

# 基于平面靶标的线结构光视觉传感器 机器人手眼标定方法

吴庆华<sup>1,2\*</sup>, 邱捷锋<sup>1,2\*\*</sup>, 黎志昂<sup>1,2</sup>, 刘嘉程<sup>1,2</sup>, 王彪<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

<sup>2</sup>湖北省现代制造质量工程重点实验室, 湖北 武汉 430068

**摘要** 为确定线结构光视觉传感器与工业机器人法兰中心的位姿关系,设计了一种只有单个圆的平面靶标及标定方法。调整机器人姿态,使激光线经过平面靶标上实心圆的圆心,通过图像处理,得到圆心的像素坐标,转换后得到圆心在传感器坐标系下的坐标;多次调整姿态,获取多组图像,得到多组传感器坐标系下圆心坐标;结合对应机器人位姿关系,采用最小二乘法直接解算出手眼矩阵。实验结果表明,所提方法与采用标准球为靶标的手眼标定方法对比,反求得到的三维坐标的标准差由 0.3893 mm 降为 0.2145 mm,以同一目标的不同间距为测量对象,均方根误差均有效减小。该方法提高了标定精度,不需要采用昂贵的靶标,适合于现场标定。

**关键词** 机器视觉; 线激光; 平面靶标; 手眼标定; 机器人标定

中图分类号 TP24 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220852

## Hand-Eye Calibration Method of Line Structured Light Vision Sensor Robot Based on Planar Target

Wu Qinghua<sup>1,2\*</sup>, Qiu Jiefeng<sup>1,2\*\*</sup>, Li Zhiang<sup>1,2</sup>, Liu Jiacheng<sup>1,2</sup>, Wang Biao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;

<sup>2</sup>Hubei Provincial Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Wuhan 430068, Hubei, China

**Abstract** To determine the pose relationship between a linear structured light vision sensor and the flange center of an industrial robot, a planar target with only a single circle and its calibration method are designed. The robot's attitude is adjusted such that the laser line passes through the center of the solid circle on the plane target. Through image processing, the pixel coordinates of the center are obtained. After conversion, the coordinates of the center in the sensor coordinate system are obtained. The attitude is adjusted many times, yielding multiple sets of images and the center coordinates of multiple groups of sensors in the sensor coordinate system. The hand-eye matrix is directly solved using the least-squares method based on the corresponding robot pose relationship. The experimental results show that the standard deviation of the three-dimensional coordinates obtained by the proposed method is reduced from 0.3893 mm to 0.2145 mm compared with the hand-eye calibration method using the standard ball as the target, and the root mean square error is effectively reduced with different distances of the same target as the measurement object. This method improves calibration accuracy, does not require expensive targets, and is suitable for field calibration.

**Key words** machine vision; line laser; planar target; hand-eye calibration; robot calibration

## 1 引言

线结构光视觉传感器具有精度高、抗干扰能力强等优点,广泛应用于焊接制造、特征检测、定位抓取以及形状测量等工业领域中<sup>[1-2]</sup>。常与六自由度工业机

器人结合组成三维测量系统<sup>[3-5]</sup>。实现三维测量的关键技术是明确线结构光视觉传感器与机器人末端的位姿关系,即手眼标定<sup>[6-7]</sup>。

根据线结构光视觉传感器与工业机器人的安装位置来划分,手眼关系可以分为 Eye-to-Hand 和 Eye-in-

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-03-01; 录用日期: 2022-03-09; 网络首发日期: 2022-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(51275158)

通信作者: \*wqhua@hbut.edu.cn; \*\*623779448@qq.com

Hand 这 2 大类<sup>[8-10]</sup>。前者主要针对固定区域内三维测量,后者相对来说更加灵活,可以保持工件不动,根据需求控制机器人在不同角度下对物体进行三维测量。针对 Eye-in-Hand 类三维测量系统的手眼标定方法主要有两步法和单步法。两步法<sup>[11-12]</sup>标定过程简洁,但是在标定过程中旋转矩阵的误差会累积到求解平移矩阵中。目前研究更多的是单步法。根据靶标的不同,单步法通常有标准球法<sup>[13-16]</sup>和平面靶标法<sup>[17-19]</sup>2 种。很多视觉传感器为了获取特征点三维坐标,都采用标准球标定。标准球法是以激光线在球面形成的一段局部圆弧为基础来计算球心坐标的。但是提取该段圆弧首先得进行点云分割;其次该圆弧半径为标准球半径的 0.6~0.92<sup>[14]</sup>时,所求圆心坐标较为准确,因此,能参与圆拟合的点云数据仅占整个圆的小半部分,而且该点云数据还受相机视野和标准球大小的影响;最后,由于标准球表面存在粗糙度影响,该圆弧上所有点并不都在同一平面上,会导致该平面的法向量偏移,影响球心坐标。而平面靶标可以有效避免这方面的问题。郑健等<sup>[20]</sup>由平面靶标上的特征直线和激光线的交点来确定特征点,将标定问题转化为利用罚函数处理约束极小值优化问题,其中罚因子如何选择是标定的关键;陆艺等<sup>[21]</sup>通过棋盘格内两直线的交点来确定特征点,在其求解手眼标定过程中,激光线在棋盘格水平或者竖直方向上经过特征点,根据交点求单点坐标。以上方法虽然都可以有效地求解手眼标定矩阵,但都是采用视觉传感器求取特征点的三维坐标,对于直接通过像素坐标来求解手眼矩阵的问题,还有待进一步研究。

本文从线结构光视觉传感器的原理出发,提出一种机器人手眼标定方法。首先确定线结构光视觉传感器机器人空间坐标测量模型<sup>[22]</sup>;然后设计一种单圆平面靶标,求取特征点的二维像素坐标;最后根据手眼标定模型求解手眼矩阵。所提方法提高了标定精度,便利性强,并且不需要采用任何昂贵的靶标,适合于现场标定。

## 2 系统测量原理

基于线结构光视觉传感器的机器人三维测量系统的结构如图 1 所示,该系统主要由六自由度工业机器人、线结构光视觉传感器以及机器人运动控制模块这 3 个部分组成。线结构光视觉传感器刚性安装在机器人末端法兰盘上,通过机器人控制模块调整机器人姿态,获取测量点在机器人基坐标系下的空间坐标。

为便于描述,建立一系列坐标系,如图 1 所示:机器人基坐标系  $O_B-X_B Y_B Z_B$ ;机器人末端法兰盘坐标系  $O_T-X_T Y_T Z_T$ ;线结构光视觉传感器坐标系  $O_L-X_L Y_L Z_L$ ,其中  $X_L O_L Z_L$  平面与激光线平面重合。同时建立相机坐标系  $O_C-X_C Y_C Z_C$ ,相机的图像坐标系  $O-UV$ ,并设相机的相平面为  $\Pi_1$ ,激光线平面为  $\Pi_2$ 。

设平面  $\Pi_2$  与靶标平面交于直线  $l$ ,  $P$  为直线  $l$  上任

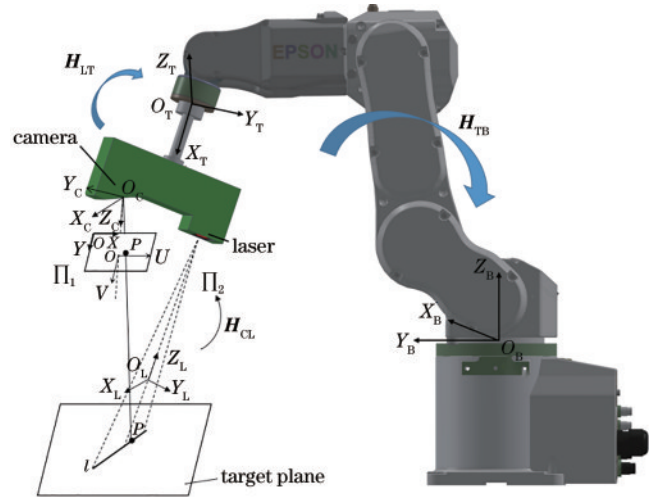


图 1 三维测量系统模型

Fig. 1 3D measurement system model

意一点,其在  $O_L-X_L Y_L Z_L$  坐标系下坐标为  $(x_L, y_L, z_L)$ ,根据相机成像得到像点  $P$ ,其在  $O_C-X_C Y_C Z_C$  坐标系下的坐标为  $(x_C, y_C, z_C)$ ,对应图像坐标为  $(u, v)$ 。由相机成像理论,可得:

$$s \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{A}_C \cdot \begin{bmatrix} x_C & y_C & z_C & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

式中:  $s$  为比例系数;  $\mathbf{A}_C$  为相机的内参矩阵。设相机坐标系  $O_C-X_C Y_C Z_C$  与传感器坐标系  $O_L-X_L Y_L Z_L$  之间的关系矩阵为  $\mathbf{H}_{CL}$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} x_C & y_C & z_C & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{H}_{CL} \cdot \begin{bmatrix} x_L & y_L & z_L & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (2)$$

由式(1)、(2)可得:

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T = \frac{1}{s} \mathbf{A}_C \cdot \mathbf{H}_{CL} \cdot \begin{bmatrix} x_L & y_L & z_L & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

式(3)即为线结构光视觉传感器的测量模型。根据传感器坐标系的定义可知,  $y_L = 0$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T = \frac{1}{s} \mathbf{A}_C \cdot \mathbf{H}_{CL} \cdot \begin{bmatrix} x_L & 0 & z_L & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

所以,激光线平面中的任意一点  $(x_L, 0, z_L)$ , 可由其对应的图像坐标  $(u, v)$  表示。通过对传感器进行标定,可以得到比例系数  $s$ 、相机内参矩阵  $\mathbf{A}_C$  以及外参矩阵  $\mathbf{H}_{CL}$ 。

设传感器坐标系  $O_L-X_L Y_L Z_L$  与机器人法兰盘坐标系  $O_T-X_T Y_T Z_T$  之间的关系矩阵为  $\mathbf{H}_{LT}$ , 点  $P$  在  $O_T-X_T Y_T Z_T$  坐标系下的坐标为  $(x_T, y_T, z_T)$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} x_L & 0 & z_L & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{H}_{LT} \cdot \begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (5)$$

设机器人在当前姿态下,法兰坐标系  $O_T-X_T Y_T Z_T$  与基坐标系  $O_B-X_B Y_B Z_B$  之间的关系矩阵为  $\mathbf{H}_{TB}$ , 点  $P$  在  $O_B-X_B Y_B Z_B$  坐标系下的坐标为  $(x_B, y_B, z_B)$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{H}_{TB} \cdot \begin{bmatrix} x_B & y_B & z_B & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

式(6)中  $\mathbf{H}_{TB}$  可由机器人运动控制器得到,将式(6)代入式(5),则有:

$$[x_L \ 0 \ z_L \ 1]^T = \mathbf{H}_{LT} \cdot \mathbf{H}_{TB} \cdot [x_B \ y_B \ z_B \ 1]^T. \quad (7)$$

由式(4)、(7)可以得到:

$$[u \ v \ 1]^T = \frac{1}{s} \mathbf{A}_C \cdot \mathbf{H}_{CL} \cdot \mathbf{H}_{LT} \cdot \mathbf{H}_{TB} \cdot [x_B \ y_B \ z_B \ 1]^T. \quad (8)$$

式(8)即为线结构光视觉传感器机器人空间坐标测量模型,其中 $\mathbf{H}_{LT}$ 的求取,即为机器人与视觉传感器的手眼标定。

### 3 手眼标定模型

由于线结构光视觉传感器与机器人法兰盘刚性连接,所以矩阵 $\mathbf{H}_{LT}$ 为常矩阵。设点 $P$ 为空间固定点,则点 $P$ 在基坐标系下的坐标为定值。由式(7)可知,调整机器人姿态,则点 $P$ 在传感器坐标系下的坐标随矩阵 $\mathbf{H}_{TB}$ 变化,将式(7)改写为:

$$[x_B \ y_B \ z_B \ 1]^T = \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{H}_{LT}^{-1} \cdot [x_L^i \ 0 \ z_L^i \ 1]^T, \quad (9)$$

式中:为便于描述,将 $\mathbf{A}^i$ 记为每次测量时矩阵 $\mathbf{H}_{TB}$ 的逆矩阵; $(x_L^i, 0, z_L^i)$ 为点 $P$ 在坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 下的坐标; $\mathbf{H}_{LT}^{-1}$ 为矩阵 $\mathbf{H}_{LT}$ 的逆矩阵。式(9)为手眼标定模型,由于点 $P$ 在基坐标系下的坐标为定值,所以进行 $n$

次测量,建立如下方程组可求解矩阵 $\mathbf{H}_{LT}$ :

$$\begin{cases} [x_B \ y_B \ z_B \ 1]^T = \mathbf{A}^1 \cdot \mathbf{H}_{LT}^{-1} \cdot [x_L^1 \ 0 \ z_L^1 \ 1]^T \\ [x_B \ y_B \ z_B \ 1]^T = \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{H}_{LT}^{-1} \cdot [x_L^2 \ 0 \ z_L^2 \ 1]^T \\ \vdots \\ [x_B \ y_B \ z_B \ 1]^T = \mathbf{A}^n \cdot \mathbf{H}_{LT}^{-1} \cdot [x_L^n \ 0 \ z_L^n \ 1]^T \end{cases} \quad (10)$$

式(10)可改写为

$$\mathbf{A}^1 \cdot \mathbf{H}_{LT}^{-1} \cdot [x_L^1 \ 0 \ z_L^1 \ 1]^T = \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{H}_{LT}^{-1} \cdot [x_L^i \ 0 \ z_L^i \ 1]^T, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (11)$$

$$\mathbf{A}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^i & \mathbf{T}^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{LT}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & \mathbf{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 分别是 $\mathbf{A}^i$ 中的旋转矩阵和平移矩阵的简写; $\mathbf{r}$ 为矩阵 $\mathbf{H}_{LT}^{-1}$ 中旋转分量; $\mathbf{t}$ 为矩阵 $\mathbf{H}_{LT}^{-1}$ 中平移向量。将式(12)代入式(11),则有:

$$(\mathbf{R}^i x_L^1 - \mathbf{R}^i x_L^i) \mathbf{r}_1 + (\mathbf{R}^i y_L^1 - \mathbf{R}^i y_L^i) \mathbf{r}_2 + (\mathbf{R}^i z_L^1 - \mathbf{R}^i z_L^i) \mathbf{r}_3 + (\mathbf{R}^1 - \mathbf{R}^i) \mathbf{t} = \mathbf{T}^i - \mathbf{T}^1, \quad (13)$$

化简为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}^1 x_1 - \mathbf{R}^2 x_2 & \mathbf{R}^1 y_1 - \mathbf{R}^2 y_2 & \mathbf{R}^1 z_1 - \mathbf{R}^2 z_2 & \mathbf{R}^1 - \mathbf{R}^2 \\ \mathbf{R}^1 x_1 - \mathbf{R}^3 x_3 & \mathbf{R}^1 y_1 - \mathbf{R}^3 y_3 & \mathbf{R}^1 z_1 - \mathbf{R}^3 z_3 & \mathbf{R}^1 - \mathbf{R}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{R}^1 x_1 - \mathbf{R}^n x_n & \mathbf{R}^1 y_1 - \mathbf{R}^n y_n & \mathbf{R}^1 z_1 - \mathbf{R}^n z_n & \mathbf{R}^1 - \mathbf{R}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^2 - \mathbf{T}^1 \\ \mathbf{T}^3 - \mathbf{T}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{T}^n - \mathbf{T}^1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

为求解手眼矩阵 $\mathbf{H}_{LT}$ ,需获取一系列点 $P$ 在坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 下的坐标和与之对应的矩阵 $\mathbf{H}_{TB}$ ,其中 $\mathbf{H}_{TB}$ 可由机器人运动控制器获取,由式(4)可知,通过采集点 $P$ 的像素坐标,即可获取点 $P$ 在坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 下的坐标。

为便于求取特征点的像素坐标,设计了一种只有

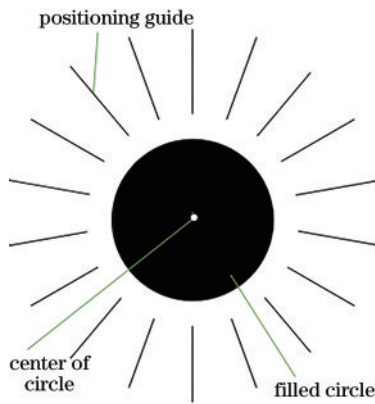


图2 平面圆形靶标  
Fig. 2 Flat circular target

单个圆的平面靶标,如图2所示。该靶标由单个黑色实心圆和经过该圆圆心的定位辅助线组成,特征点为实心圆的圆心。在求取圆心坐标时,需调整传感器位姿,使整个实心圆在相机视野内(实心圆大小由相机幅面

决定,方便求取圆心坐标即可),并且保证激光线与定位辅助线重合。激光线是否与定位辅助线重合,由图像处理算法自动判断。通过图像处理求取平面靶标上激光线条纹中心直线和实心圆圆心坐标,计算圆心到条纹中心直线的距离,以该距离小于给定的阈值来判断两直线是否重合。实心圆圆心坐标即为特征点坐标。

为获取一系列测量数据,将靶标固定在实验台上,调整机器人姿态,使激光线与另一条定位辅助线重合,获取特征点的像素坐标,并记录机器人运动控制器上位姿信息,如图3所示。重复上述步骤,记录多组测量数据。

由式(14)可知,方程有12个未知数,每个位姿确定3个方程,测量4次即可求解。为提高标定精度,测量次数 $n > 4$ 次,组成超定方程,通过最小二乘法求取矩阵 $\mathbf{H}_{LT}$ 的近似最优解。

## 4 实验分析

### 4.1 手眼标定实验

为获取一系列特征点的测量数据,求取手眼矩阵的近似最优解,搭建的三维测量系统实验平台如图4所示。该系统采用爱普生工业机器人、自研线结构光视觉传感器和自制平面靶标,其主要器材的相关参数如表1所示。

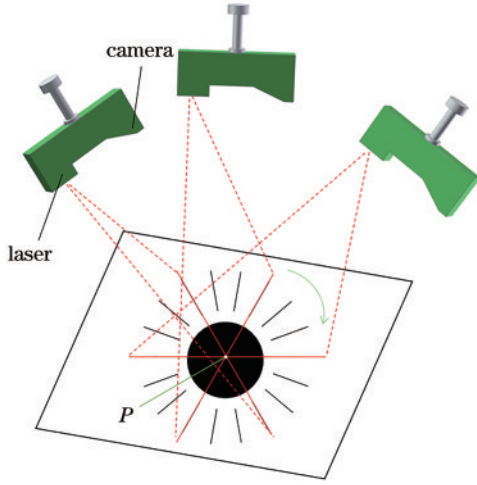


图 3 手眼标定示意图

Fig. 3 Hand-eye calibration diagram

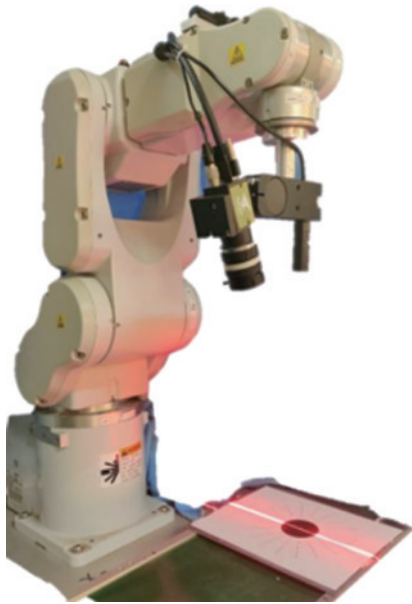


图 4 三维测量系统实验平台

Fig. 4 3D measurement system experimental platform

采用图 2 的平面圆形靶标,定位辅助线均分黑色实心圆。在测量系统工作范围内,将平面靶标固定在实验台上,则实心圆的圆心为固定点,以该点为特征点测量,获取一系列特征点在坐标系  $O_L-X_L Y_L Z_L$  下的坐标和与之对应的矩阵  $H_{TB}$ 。具体实验步骤如下:

1) 打开激光器,调整机器人姿态,使激光线与定位辅助线重合,同时保持实心圆大致位于相机视野的中心;关闭激光器,保存实心圆照片,并记录机器人运动控制器上的 6 个位姿读数  $(x, y, z, u, v, w)$ 。

2) 为获取多组特征点在机器人不同姿态下的数据,重复步骤 1) 中方法,本实验一共采集 18 组数据,每条定位辅助线上采集 2 组。

3) 根据实心圆的图像信息,通过椭圆拟合获取在图像坐标系下的圆心坐标,由式(4)转化为坐标系

表 1 实验平台器材参数表

Table 1 Parameters of experimental platform equipment

Equipment	Specification	Parameter
Epson industrial robot	Model	C3-A6008
	Repeat positioning accuracy /mm	$\pm 0.02$
	Format /mm	$200 \times 100$
	Wavelength /nm	650
Line structured light vision sensor	Resolution in X direction /mm	0.1
	Resolution in Z direction /mm	0.05
	Working distance /mm	200
	Accuracy /mm	$\pm 0.1$
Flat round target	Solid circle diameter /mm	35
	Accuracy / $\mu\text{m}$	$\pm 3$
Standard ball target	Diameter /mm	30
	Accuracy / $\mu\text{m}$	$\pm 0.5$
Sawtooth target	Sawtooth spacing /mm	20
	Number of crests	9

$O_L-X_L Y_L Z_L$  下的坐标。由于传感器坐标系中  $X_L O_L Z_L$  平面与激光线平面重合,因此特征点 Y 坐标值均为 0。而由式(13)可知,求解线性方程组时,若旋转分量  $r_2$  的系数全为 0,则方程组无解,所以定义 Y 坐标值为接近于 0 的数,即圆心坐标定义为  $(x_1, 0.0001, z_1)$ 。

根据以上步骤,采集的机器人运动控制器位姿信息以及传感器坐标系下圆心坐标数据,如表 2 所示。

根据表 2 采集的数据,代入式(14),通过最小二乘法求解近似最优解,得到  $H_{LT}$ :

$$H_{LT} = \begin{bmatrix} 0.9973 & -0.0275 & -0.0296 & -8.2886 \\ -0.0668 & -0.1147 & 0.0038 & -34.6238 \\ 0.0283 & 0.9930 & 0.9996 & 299.6681 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

### 4.2 精度验证实验

手眼关系标定结果无法单独评估其精度,可以进行基于线结构光视觉传感器的三维测量系统的精度验证实验,以三维测量系统的精度为指标来验证手眼标定精度。本实验共设计了 3 组:实验 1 和实验 2 分别以平面靶标和标准球为参照物求解手眼矩阵,通过三维测量系统测量同一固定特征点在机器人基坐标系下的坐标,反求该点三维坐标的标准差,验证该系统的重复定位精度;实验 3 以锯齿靶标为测量对象,分别采用实验 1 和实验 2 所求的手眼矩阵来测量同一波峰的距离,验证该系统的测量精度。

计算三维坐标的标准差公式为

$$K = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}{n-1}}, \quad (16)$$

式中:K 为三维坐标的标准差; $x_i, y_i, z_i$  测量值的三维

表 2 平面圆形靶标圆心坐标数据  
Table 2 Center coordinate data of plane circular target

Serial number	Pose information of robot flange end in base coordinate system						Coordinates of center of circle in the sensor coordinate system		
	$X/mm$	$Y/mm$	$Z/mm$	$U/(^\circ)$	$V/(^\circ)$	$W/(^\circ)$	$x/mm$	$y/mm$	$z/mm$
1	-32.253	367.453	506.016	89.621	2.382	171.804	-0.9581	0.0001	85.4521
2	-19.044	360.459	509.862	89.764	1.924	173.656	2.3765	0.0001	88.6238
3	-39.476	360.983	497.478	109.623	2.910	170.899	-1.7034	0.0001	76.987
4	-19.606	360.459	509.862	109.886	1.924	173.656	-1.9219	0.0001	88.4338
5	-14.612	353.825	494.952	129.871	1.924	173.656	2.7887	0.0001	73.4879
6	18.626	386.508	492.352	130.132	2.433	-179.790	2.2408	0.0001	73.2039
7	8.224	393.724	492.352	150.105	2.433	-179.790	2.1896	0.0001	73.1993
8	37.212	424.477	489.681	150.116	0.904	-173.965	0.5572	0.0001	76.751
9	9.046	436.601	496.237	173.000	0.904	-173.965	-1.1922	0.0001	83.0772
10	30.935	384.340	495.937	172.886	-2.805	179.180	0.5282	0.0001	77.3549
11	21.017	395.756	483.330	-167.193	-2.805	179.180	2.2846	0.0001	65.0681
12	21.017	395.756	483.330	-167.193	-2.805	179.180	2.2858	0.0001	65.0752
13	-42.936	388.969	489.674	71.809	4.168	169.119	0.2909	0.0001	70.6475
14	-17.634	388.626	489.674	71.884	5.256	172.468	0.3547	0.0001	69.3708
15	-7.797	390.195	489.674	51.875	5.256	172.468	0.9016	0.0001	69.2066
16	-36.494	358.779	489.674	52.695	-0.493	172.034	2.5581	0.0001	68.9965
17	-15.989	341.574	489.674	32.684	-0.120	176.772	3.7068	0.0001	68.2645
18	12.267	410.806	489.674	31.263	8.266	170.509	2.4624	0.0001	71.999

坐标;  $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$  为所有测量值三维坐标的平均值。

如图 5 所示, 分别将平面靶标和标准球靶标固定在实验台上, 以实心圆的圆心和标准球的球心为特征点, 验证该系统的重复定位精度。相关器材参数如表 1 所示。

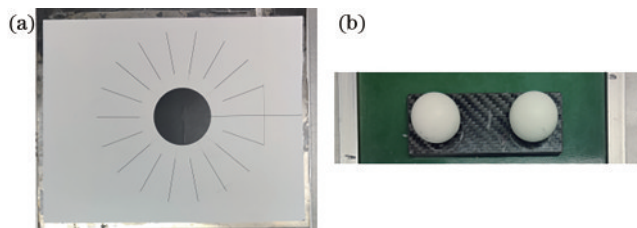


图 5 靶标。(a)平面靶标;(b)标准球靶标

Fig. 5 Target. (a) Flat target; (b) standard ball target

实验 1: 如图 5(a) 所示, 将平面靶标固定在实验台上, 获取实心圆的圆心坐标。调整机器人姿态, 使激光线与定位辅助线重合, 直接获取实心圆的圆心坐标。通过已求解的手眼矩阵  $H_{LT}$ , 反求其在基坐标系下的坐标。多次测量后, 获取 16 组实验数据, 如表 3 左侧所示。

实验 2: 如图 5(b) 所示, 将标准球靶标固定在实验台上。调整机器人姿态, 使结构光对准标准球, 激光在

球面形成一段圆弧。通过确定该弧的圆心坐标, 结合标准球半径, 即可求出标准球球心在传感器坐标系下的坐标。根据上述手眼标定模型, 已知传感器坐标系下特征点坐标和矩阵  $H_{TB}$ , 可求解出以标准球为靶标的手眼矩阵  $H_B$ 。采用实验 1 中方法, 以同一实心圆圆心为特征点, 多次测量, 获取 16 组实验数据。通过矩阵  $H_B$ , 反求其在基坐标系下的坐标, 测量结果如表 3 右侧所示。

实验 3: 以锯齿靶标为测量对象, 调整机器人姿态, 使激光线经过锯齿靶标的中间剖面, 如图 6 所示。锯齿靶标的相关参数见表 2。激光线与波峰的交点为特征点, 可以快速获取特征点坐标, 分别使用实验 1 与实验 2 中的手眼矩阵测量波峰间的间距  $EF$ 、 $CD$  和  $AB$ , 获取 16 组测量数据, 结果如表 4 所示。

在同一测量系统中, 分别使用平面靶标和标准球靶标求解手眼矩阵进行对比实验。实验结果表明, 测量同一点的重复性精度验证实验, 与标准球为靶标的方法对比, 所提方法所有反求特征点的标准差由 0.3893 mm 降为 0.2145 mm, 如表 3 所示。以同一锯齿靶标为测量对象, 测量同一波峰间的间距, 分别计算两种方法的均方根误差, 使用所提方法所求的均方根误差明显较小, 如表 4 所示。

表 3 三维测量系统重复定位精度验证实验

Table 3 Verification experiment of repeated positioning accuracy of 3D measurement system unit: mm

Serial number	Matrix $H_{LT}$ inverse 3D coordinates			Matrix $H_B$ inverse 3D coordinates		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-8.3326	341.3045	105.0707	-8.3438	341.3810	105.8428
2	-8.3678	341.3657	104.9710	-8.4239	341.0357	105.7163
3	-8.3285	341.4857	105.3702	-8.3891	341.5315	106.1413
4	-8.2841	341.4204	105.0968	-8.3846	341.0151	105.8649
5	-8.3586	341.3741	104.9267	-8.4405	341.4348	105.6984
6	-8.3014	341.3059	104.7649	-8.5576	341.3385	105.5357
7	-8.2319	341.4018	104.7125	-8.2930	341.4127	105.4774
8	-8.2996	341.5159	104.8848	-8.3177	341.4915	105.6383
9	-8.3614	341.3923	104.7291	-8.0712	341.3675	105.5057
10	-8.4832	341.4684	105.0155	-8.4853	341.5272	105.0967
11	-8.2707	341.4413	104.9817	-8.2956	341.0700	105.1214
12	-8.4303	341.5124	105.1678	-8.4419	341.8443	105.9150
13	-8.3001	341.3180	105.2831	-8.3314	341.4260	106.0547
14	-8.2927	341.2756	105.1918	-8.0887	341.5793	105.9493
15	-8.3941	341.3813	105.0576	-8.3323	341.5254	105.8204
16	-8.4299	341.3840	105.1271	-8.3383	341.5229	105.8647
Standard deviation	0.2145			0.3893		

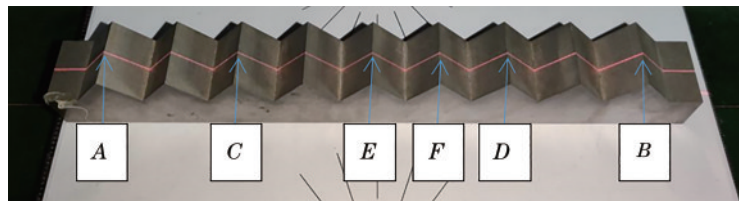


图 6 锯齿靶标

Fig. 6 Sawtooth target

表 4 三维测量系统测量精度验证实验

Table 4 Measurement accuracy verification experiment of 3D measurement system unit: mm

Serial number	Flat target			Standard ball target		
	EF	CD	AB	EF	CD	AB
1	20.2242	80.2756	179.6909	20.1382	79.8808	180.1398
2	19.8050	79.6891	179.7167	20.3377	79.9512	179.5426
3	19.8311	80.3123	180.1920	19.5018	80.4996	180.6814
4	20.1617	79.9087	180.2337	19.9716	79.5309	180.3112
5	20.0213	79.7100	180.5433	20.5378	79.8903	180.5709
6	20.3421	80.5239	179.6690	19.7766	79.9608	179.6822
7	20.3240	80.1450	180.0415	19.9017	79.5088	179.7994
8	20.2504	80.2395	180.3840	19.7116	80.5410	180.3040
9	19.6932	80.2055	180.2983	20.3923	80.6485	179.4420
10	19.9737	79.9394	179.6242	20.3999	79.6180	180.7706
11	20.0059	79.8291	180.0091	19.4639	79.5685	180.6307
12	19.7227	80.4235	180.0489	19.5339	80.1957	179.5418
13	19.7136	80.2535	179.5033	20.5841	79.5327	179.6580
14	20.2941	80.1669	179.6290	20.4282	79.6015	180.3610
15	20.2269	80.2098	179.9987	19.4916	80.5543	179.6905
16	19.8347	79.9973	180.0437	19.5615	80.4769	180.4188
Truth value	20	80	180	20	80	180
RMSE	0.2301	0.2629	0.3000	0.4037	0.4136	0.4596

## 5 结 论

本实验提出了一种线结构光视觉传感器机器人手眼标定方法,设计了一种单圆平面靶标,通过以二维像素坐标直接求解手眼矩阵。经对比实验验证:所提方法提高了标定精度,同时具有很强的适用性,可以广泛应用于实验研究和现场标定等场景。在未来研究中,针对特征点的选取,该方法不限于实心圆靶标,本实验仅以实心圆提供了一种思路,任何容易求取像素坐标的平面特征点,都可使用该方法进行手眼标定。

### 参 考 文 献

- [1] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 基于 iGPS 定位跟踪的三维形貌测量系统标定方法[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104003.  
Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Calibration method of three-dimensional shape measurement system based on iGPS positioning and tracking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104003.
- [2] 王乐, 周谦, 方玥, 等. 基于线结构光的钢轨扣件紧固状态检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 1612002.  
Wang L, Zhou Q, Fang Y, et al. Detection method of rail fastener fastening state based on line structured light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(16): 1612002.
- [3] Chen W Y, Du J, Xiong W, et al. A noise-tolerant algorithm for robot-sensor calibration using a planar disk of arbitrary 3-D orientation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 15(1): 251-263.
- [4] 翟鹏, 崔海华, 胡广露, 等. 面向线结构光测量的直线空间变换光平面标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 0212001.  
Zhai P, Cui H H, Hu G L, et al. Light plane calibration method using line transformation for line structured light measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(2): 0212001.
- [5] 李志宇, 林嘉睿, 孙岩标, 等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1512004.  
Li Z Y, Lin J R, Sun Y B, et al. A method for measuring circular pose based on line structured light sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1512004.
- [6] 王连庆, 钱莉. 基于 3D 标定块的机器人与 3D 相机手眼标定研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2433001.  
Wang L Q, Qian L. Research on robot hand-eye calibration method based on three-dimensional calibration block[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2433001.
- [7] 陈天元, 宋光明, 王富林, 等. 基于手眼系统的线结构光焊缝跟踪系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2407-2414.  
Chen T Y, Song G M, Wang F L, et al. Design of a welding seam tracking system with the structured light based on the hand-eye system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2407-2414.
- [8] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.  
Yang S R, Yin S B, Ren Y J, et al. Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3239-3246.
- [9] 张旭, 贾君慧, 张刚. 基于镜面反射的手眼标定方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(10): 1153-1158, 1165.  
Zhang X, Jia J H, Zhang G. Eye-on-hand calibration method based on specular reflection[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(10): 1153-1158, 1165.
- [10] 吴庆华, 万偲, 李子奇, 等. 机器人线结构光视觉引导系统的手眼标定方法[J]. 制造业自动化, 2021, 43(11): 29-34, 40.  
Wu Q H, Wan C, Li Z Q, et al. Hand eye calibration method of robot line structured light vision guidance system[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(11): 29-34, 40.
- [11] 李爱国, 马孜, 张旭, 等. 一种用于机器人三维表面扫描系统的手眼标定算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(6): 885-888.  
Li A G, Ma Z, Zhang X, et al. Hand-eye calibration for robot 3D surface scanning system[J]. Control and Decision, 2009, 24(6): 885-888.
- [12] Li M Y, Du Z J, Ma X X, et al. A robot hand-eye calibration method of line laser sensor based on 3D reconstruction[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 71: 102136.
- [13] 熊会元, 宗志坚, 高群. 一种线结构光视觉传感器手眼标定方法及仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(9): 2223-2226.  
Xiong H Y, Zong Z J, Gao Q. Line structured light visual sensor hand-eye calibration method and simulation [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(9): 2223-2226.
- [14] 曹冬旺, 郝卫东, 杨道国. 线激光视觉测量机器人手眼标定方法研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(21): 31-35.  
Cao D W, Hao W D, Yang D G. Research of hand-eye calibration method for line laser vision measurement robot [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(21): 31-35.
- [15] Fu J S, Ding Y B, Huang T, et al. Hand-eye calibration method with a three-dimensional-vision sensor considering the rotation parameters of the robot pose[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(6): 825-828.
- [16] Mu N, Wang K, Xie Z X, et al. Calibration of a flexible measurement system based on industrial articulated robot and structured light sensor[J]. Optical Engineering, 2017, 56(5): 054103.
- [17] Qiu S W, Wang M M, Kermani M R. A new formulation for hand-eye calibrations as point-set matching[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6490-6498.
- [18] 曾柏伟, 孟繁乐, 丁辉, 等. 一种基于平面的手术机器人手眼标定方法[J]. 生物医学工程学杂志, 2017, 34(2):

- 200-207, 213.
- Zeng B W, Meng F L, Ding H, et al. A plane-based hand-eye calibration method for surgical robots[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2017, 34(2): 200-207, 213.
- [19] 王朝旭, 伏燕军, 李晔, 等. 基于消隐点的线结构光测量系统标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2212003.
- Wang Z X, Fu Y J, Li Y, et al. Calibration method for line structured light measurement system based on vanishing point[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2212003.
- [20] 郑健, 张轲, 罗志锋, 等. 基于空间直线约束的焊接机器人手眼标定[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 108-113, 134.
- Zheng J, Zhang K, Luo Z F, et al. Hand-eye calibration of welding robot based on the constraint of spatial line[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 108-113, 134.
- [21] 陆艺, 沈添秀, 罗哉, 等. 基于线结构光传感器的工业机器人运动学参数标定[J]. 计量学报, 2021, 42(1): 66-71.
- Lu Y, Shen T X, Luo Z, et al. Calibration of industrial robot kinematic parameters based on line structured light sensor[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(1): 66-71.
- [22] 吴庆华, 何涛, 史铁林. 一种基于平面标靶的线结构光视觉传感器标定方法[J]. 光电子·激光, 2013, 24(2): 297-301.
- Wu Q H, He T, Shi T L. A calibration method for line structured-light vision sensor based on a plane target[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(2): 297-301.