿龙龙, 丁志兵, 等. 基于卷积神经网络的盾尾间隙测量系统研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(23):146-149.
ZHAO SH F, GENG L L, DING ZH B, et al. Research on shield tail gap measurement system based on convolutional neural network [J]. Modern Electronic Technology, 2020, 43(23):146-149.
- [8] 江玉生, 郑春燕, 杨志勇, 等. 基于高分相机图像采集处理的盾尾间隙测量系统:CN110954003A [P]. 2020-04-03.
WANG Y SH, ZHENG CH Y, YANG ZH Y, et al. Shield tail gap measurement system based on high resolution camera image acquisition and processing: CN110954003A[P]. 2020-04-03.
- [9] 肖淑亮, 余启纯, 吴俊弘, 等. 一种盾构法隧道施工盾尾间隙测量装置:CN210893018U[P]. 2020-06-03.
XIAO SH L, YU Q CH, WU J H, et al. Shield tail gap measurement device for shield tunnel construction: CN210893018U[P]. 2020-06-03.
- [10] 刘飞香, 王理, 赵宗华, 等. 一种盾构机盾尾间隙测量系统及方法:CN111457851A[P]. 2021-11-23.
LIU F X, WANG L, ZHAO ZH H, et al. System and method for measuring shield tail gap of shield machine: CN111457851A[P]. 2020-11-23.
- [11] 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 gap measurement system of shield machine based on digital image processing technology [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013.
- [12] 郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
ZHU J G, YU Z J. Principles and methods of vision measurement [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [13] 于龙龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):124-131.
YU L L, LI Y W, LUAN Y B, et al. Line structure cursor positioning based on two-dimensional plane target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):124-131.
- [14] 李振宇, 崔长彩, 黄辉, 等. 基于轮廓法的金刚石线锯整周三维表面形貌测量和评价[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20):107-115.
LI ZH Y, CUI CH C, HUANG H, et al. Measurement and evaluation of three-dimensional surface topography of diamond wire saw based on profile method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20):107-115.
- [15] 张喜民, 余奇颖, 张金博, 等. 基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019,

40(10):47-54.

ZHANG X M, YU Q Y, ZHANG J B, et al. Research on precision measurement method for mobile phone tail plug part based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(10):47-54.

- [16] 谭文,方森,段峰,等. 基于机器视觉的3D激光平面度测量系统的研究与应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 241-249.

TAN W, FANG M, DUAN F, et al. Research and application of 3D laser flatness measurement system based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(1):241-249.

- [17] 童胜杰,江明,焦传佳. 一种改进工件边缘检测方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 128-134.

TONG SH J, JIANG M, JIAO CH J. Research on an improved edge detection method of workpiece [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(1):128-134.

- [18] 李维创,尹柏强. 工业金属板带材表面缺陷自动视觉检测研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6):1-16.

LI W CH, YIN B Q. Research progress of automated visual surface defect detection for industrial metal planar materials [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(6):1-16.

作者简介



E-mail: huangzhe@tust.edu.cn

Huang Zhe received his B.Sc. degree from Northeastern University in 2011, and received his 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.



E-mail: qipeng328@163.com

Qi Peng (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Shenyang University of Chemical Technology in 2005, and received his M.Sc. degree from Northeastern University in 2008. He is currently a Ph.D. candidate at Shenyang Jianzhu University. He also works at Shenyang Shield Equipment Engineering Co., Ltd. His main research interests include shield machine design method and application.

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。

齐鹏 (通信作者), 2005年于沈阳化工大学获得学士学位, 2008年于东北大学获得硕士学位, 现为沈阳建筑大学在读博士并就职于沈阳盾构设备工程有限公司, 主要研究方向为盾构机设计方法与应用。