

文章编号: 1001-5078(2023) 05-0737-07

• 光电技术与系统 •

# 正交约束下的机器人线结构光手眼标定

陈新禹<sup>1</sup>, 周杰<sup>2</sup>, 张庆新<sup>1</sup>, 任艳<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学人工智能学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 沈阳航空航天大学自动化学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 为了将传感器局部坐标系下的测量数据转化为机器人坐标系下的全局三维数据, 需要确定机器人法兰盘与传感器之间的关系, 即手眼标定。为实现机器人与线结构光传感器的现场手眼标定, 提出一种正交约束条件下的新方法, 该方法标定过程无需人工参与, 仅需一块具有空间正交约束关系的平面靶标。标定过程中任意变换机器人位置与姿态, 控制激光线与靶标两直角边分别相交, 并记录传感器测量坐标值以及对应的机器人姿态数据, 再基于空间正交约束建立非线性优化模型, 最后采用内点法迭代求得最优解。实验结果表明: 该标定方法快速、稳定且精度较高, 系统整体测量精度优于 0.3 mm, 可满足常规测量需求。

**关键词:** 手眼标定; 三维测量; 正交约束; 线结构光传感器

**中图分类号:** TP242.2      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.05.015

## Hand-eye calibration of robot with linear structured light under orthogonal constraints

CHEN Xin-yu<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, ZHANG Qing-xin<sup>1</sup>, REN Yan<sup>1</sup>

(1. Shenyang Aerospace University, School of Artificial Intelligence, Shenyang 110136, China;

2. Shenyang Aerospace University, School of Automation, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In order to transform the measurement data in the local coordinate system of line structured light sensor into global 3D data in the coordinate system of the robot, the relationship between the robot flange and the sensor needs to be determined, which is called the hand-eye calibration. A new algorithm based on spatial orthogonal constraints is proposed for fast hand-eye calibration of line structured light sensor, which requires no human involvement in the calibration process, and only a plane target with a spatially orthogonal constraints relationship. During the calibration process, the laser line is controlled to intersect with both sides of the target, and the intersection coordinates and the corresponding robot positions and postures are recorded. Then, a nonlinear optimization model is built based on the space orthogonal constraints and finally the interior point method is applied to iteratively obtain the optimal solution. The experimental results show that the calibration method is fast, stable and highly accurate, and the overall measurement accuracy of the system is better than 0.3 mm, which can meet the needs of conventional measurement.

**Keywords:** hand-eye calibration; three-dimensional measurement; orthogonal constraints; line structured light sensor

### 1 引言

随着工业制造的进一步发展, 机器人自动化、智

能化必将成为未来工业发展的主导。为实现复杂对象的三维数字化, 通常将线结构光传感器与工业机器

基金项目: 辽宁省教育厅基础科研项目( No.JYT2020018); 辽宁省自然科学基金项目( No.2020-MS-235); 辽宁省教育厅科学基金项目( No.LJKZ0219) 资助。

作者简介: 陈新禹( 1986-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事机器视觉, 视觉测量, 智能焊接等方面的研究。E-mail: Chensavvy@163.com

通讯作者: 张庆新( 1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事智能检测与控制, 电机及其智能控制系统的研究。E-mail: SAU\_JAYZ@163.COM

收稿日期: 2022-06-16

人相结合 构建三维全貌数字化测量系统。该类系统具有测量速度快、精度高、稳定性强等突出优点<sup>[1]</sup>。

为了将线结构光传感器的测量数据转化为机器人坐标系下的全局三维数据,需要对机器人法兰盘与传感器之间的关系进行手眼标定。目前针对线结构光传感器的手眼标定方法大致可分为以下几类:

①基于标准球体的标定<sup>[2-5]</sup>,此类方法提出将标准球体作为靶标,利用空间球体的几何特殊性与约束求解出手眼矩阵。该方法精度较高、鲁棒性好,但对靶标有着较为严苛的要求,标准球体成本较高,不易维护,甚至需要额外设备辅助完成标定,不适合现场应用;②基于主动运动的标定方法<sup>[6-7]</sup>,此类方法通过控制机器人做特定运动(定量运动和定性运动)进行标定,该方法往往忽视相机的畸变,影响手眼标定的精度,同时需要获取原始图像信息,因此并不适用于线结构光传感器的手眼标定过程;③基于迭代优化的求解方法<sup>[8-12]</sup>,此类方法通常是建立起非线性迭代的手眼模型,通过变换机器人的姿态获取数据,以拟合不同几何特性来解决标定问题,该方法精度高,但姿态角度对试验结果有一定影响;④基于定点测量的手眼标定<sup>[13-14]</sup>,该方法需要人工干预,确保机器人变动位置或姿态后传感器均能测量某一固定点,通过数学推导求解手眼矩阵,其原理简单、容易实现,但由于需要人眼对准,导致标定精度和自动化程度均不高。

综上所述,现有标定方法大多存在一定缺陷,影响机器人三维测量系统的易用性和精度。为克服上述标定方法的不足,提出一种精度高、稳定性强、无需人工参与的手眼标定方法。该方法仅需要一块具有正交约束关系的平面靶标,标定过程中控制机器人以任意不同姿态对靶标进行测量,构建正交约束模型,并利用非线性迭代法求解出手眼矩阵。

## 2 系统模型

机器人线结构光测量系统及手眼标定模型如图 1 所示。图中  $\{B\}$  表示机器人基坐标系,  $\{E\}$  表示机器人法兰盘坐标系,  $\{L\}$  是线结构光传感器坐标

系,  $P_B$  为特征点在  $\{B\}$  坐标系下的坐标,  $P_L$  表示特征点在  $\{L\}$  坐标系下的坐标,  ${}^B E T$  为  $\{E\}$  相对于  $\{B\}$  的齐次变换矩阵,可由机器人位置和姿态计算,  ${}^E L T$  是  $\{L\}$  相对于  $\{E\}$  的齐次变换矩阵,即手眼矩阵<sup>[15]</sup>。

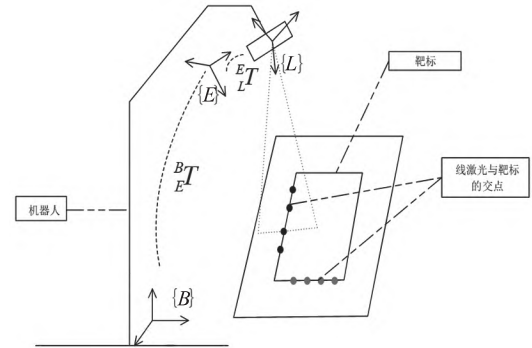


图 1 基机器人手眼标定模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of robot hand-eye calibration model

根据多自由度工业机器人的运动学理论,有下式:

$${}^B E T \times {}^E L T \times P_L = P_B \quad (1)$$

由线结构光传感器测量数据的特点,可设  $P_L = (x_l \ 0 \ z_l)^T$ ,  $P_B = (x_b \ y_b \ z_b)^T$ , 则式(1)变为:

$$\begin{bmatrix} {}^B E r & {}^B E t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^E L r & {}^E L t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ 0 \\ z_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{其中, } {}^B E r = \begin{bmatrix} {}^B E r_{11} & {}^B E r_{12} & {}^B E r_{13} \\ {}^B E r_{21} & {}^B E r_{22} & {}^B E r_{23} \\ {}^B E r_{31} & {}^B E r_{32} & {}^B E r_{33} \end{bmatrix} \text{ 和 } {}^B E t = \begin{bmatrix} {}^B E t_x \\ {}^B E t_y \\ {}^B E t_z \end{bmatrix}$$

分别为机器人位姿变换矩阵  ${}^B E T$  的平移和旋转部分,

$${}^E L r = \begin{bmatrix} {}^E L r_{11} & {}^E L r_{12} & {}^E L r_{13} \\ {}^E L r_{21} & {}^E L r_{22} & {}^E L r_{23} \\ {}^E L r_{31} & {}^E L r_{32} & {}^E L r_{33} \end{bmatrix} \text{ 和 } {}^E L t = \begin{bmatrix} {}^E L t_x \\ {}^E L t_y \\ {}^E L t_z \end{bmatrix} \text{ 分别为手眼矩阵}$$

${}^E L T$  的平移和旋转部分。

## 3 手眼标定

将公式(2)进一步整理为如下线性表达形式:

$$Ax = b \quad (3)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} {}^B E r_{11} \cdot x_l & {}^B E r_{12} \cdot x_l & {}^B E r_{13} \cdot x_l & {}^B E r_{11} \cdot z_l & {}^B E r_{12} \cdot z_l & {}^B E r_{13} \cdot z_l \\ {}^B E r_{21} \cdot x_l & {}^B E r_{22} \cdot x_l & {}^B E r_{23} \cdot x_l & {}^B E r_{21} \cdot z_l & {}^B E r_{22} \cdot z_l & {}^B E r_{23} \cdot z_l \\ {}^B E r_{31} \cdot x_l & {}^B E r_{32} \cdot x_l & {}^B E r_{33} \cdot x_l & {}^B E r_{31} \cdot z_l & {}^B E r_{32} \cdot z_l & {}^B E r_{33} \cdot z_l \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = [{}^E L r_{11} \quad {}^E L r_{21} \quad {}^E L r_{31} \quad {}^E L r_{12} \quad {}^E L r_{22} \quad {}^E L r_{32} \quad {}^E L r_{13} \quad {}^E L r_{23} \quad {}^E L r_{33} \quad {}^E L t_x \quad {}^E L t_y \quad {}^E L t_z \quad 1]^T$$

$$b = [x_b \quad y_b \quad z_b \quad 1]^T$$

$x$  由手眼矩阵元素构成且具有如下约束<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} {}^E_Lr_{11}^2 + {}^E_Lr_{21}^2 + {}^E_Lr_{31}^2 = 1 \\ {}^E_Lr_{13}^2 + {}^E_Lr_{23}^2 + {}^E_Lr_{33}^2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

设在靶标两条直角边( 分别用  $p$  和  $q$  表示) 上分别采集  $N$  组数据点并记录机器人相应位置和姿态( 建议  $N \geq 6$  以保证求解精度) 。则  $p$  边上任意两点能构成空间向量  $v_p^i$  ,共可得到  $N!$  条空间向量。同理 , $q$  边也可构成  $N!$  条空间向量  $v_q^j$  。根据向量正交性可得:

$$v_p^i \cdot v_q^j = 0 \quad (5)$$

由式 (3) 与 (5) 相结合得:

$$[(A_p^{i_1} - A_p^{i_2}) x]^T \cdot [(A_q^{j_1} - A_q^{j_2}) x] = 0 \quad (6)$$

于是 标定问题在公式 (4) 和 (6) 的共同限制下转化为公式 (7) 的最优化问题 ,该问题可采用非线性迭代法<sup>[17]</sup> 计算求解:

$$f(x)_{\min} = \sum_{i^* = 1 \text{ 且 } i_1 \neq i_2, j^* = 1 \text{ 且 } j_1 \neq j_2}^N \sum_{j^*}^N [(A_p^{i_1} - A_p^{i_2}) x]^T \cdot [(A_q^{j_1} - A_q^{j_2}) x], \text{ s. t. } \begin{cases} {}^E_Lr_{11}^2 + {}^E_Lr_{21}^2 + {}^E_Lr_{31}^2 = 1 \\ {}^E_Lr_{13}^2 + {}^E_Lr_{23}^2 + {}^E_Lr_{33}^2 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

4 实验验证和精度分析

4.1 标定实验

本文搭建的机器人三维测量系统如图 2 所示。

其中 ,运动机构采用 ABB 公司的 S7-1200 六轴工业机器人 ,重复定位精度  $\pm 0.01 \text{ mm}$ ; 线结构光传感器采用北京同舟兴业科技有限公司的 GF3-150 ,测量精度  $\pm 0.03 \text{ mm}$ ; 使用高精度数控中心加工的方形不锈钢平板作为标定靶标 ,边长为  $200 \text{ mm}$  ,直角精度优于  $\pm 0.05^\circ$ 。

标定过程中 ,任意变换机器人位置和姿态使激光线与靶标两边依次相交 ,记录激光传感器测量值与机器人相应的姿态数据 ,如表 1 每条边各采集 9 组点位数据。针对表 1 数据 ,使用本文提出的标定方法完成手眼矩阵的计算 ,并将计算结果与定点标定法<sup>[18]</sup> 进行对比 ,结果如表 2 所示。

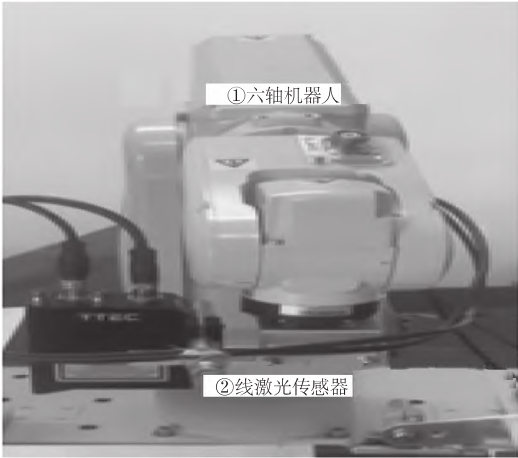


图2 机器人三维测量系统实物图

Fig.2 Physical diagram of robot 3D measurement system

表 1 标定实验数据

Tab.1 Calibration experimental data

|    | 法兰盘位置/mm |        |         | 法兰盘姿态/(°) |          |         | 传感器测量值/mm |       |         |
|----|----------|--------|---------|-----------|----------|---------|-----------|-------|---------|
| 1  | 170.208  | 4.1677 | 102.357 | 264.699   | -106.129 | 252.759 | -1.835    | 0.000 | 172.627 |
| 2  | 170.205  | 4.1554 | 102.364 | 250.512   | -105.819 | 252.745 | -2.647    | 0.000 | 172.395 |
| ⋮  | ⋮        | ⋮      | ⋮       | ⋮         | ⋮        | ⋮       | ⋮         | ⋮     | ⋮       |
| 7  | 170.226  | 4.1298 | 102.379 | 166.187   | -105.565 | 252.667 | -6.232    | 0.000 | 171.866 |
| 8  | 170.220  | 4.1241 | 102.372 | 152.271   | -105.561 | 252.667 | -6.805    | 0.000 | 171.703 |
| 9  | 176.877  | -6.485 | 8.246   | 143.302   | -79.052  | 268.148 | -2.649    | 0.000 | 172.396 |
| 10 | 176.870  | -6.492 | 8.241   | 143.325   | -91.906  | 268.143 | -3.221    | 0.000 | 172.391 |
| ⋮  | ⋮        | ⋮      | ⋮       | ⋮         | ⋮        | ⋮       | ⋮         | ⋮     | ⋮       |
| 17 | 176.848  | -6.548 | 8.267   | 143.177   | -213.687 | 268.234 | -1.835    | 0.000 | 172.627 |
| 18 | 176.842  | -6.543 | 8.264   | 143.179   | -216.681 | 268.235 | -2.642    | 0.000 | 172.393 |

表 2 手眼标定结果

Tab.2 Hand-eye calibration results

|      | 本文标定法   | 定点标定法  |
|------|---|--|
| 手眼矩阵 | $\begin{bmatrix} 0.998 & -0.021 & -0.056 & -7.806 \\ 0.001 & -9.441 & -0.331 & 123.890 \\ 0.006 & 0.331 & 0.942 & -79.412 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.993 & -0.046 & -0.049 & -7.670 \\ -0.014 & -0.901 & -0.419 & 121.357 \\ 0.011 & 0.418 & 0.907 & -78.845 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |

进一步将本文方法的标定矩阵代入公式(2), 计算 18 个测量点在机器人基坐标系下的三维坐标值, 并分别拟合直线和平面, 将点到直线和点到平面的距离作为误差分析指标。

拟合直线效果如图 3(a), 误差分布如图 3(b), 实验结果可知: 测量点到拟合直线最大误差优于 0.25 mm, 平均误差为 0.117 mm, 标准差为 0.067 mm。测量点拟合平面效果如图 4(a), 误差分布如图 4(b), 实验结果可知: 特征点到拟合平面最大误差优于 0.3 mm, 平均误差为 0.128 mm, 标准差为 0.088 mm。

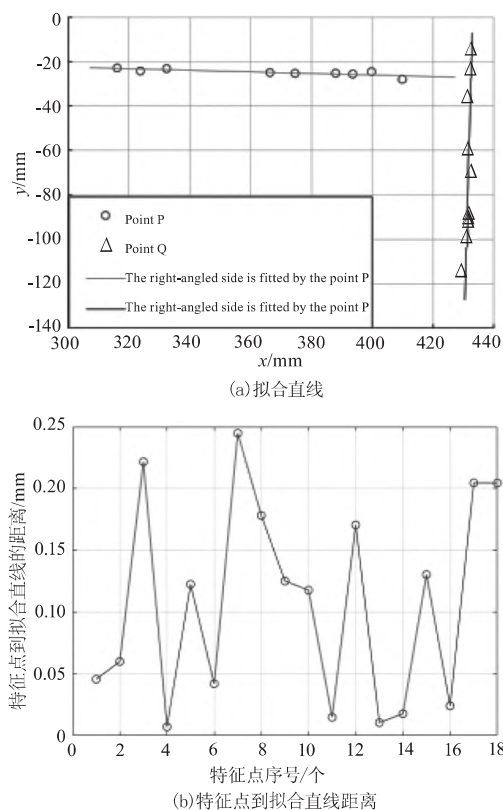


图 3 拟合直线及距离

Fig. 3 Fit straight line and distance

#### 4.2 稳定性实验

将一尖点工具 (TCP) 固定在机器人末端法兰盘

位置, 控制机器人 TCP 精准触碰固定点  $P$ , 并将此时 TCP 的坐标值作为真值, 如图 5(a)。控制机器人带动线结构光传感器, 如图 5(b), 以任意姿态测量固定点  $P$ , 并基于本文方法的标定矩阵和公式(2) 求出点  $P$  在  $\{B\}$  坐标系中的测量值  $P_B^i$ 。本文利用  $P_B^{\text{real}}$  与  $P_B^i$  之间的 3 倍标准差 ( $3\delta$  法) 对标定结果进行稳定性判定,  $3\delta$  越小说明产生异常值概率越小, 稳定性越高。

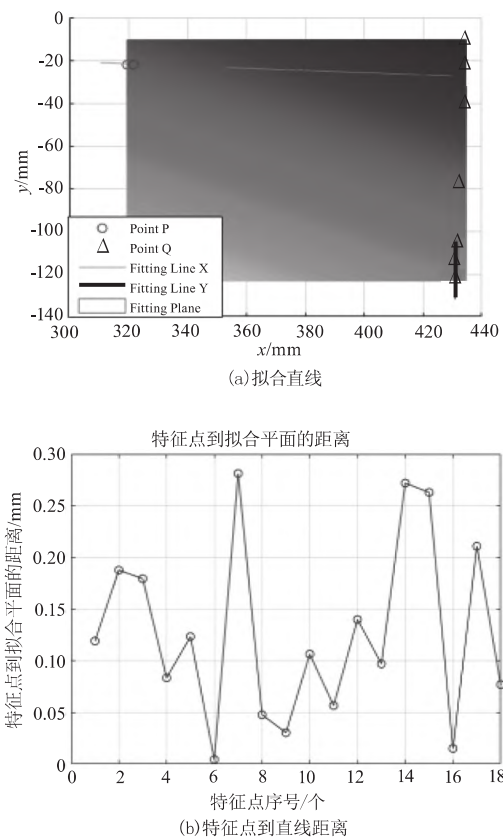
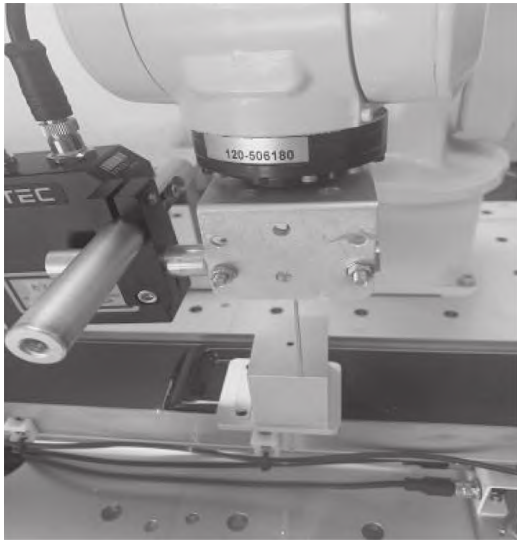


图 4 拟合平面及距离

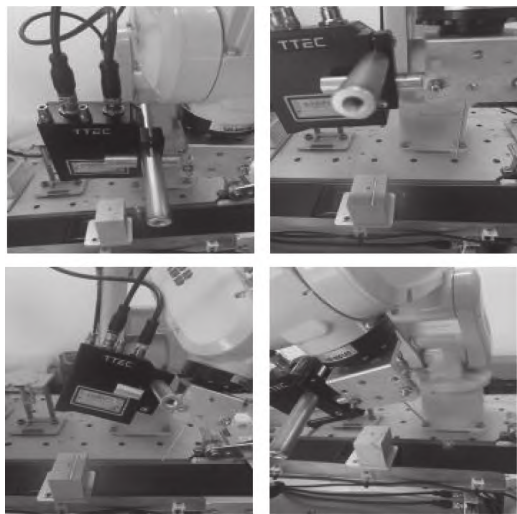
Fig. 4 Fit plane and distance

实验结果如表 3, 可以看出本文方法的单坐标轴最大  $3\delta$  约 0.4 mm, 而定点标定法的单坐标轴最大  $3\delta$  约 0.7 mm, 本文方法的稳定性明显优于定点标定法。





(a) TCP测量某定点



(b) 传感器测量某定点

图 5 实验步骤

Fig. 5 Steps of experiment

表 3 稳定性分析

Tab.3 Stability analysis

|    | 定点标定法/mm   |            |            | 本文方法/mm    |            |            |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|    | $\Delta x$ | $\Delta y$ | $\Delta z$ | $\Delta x$ | $\Delta y$ | $\Delta z$ |
| 1  | 0.129      | 0.056      | -0.301     | 0.132      | 0.129      | -0.201     |
| 2  | -0.255     | -0.125     | 0.108      | -0.059     | -0.106     | 0.192      |
| 3  | -0.298     | 0.041      | 0.231      | 0.266      | 0.017      | 0.015      |
| 4  | 0.175      | 0.118      | 0.357      | -0.109     | 0.055      | -0.023     |
| 5  | 0.306      | -0.419     | 0.116      | -0.044     | 0.078      | 0.126      |
| 36 | 0.728      | 0.582      | 0.663      | 0.421      | 0.237      | 0.406      |

4.3 三维测量实验

三维测量实验中,机器人以 10 mm/s 的速度连续运行,传感器的采样帧率为 30 f/s。首先在工作台放置一个方形标准件,其 A 和 B 两面相互垂直。

使用本文标定方法的机器人系统测量 A、B 两型面,标准工件实物和测量结果如图 6 所示。然后将 A、B 面测量数据点分别拟合平面,平面方程为:

$$\begin{cases} A: x + 0.0005813y + 0.000735z = 12.5864 \\ B: 0.0001974x + 0.0004104y + z = 170.589 \end{cases}$$

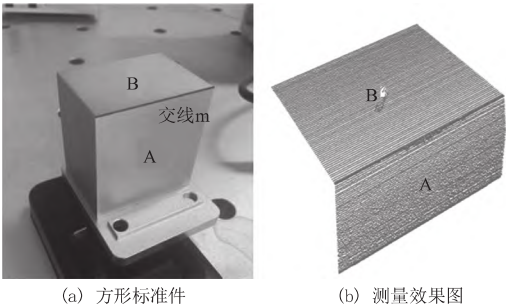


图 6 方形标准工件图

Fig. 6 Diagram of standard square workpiece

分别在 A、B 面激光束轮廓数据中各自随机选择 400 个点,计算其到拟合平面的距离,测量误差分布如图 7 所示,最大误差为 0.2 mm。

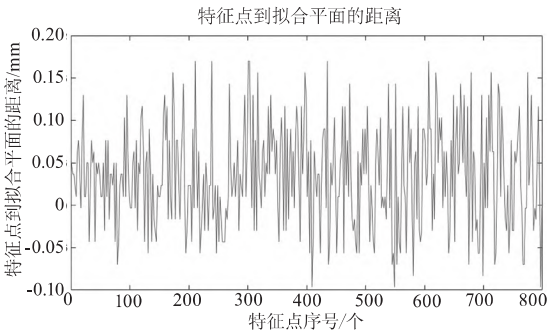


图 7 特征点到平面距离

Fig. 7 Feature point to plane distance

然后,将待测工件替换为齿形标准件,其齿间距离为 15 mm,齿尖高度 10 mm,如图 8(a) 所示。机器人和传感器以同样的参数对齿形标准件进行测量,测量数据效果如图 8(b)。将数据导入 Rapidform 软件进行分析和处理,结果为:齿间距离平均误差 0.09 mm,最大误差 0.15 mm,齿间高度平均误差 0.07 mm,最大误差 0.11 mm。

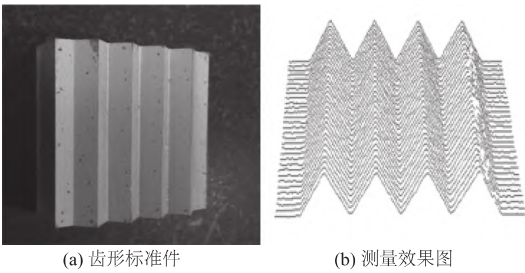


图 8 齿形标准工件图

Fig. 8 Diagram of standard tooth profile workpiece

#### 4.4 精度分析

通过上述验证,证明本文提出的标定算法切实可行且有较高的计算精度。经分析,本文算法之所以具有更高精度的主要原因包括:

1) 采用正交约束靶标,标定过程中无需人工介入,避免人为因素的不确定性影响;

2) 由于数据点可以交叉生成大量的空间向量,空间向量之间又可以交叉进行正交约束,因此少量测量数据即可获得大量计算样本,扩充数据源,保证计算精度。

#### 5 结 论

针对工业现场高精度的自动标定需求,提出一种基于空间正交约束的标定算法。与当前主流方法相比,该方法标定过程无需人工介入,避免人为因素不确定性影响,自动化程度更高。实验结果表明:该方法标定精度高,稳定性好,三维测量系统的整体精度优于 0.3 mm,可满足常规三维测量需求。同时,由于靶标上任意两点即可构成空间向量,数据样本丰富且易于采集,标定过程简单方便,鲁棒性更强。

#### 参考文献:

- [1] Chen Han, Ren Jieliang, Yan Suai, et al. Calibration algorithm of machine vision system for robotic laser additive manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52 (2): 36-41. (in Chinese)  
陈汉, 任杰亮, 闫帅, 等. 面向机器人激光增材制造的机器人视觉系统标定算法[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 36-41.
- [2] Lin Yüying, Mu Pingan. Improved hand-eye calibration method of robot based on standard ball [J]. Software Guide, 2019, 18(5): 41-43, 48. (in Chinese)  
林玉莹, 穆平安. 基于标准球的机器人手眼标定方法改进研究[J]. 软件导刊, 2019, 18(5): 41-43, 48.
- [3] Li Ziqi. Research on calibration method of large-scale measurement system based on line structured light scanning [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. (in Chinese)  
李子奇. 基于线结构光扫描的大尺寸测量系统标定方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
- [4] Wei Z Z, Zhang G J, Li X. The application of machine vision in inspecting position-control accuracy of motor control systems [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, USA: IEEE, 2001: 787-790.
- [5] Yang Shourui, Yin Sibin, Ren Yongjie, et al. Improvement of calibration method of robot flexible vision measuring system [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22 (12): 3239-3246. (in Chinese)  
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.
- [6] Lan Hai, Zhang Xi, Shang Jihui. A hand-eye calibration technology based on line scanning camera [J]. Metrology and Measurement Technology Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(5): 7-10, 15. (in Chinese)  
兰浩, 张曦, 尚继辉. 一种基于线扫描相机的手眼标定技术[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(5): 7-10, 15.
- [7] Malm H, Heyden A. A new approach to hand-eye calibration [C]//Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition, USA: IEEE, 2000: 525-529.
- [8] Liu Jianchun, Ma Zhenfei, Huang Haibin, et al. Hand-eye calibration error analysis and optimization of robot laser detection [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, (10): 79-82, 87. (in Chinese)  
刘建春, 马振飞, 黄海滨, 等. 机器人激光检测手眼标定误差分析及优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (10): 79-82, 87.
- [9] Strobl K H, Hirzinger G. Optimal hand-eye calibration [C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, USA: IEEE, 2006: 4647-4653.
- [10] Chen Xinyu, Ma Zi, Chen Tianfei. Simple calibration of line structured light sensor model [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2345-2352. (in Chinese)  
陈新禹, 马孜, 陈天飞. 线结构光传感器模型的简易标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2345-2352.
- [11] Zhang Yaru, Du Jianbin. Robot hand-eye calibration based on convex relaxation optimization algorithm [J]. Journal of Langfang Normal University: Natural Science Edition, 2020, 20(4): 26-29. (in Chinese)  
张亚如, 杜建宾. 基于凸松弛优化算法的机器人手眼标定[J]. 廊坊师范学院学报: 自然科学版, 2020, 20(4): 26-29.
- [12] Zhi Xiangyang. Extended hand-eye calibration algorithm based on convex optimization [J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(20): 148-153. (in Chinese)

- 智向阳.基于凸优化的扩展手眼标定算法[J].电子设计工程,2018,26(20):148-153.
- [13] Hong Lei, Yang Xiaolan, Wang Baosheng, et al. TCP calibration method of welding robot based on spherical uniform distribution [J]. Journal of Welding, 2020, 41(8): 14-21, 98. (in Chinese)
- 洪磊 杨小兰 王保升 等.基于球面均匀分布的焊接机器人 TCP 标定方法[J].焊接学报,2020,41(8):14-21,98.
- [14] Wei Zujie. Research on the fast teaching method of robot and the transformation of teaching pointpose [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021, (4): 267-270. (in Chinese)
- 韦祖杰.机器人快速示教方法及示教点位姿变换的研究[J].装备制造技术,2021,(4):267-270.
- [15] Lü Rui, Peng Zhen, Lü Yuanjian, et al. Hand-eye calibration algorithm of blade robot grinding and polishing system based on relocation [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(3): 339-347. (in Chinese)
- 吕睿 彭真 吕远健 等.基于重定位的叶片机器人磨抛系统手眼标定算法[J].中国机械工程,2022,33(3):339-347.
- [16] Zheng Jian, Zhang Ke, Luo Zhifeng, et al. Hand-eye calibration of welding robot based on space linear constraints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 108-113, 134. (in Chinese)
- 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.
- [17] Liu Mingbo, Chen Ying, Lin Shenghong. Comparison of interior-point linear and interior-point nonlinear programming methods for reactive power optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 39(8): 108-113, 134. (in Chinese)
- 刘明波 程莹 林声宏.求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J].电力系统自动化,2018,39(8):108-113,134.
- [18] Bin D E. Research on intelligent 3D measurement method of robot Based on line structured light vision [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- 彬德尔.基于线结构光视觉的机器人智能三维测量方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.