

文章编号: 1002-6673 (2022) 04-103-05

# 一种改进的机器人视觉点云手眼标定方法

刘明贺, 邢运隆

(沈阳建筑大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:** 本文提出一种基于视觉点云测量系统的标定方法, 设计了一套 Eye-in-Hand 手眼系统, 包含手眼关系误差与机械臂结构参数的系统误差模型, 在机器人工作空间中固定一些标定球作为实验对象, 控制机器人改变不同的空间位姿, 以不同位姿测量球心坐标。首先用机器人运动学公式得到初始的手眼关系; 之后通过系统误差模型、矩阵运算、最小二乘法等不断迭代到达预期精度。在 UR10 工业机器人进行了系统标定实验, 进行图像采集、点云处理、球心拟合等工作, 完成 Eye-in-Hand 手眼系统标定实验, 并使用激光跟踪仪完成精度验证。得出结论: 标定前后机器人在局部空间运动的距离测量标准差由 0.4963mm 降低到 0.1834mm, 充分验证了改进方法的高效性、便捷性和实用性。

**关键词:** 机械臂; 相机; 手眼标定; 视觉点云; 激光跟踪仪; 距离误差

**中图分类号:** TP242.2 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-6673.2022.04.031

## An Improved Hand Eye Calibration Method Based on Robot Vision Point Cloud

LIU Ming-He, XING Yun-Long

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning 110168, China)

**Abstract:** This paper proposes a calibration method based on the visual point cloud measurement system, and designs a set of Eye-in-Hand hand-eye system, which includes the system error model of the hand-eye relationship error and the mechanical arm structure parameters, and fixes some calibration balls in the robot workspace. The experimental object controls the robot to change different spatial poses and measure the coordinates of the center of the sphere in different poses. First, the initial hand-eye relationship is obtained with the robot kinematics formula; then, the expected accuracy is achieved through continuous iteration through the system error model, matrix operation, and least square method. A system calibration experiment was carried out on the UR10 industrial robot, image acquisition, point cloud processing, spherical center fitting, etc., the Eye-in-Hand hand-eye system calibration experiment was completed, and the laser tracker was used to complete the accuracy verification. It is concluded that the standard deviation of the distance measurement of the robot movement in the local space before and after the calibration is reduced from 0.4963mm to 0.1834mm, which fully verifies the efficiency, convenience and practicability of the improved method.

**Keywords:** Robotic arm; Camera; Hand-eye calibration; Visual point cloud; Laser tracker; Distance error

## 0 引言

在现代工业发展进程中,由于机械臂通用性强,柔性高,自动化程度高等优点,并且在高精加工领域的作用日益显著,其在工业发展中的应用和需求日益增高,工业机器人的自动化加工必将成为未来工业发展的主导<sup>[1-3]</sup>。解决工业机械臂手眼关系的精度问题成为推动机器人高精

度应用的关键一步<sup>[4-6]</sup>。

解决机器人手眼关系一直是智能加工的重要课题, Larsson S<sup>[7]</sup>提出 3D 激光扫描仪与机械臂协同工作,为解决复杂工件的扫描任务提出了一种快速、高效、易操作的方案。Roger Y<sup>[8]</sup>提出了将标定物固定在工作空间,驱动机械臂以不同空间位置对其扫描的方法,得到初步手眼关系,用解矩阵方程组问题代替手眼标定问题。用奇异值分解法求解相关矩阵<sup>[9-10]</sup>,再用卡尔曼滤波法<sup>[11]</sup>以及非线性最优化<sup>[12]</sup>方法等。

李永泉等<sup>[13]</sup>基于环路增量法,设计了平面两个自由度的并联机器人标定模型,建立了一种新型的标定实验靶板和相机针孔模型,多次迭代完成标定。许国树等<sup>[14]</sup>基于光束法平差(BA)处理微运动图像序列。基于 MDH 参数

修稿日期: 2022-03-05

项目来源: 国家自然科学基金(51975388)

作者简介: 刘明贺(1984-),男,副教授,博士。研究方向: 典型陶瓷材料精密及超精密加工技术,磨粒加工技术及表面质量;邢运隆(1997-),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为: 智能机器人。

的矩阵标定方法对噪声敏感,稳定性一般。Feng 等<sup>[15]</sup>将机械臂与相机扫描仪视作一个整体,因忽视手眼标定的系统性误差,故难以达到高精度要求。Wang 等<sup>[16]</sup>采用纸质棋盘、镜子双目测量系统完成全自动手眼全自动标定法。陈宝存等<sup>[17]</sup>基于 ROS 操作平台完成了机械臂驱动、空间规划、图像分析和标定求解等功能。Ren 等<sup>[18]</sup>首次采用靶球作为扫描对象,通过改变机械臂的位姿变化得到多组数据计算可得到各个坐标系之间的空间位置关系。

本文提出了一种改进的基于视觉点云的手眼关系测定方法。基于机器人运动学模型得到初始的手眼关系矩阵;然后使用标定球作为标定参照物,结合标定球约束同时标定机器人运动学结构参数误差和手眼关系误差,最终实现机器人结构参数的准确更新并得到更精准的手眼关系。实验采用 UR10 机械臂作为实验平台,使用 ArgusTools, CloudCompare 和 GeomagicStudio 等软件对 Eye-in-Hand 手眼系统进行实验,对标定球进行扫描,完成图像和数据的采集和处理,拟合出标定球得到球心坐标信息,再用激光跟踪仪完成验证实验进一步提高了本方案的科学性和有效性。

## 1 标定过程

### 1.1 设备及对应坐标系

整个实验设备见图 1,本文设计了一套 Eye-in-Hand 手眼标定系统,将扫描仪,即相机固定在机械臂末端的法兰盘上,等离子枪即“手”也固定在法兰盘上,其中的测量系统的坐标系包括:整个实验平台的基坐标系记为  $F_B$ ,末端法兰盘坐标系记为  $F_M$ ,相机坐标系记为  $F_C$ ,目标物坐

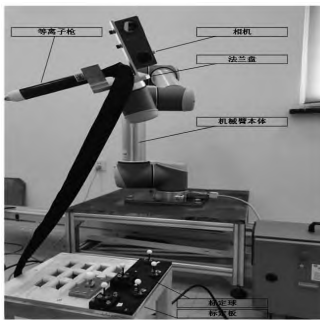


图 1 实验设备  
Fig.1 Experiment apparatus

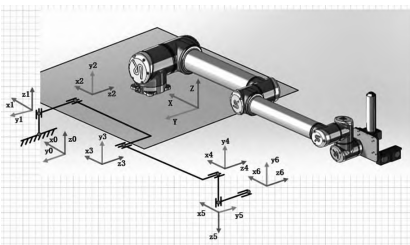


图 2 机器人初位置  
Fig.2 The initial position of the robot

标系记为  $F_W$ ,手坐标系记为  $F_H$ ,相机扫描得到的球心坐标  $P_C$  与基坐标系下球心坐标  $P_B$  有如式(1)的关系:

$$P_B = {}^B_M T \cdot {}^M_H T \cdot {}^H_C T \cdot P_C \quad (1)$$

其中  $P_C = [X_C, Y_C, Z_C, 1]^T$ ,  $P_B = [X_B, Y_B, Z_B, 1]^T$ ;  ${}^B_M T$ —法兰盘

坐标系相对于机器人基坐

标系的转换矩阵;

${}^M_H T$ —手坐标系相对于法兰盘坐标系的坐标转换关系;

${}^H_C T$ —机器人相机坐标系相对于手坐标系之间的转换矩阵,即

手眼关系。

### 1.2 手眼关系初步标定

为得到准确的手眼关系,就是要实现相机坐标系和手坐标系在工作空间中的准确转换。本文通过驱动机械臂带动相机对空间某一固定点进行多次变位姿测量,再用最小二乘法计算,得到初步手眼关系。

由式(1)可知,工作空间中点  $P_B = [X_B, Y_B, Z_B]^T$  与在相机坐标系下的坐标  $P_C = [X_C, Y_C, Z_C]^T$  满足以下关系:

将式(1)展开得

$$P_B = R_0 \cdot R_C \cdot P_C + R_0 \cdot D_C + D_0 \quad (2)$$

式中:  $R_0$ —机器人在当前位姿下末端坐标系相对于基坐标系的旋转矩阵;  $D_0$ —水平运动矩阵,相机坐标系到手坐标系的转动和平动可记为  $R_C, D_C$ 。

对空间中的某个固定测量点,通过驱动机械臂运动,先进行单独平移运动,即关节角不变,进行多次测量得到:

$$\begin{cases} PB_1 = R_1 \cdot R_C \cdot P_C + R_1 \cdot D_C + D_1 \\ PB_2 = R_2 \cdot R_C \cdot P_C + R_2 \cdot D_C + D_2 \\ \dots\dots \\ PB_n = R_n \cdot R_C \cdot P_C + R_n \cdot D_C + D_n \end{cases} \quad (3)$$

因多次测量该参考点时,机器人姿态不变,则有  $R_0 = R_1 = R_2 = \dots = R_n, R_{Cn}$  同理。

取其中两式作差可得:

$$R_n \cdot R_C \cdot (P_C - P_{C2}) + D_1 - D_2 = 0 \quad (4)$$

再用到  $R_n$  的正交矩阵性质可得:

$$R_C \cdot [P_C - P_{C2} \dots P_{C1} - P_{Cn}] = R_n^T \cdot [D_2 - D_1 \dots D_n - D_1] \quad (5)$$

其中令  $M_1 = [P_C - P_{C2} \dots P_{C1} - P_{Cn}]$ , 等式右边记为  $M_2$  则等到矩阵方程  $R_C \cdot M_1 = M_2$ , 分解奇异值得:

$$R_C = VU^T \quad (6)$$

记  $V, U$  为  $M_1 M_2^T$  矩阵的左右奇异值矩阵。

上文讨论了姿态不变的情况,如果目标点测量过程中,关节角、姿态发生变化则取式(3)中两式相减可得:

$$(R_2 - R_1) \cdot D_C = R_1 \cdot R_C \cdot P_C - R_2 \cdot R_C \cdot P_C + D_1 - D_2 \quad (7)$$

对同一固定参考点多次测量之后得到

$$M_1 \cdot D_C = M_2^T \quad (8)$$

采用最小二乘法求解则:

$$D_C = (M_1^T \cdot M_1)^{-1} \cdot M_1^T \cdot M_2^T \quad (9)$$

综上,得到原始的手眼关系矩阵  ${}^H_C T$ 。

本文以标定球的球心作为标定点,初步的手眼关系标定方法较为简单,易于操作、计算,也对复杂的计算过程以及方程组问题进行了简化和优化计算。同时使用控制器控制 UR10 机械臂单一平动和转动都非常方便准确,复合运动的精度也尚可,故可以快速得到初始的相机和手之间的关系矩阵即手眼关系。但该算法通过机器人运动学模型计算机器人的手的位姿,与实际手的位姿必然存在系统误差和其他偏差,且控制机器人平动时产生

的微小震动所引起的误差也不能忽略,因此下一步就着手于改正手眼关系误差以及机器人运动学结构参数误差,从而得到更精准的手眼关系矩阵。

### 1.3 误差修正

为提升手眼关系矩阵的精度,采用如下方法:由式(1)得机械臂在不同空间位姿下测得的球心理论位置记为:

$$\begin{cases} P_{Bp}' = {}^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot {}^H T_c' \cdot P_{Cp}' \\ P_{Bq}' = {}^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot {}^H T_c' \cdot P_{Cq}' \end{cases} \quad (10)$$

式中  $P_C$  为球心在相机坐标系下的位置;  ${}^B T$ —法兰盘坐标系相对于基坐标系的转换矩阵;  ${}^H T$ —手坐标系相对于法兰盘坐标系的转换关系;  ${}^H T_c$ —初始手眼关系矩阵。

由于系统误差和手眼关系误差的存在,因此标定球的实际球心位置记为:

$$\begin{cases} P_R' = ({}^B T_q + \delta_H^B T_q) \cdot ({}^H T_c + \delta_C^H T_c) \cdot P_{Cq}' \\ P_R' = ({}^B T_p + \delta_H^B T_p) \cdot ({}^H T_c + \delta_C^H T_c) \cdot P_{Cp}' \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\delta_C^H T$ —手眼关系的偏差;  $\delta_H^B T$ —机械臂坐标系间的转换误差;  $P_R$ —标定球球心的实际位置坐标。因此把标定球的球心坐标的理论与实际位置坐标的偏差进行作差:

$$P_R' - P_{Bp}' = {}^B T_p \cdot \delta_C^H T \cdot P_{Cp}' + \delta_H^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cp}' + \delta_H^B T_p \cdot \delta_C^H T \cdot P_{Cp}' \quad (12)$$

$$\text{又因 } \delta_C^H T = {}^H T \cdot \delta_C^H T$$

$${}^B T_p \cdot \delta_C^H T \cdot P_{Cp}' = {}^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot \delta_C^H T \cdot P_{Cp}' = {}^B T_p \cdot \sigma_C^H T \cdot P_{Cp}' \quad (13)$$

其中,  $P_{Cp}' = [X_{Cp}, Y_{Cp}, Z_{Cp}, 1]^T$

$$\sigma_C^H T = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma Z & \sigma Y & \delta X \\ \sigma Z & 0 & -\sigma X & \delta Y \\ -\sigma Y & \sigma X & 0 & \delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

因此,式(13)可进一步写为

$$\begin{aligned} {}^B T_p \cdot \delta_C^H T \cdot P_{Cp}' &= {}^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot \sigma_C^H T \cdot P_{Cp}' \\ &= {}^B T_p \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{Cp} & -Y_{Cp} \\ 0 & 1 & 0 & -Z_{Cp} & 0 & X_{Cp} \\ 0 & 0 & 1 & Y_{Cp} & -X_{Cp} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta P_{1 \times 3} \\ \sigma P_{1 \times 3} \end{bmatrix} = {}^B T_p \cdot \bar{P}_p \cdot \delta P \end{aligned} \quad (15)$$

此时取  ${}^B T_p$  矩阵中的旋转矩阵  ${}^B R_p$ , 根据机器人微分运动学关系,则机器人运动学参数误差为:

$$\delta_H^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cp}' = \delta_H^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cp}' \quad (16)$$

同理,其中  $P_{Bp}' = [X_{Bp}, Y_{Bp}, Z_{Bp}, 1]^T$

$$\delta_H^B T = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma Z & \sigma Y & \delta X \\ \sigma Z & 0 & -\sigma X & \delta Y \\ -\sigma Y & \sigma X & 0 & \delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \delta_H^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cp}' &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & Z_{Bp} & -Y_{Bp} \\ 0 & 1 & 0 & -Z_{Bp} & 0 & X_{Bp} \\ 0 & 0 & 1 & Y_{Bp} & -X_{Bp} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta P_B \\ \sigma P_B \end{bmatrix} \\ &= Q_p \cdot \delta P_p = Q_p \cdot J_p \cdot \delta \bar{P} \end{aligned} \quad (18)$$

显然式(18)等式右侧为机器人误差模型。

由于标定球始终固定,故无论机械臂以何种姿态带动相机运动,标定球球心的在空间中真实位置应相同,计算时忽略影响较小的高次项,机械臂处于不同姿态时,其位置偏差为:  $(P_R - P_p)$  和  $(P_R - P_q)$ 。球心的理论实际位置的偏差如下计算,作差得:

$$P_p - P_q = [{}^B T_q \cdot P_q - {}^B T_p \cdot P_p, Q_q \cdot J_q - Q_p \cdot J_p] \cdot \begin{bmatrix} \delta P \\ \delta \bar{P} \end{bmatrix} \quad (19)$$

模型中需求出的几个机械臂平动转动误差  $\delta P$ 。以及机械臂的模型参数偏差  $\delta \bar{P}$

$$\text{令 } U_{pq} = [{}^B T_q \cdot P_q - {}^B T_p \cdot P_p, Q_q \cdot J_q - Q_p \cdot J_p], V_{pq} = P_p - P_q, \delta Y = \begin{bmatrix} \delta P \\ \delta \bar{P} \end{bmatrix}, \text{又由于 } U, V \text{ 都是 } n \text{ 维列向量。即 } V = \begin{bmatrix} V_{pq1} \\ \vdots \\ V_{pqn} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} U_{pq1} \\ \vdots \\ U_{pqn} \end{bmatrix}$$

则式(19)可改写为:

$$V = U \cdot \delta Y \quad (20)$$

又由于系数矩阵  $U$  的条件数较大,故设定一个误差极值,采用SVD分解法解决。

$$\delta Y = (J \cdot S \cdot K^T) \cdot V \quad (21)$$

式中:  $J, K$  分别为  $U$  的左右奇异阵;  $S$ —设定误差极限后的矩阵。将求得的结构参数误差和手眼关系误差带入初始误差模型计算得标定误差,则对空间中同一固定位置标定球的球心距的均方根误差计算如下:

$$\varepsilon = \left( \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{q=p+1}^n ({}^B T_q \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cq} - {}^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cp})^T \cdot ({}^B T_q \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cq} - {}^B T_p \cdot {}^H T_c \cdot P_{Cp}) \right) / \sqrt{n(n-1)/2-1} \quad (22)$$

为了进一步优化流程,得到更准确的手眼关系,采用图3所示的流程进行计算。综合考虑系统误差和结构参数误差,如机械臂重复定位精度误差,绝对定位精度误差,相机的扫描精度误差,球心的计算精度等。

可根据不同精度需求选取合适的误差阈值,在迭代过程中当满足标定误差小于阈值时,完成标定,完成误差修正和参

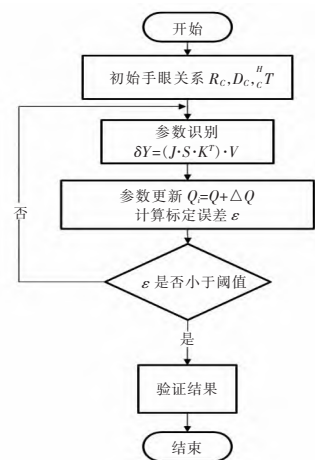


图3 标定流程图  
Fig.3 Calibration flow chart



数补偿。

## 2 实验及结果分析

### 2.1 相机扫描原理

相机扫描半径为  $R$  的球面,在相机坐标系下记扫描平面为  $X=0$ ,经过点云处理和最小二乘拟合得到半径为  $r$  的圆弧。其中圆心在相机坐标系下的坐标  $P_{01}=(X_{01},Y_{01},Z_{01})$ 。圆心  $O_1$  和球心  $P_{02}=(X_{02},Y_{02},Z_{02})$  满足以下关系: $X_{02}=X_{01}\pm\varphi$ ,圆和球在  $Y,Z$  方向量均相等即  $Y_{02}=Y_{01},Z_{02}=Z_{01}$ ,其中: $\varphi=(R^2-r^2)^{1/2}$ 。

将标定球固定在如图 4 所示的位置,展开实验,多次移动机械臂以不同角度不同高度,完成相机对标准球的扫描工作。

### 2.2 实验过程

相机与计算机连接后,打开 CloudCompare 软件并保持运行稳定,在不同角度扫描标定球,保存图像见图 5。

在使用 Argus Tools 软件处理图像,得到如图 6 所示的标定球和标定板的扫描图像。

之后使用 Geomagic Studio 软件将多余点云删除,保留标定球点云信息,见图 7。



图 4 标定球固定位置  
Fig.4 Fixed position of calibration ball

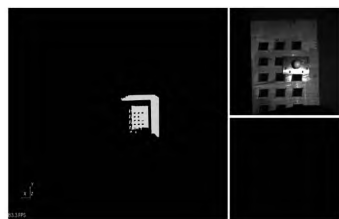


图 5 图像采集  
Fig.5 Image Acquisition

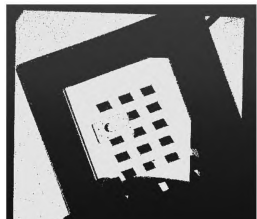


图 6 相机扫描结果  
Fig.6 Camera scan results

最后用 CloudCompare 软件打开已修改好文件格式,并处理完好的点云,进行球心拟合见图 8,图 9,重复以上操作得到每次在不同位置拍照所测量的标定球球心坐标,进行记录。

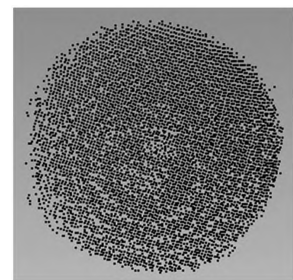


图 7 标定球点云  
Fig.7 Points cloud of calibration sphere

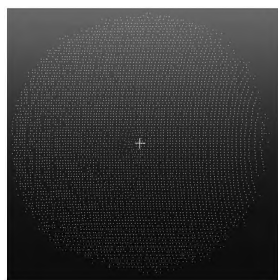


图 8 处理点云  
Fig.8 Process points cloud

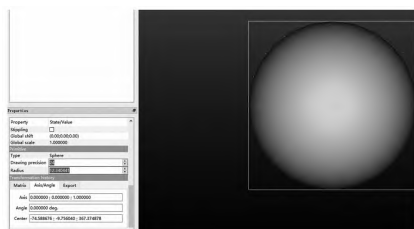


图 9 拟合球心坐标

Fig.9 Fit sphere center coordinates

通过机械臂的转动数据按式(6)求解得出  $R_c$ ,通过平动数据式(9)计算  $D_c$ ,得到初步手眼关系矩阵:

$${}^c_H T_{im} = \begin{bmatrix} -0.0351 & -0.0442 & -0.9984 & -122.257 \\ 0.0076 & -0.9990 & 0.0440 & -48.196 \\ -0.9994 & -0.0060 & 0.0354 & 49.046 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在机械臂运动空间中,控制机械臂运动使其在  $X,Y,Z$  三个轴方向上都有合适的运动。并保持相机和标定球在  $\pm 40^\circ$  的范围内扫描采点。把每个测量位置的多组数据作差得到方程(19)。按式(21)解得模型误差,对模型补偿后按式(22)标定误差,达到设定阈值时结束迭代运算。其中标定误差阈值取 0.16mm,计算手眼关系为:

$${}^c_H T_{im} = \begin{bmatrix} -0.0328 & -0.0652 & -0.9104 & -122.517 \\ 0.0098 & -0.8990 & 0.0410 & -47.896 \\ -0.9612 & -0.0101 & 0.0354 & 48.961 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对空间中一固定球,在不同角度扫描测量球心距离时,其理论值应为零。由于误差存在,标定前后每个标定球位置测量的球心距见图 10 所示。球心距误差的平均值从 1.6119mm 降低到 0.3435mm,球心距误差的标准差由 0.4963mm 降低到 0.1834mm。

## 3 对比验证

### 3.1 5球系统的验证

可采用如图 11 所示的 5 球系统作为测量对象,通过测出 5 个球心坐标,5 球之间的相互距离与实际距离做对比。可验证手眼关系更新后,测量的距离误差的改变。

通过测量标定前后 5 个标定球任意两球之间的距离,得出各球间的球心距误差的平均值由 1.6274mm 降低到 0.3807mm,球心距误差的标准差由 0.3232mm 降低到 0.1551mm。

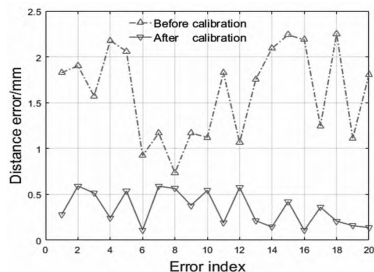


图 10 标定球距离误差  
Fig.10 Calibration ball distance error



图 11 5 球系统  
Fig.11 5-ball system

表1 五球球心数据

Tab.1 Five ball center data

	标定前			标定后		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	903.656	71.129	-47.301	902.128	71.205	-46.876
2	786.986	62.109	-46.986	785.128	62.205	-46.906
3	631.158	74.986	-46.159	632.228	75.105	-46.796
4	849.251	138.981	-46.274	850.098	139.301	-46.699
5	710.659	136.209	-47.299	708.908	136.951	-47.011

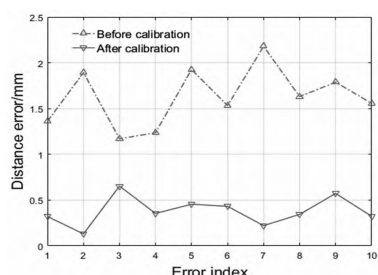


图12 5球间距离误差

**Fig.12 Distance error between 5 balls** 还可采用激光跟踪仪对标定后的手眼关系进行进一步验证,本实验采用 Leica 960 激光跟踪仪,该设备以其精度高、效率高、实时跟踪准确、便于装

卸、易于操作等优点而被广泛的应用到工业测量中,测量待测点的空间三维坐标。

激光跟踪仪可测量动静态小球,信号平行反射到跟踪头上。把靶球固定在机械臂末端,当靶球移动时,控制器发出信号自动调整激光方向对准靶球。返回的测量激光与参考激光进行干涉,根据干涉的原理可以得出靶球到跟踪头的距离,跟踪头两个轴上的角度编码器可以得到目标位置相对于激光跟踪头的角度,有了距离和角度就可计算出测量点在激光跟踪仪坐标系下的空间位置坐标。

控制机械臂运动在空间中随机确定一个位姿,把此时靶球作为定点。则在随机移动或转动机械臂,记录不同位姿下靶球的位置信息。以激光跟踪仪测量的在两个不同扫描位置下的球心距离作为理论值,对比参数补偿前后的手眼关系与机器人运动学模型参数,把不同坐标系测量的球心距离作差,见图 13。距离误差的平均值由 1.6771mm 降低到 0.3398mm,标准差由 0.3747mm 降低到 0.1507mm。

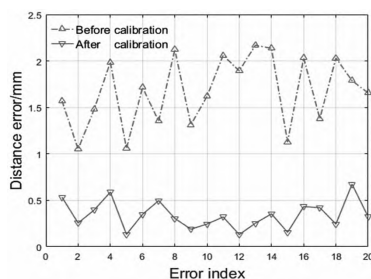


图13 靶球距离误差

**Fig.13 Range error of target ball** 本文提出的这种改进的机械臂手眼关系标定方法,基于视觉点云的优化和图像处理便于操作、易于实现,建立了机械臂结构参数误差和手眼关系误差的误差模型,通过标定多个运动参数和结构参数提高了手眼关系的精度。在 UR10 工业机器人这个实验平台上,将相机固定在机械臂末端法兰盘上,构建了 Eye-in-Hand 实验系统,采用相机扫描标定球拟合出球心坐标。

### 3.2 激光跟踪仪验证

还可采用激光跟踪仪对标定后的手眼关系进行进一步验证,本实验采用 Leica 960 激光跟踪仪,该设备以其精度高、效率高、实时跟踪准确、便于装

卸、易于操作等优点而被广泛的应用到工业测量中,测量待测点的空间三维坐标。

激光跟踪仪可测量动静态小球,信号平行反射到跟踪头上。把靶球固定在机械臂末端,当靶球移动时,控制器发出信号自动调整激光方向对准靶球。返回的测量激光与参考激光进行干涉,根据干涉的原理可以得出靶球到跟踪头的距离,跟踪头两个轴上的角度编码器可以得到目标位置相对于激光跟踪头的角度,有了距离和角度就可计算出测量点在激光跟踪仪坐标系下的空间位置坐标。

控制机械臂运动在空间中随机确定一个位姿,把此时靶球作为定点。则在随机移动或转动机械臂,记录不同位姿下靶球的位置信息。以激光跟踪仪测量的在两个不同扫描位置下的球心距离作为理论值,对比参数补偿前后的手眼关系与机器人运动学模型参数,把不同坐标系测量的球心距离作差,见图 13。距离误差的平均值由 1.6771mm 降低到 0.3398mm,标准差由 0.3747mm 降低到 0.1507mm。

## 4 结论

本文提出的这种改进的机械臂手眼关系标定方法,基于视觉点云的优化和图像处理便于操作、易于实现,建立了机械臂结构参数误差和手眼关系误差的误差模型,通过标定多个运动参数和结构参数提高了手眼关系的精度。在 UR10 工业机器人这个实验平台上,将相机固定在机械臂末端法兰盘上,构建了 Eye-in-Hand 实验系统,采用相机扫描标定球拟合出球心坐标。

标定前后测量距离的标准差由 0.4963mm 降低到 0.1834mm。标定后的手眼系统,相机扫描和测量的精度得到很大提升。

### 参考文献:

- [1] 马常友,高海波,丁亮,等.机器人末端执行器自更换机构设计及对接策略[J].吉林大学学报(工学版),2019,6.
- [2] 任永杰,郝继贵,杨学友,等.利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J].机械工程学报,2007,9.
- [3] Lou Y,Chen T,Wu Y. Improved and Modified Geometric Formulation of POE Based Kinematic Calibration of Serial Robots[C]// 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 11-15, 2009, St. Louis, MO, USA. IEEE, 2009.
- [4] 刘强,杨道国,郝卫东.UR10 机器人的运动学分析与轨迹规划[J].机床与液压,2019,17.
- [5] He Ruiho,Li Xiwen,Shi Tielin,Wu. A kinematic calibration method based on the product of exponentials formula for serial robot using position measurements[J]. Robotica, 2014, 33(6).
- [6] Hu Yan,Gao Feng,Zhao Xianchao. Kinematic calibration of a 6-DOF parallel manipulator based on identifiable parameters separation (IPS)[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 126.
- [7] Larsson S,Kjellander J AP. An Industrial Robot and a Laser Scanner as a Flexible Solution Towards an Automatic System for Reverse Engineering of Unknown Objects [C]ASME, Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2004: 341-350.
- [8] Roger Y.Tsai,Reimar Lenz. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration. [J]. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1989, 5(3).
- [9] Jack C. K. Chou. Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions [J]. The International Journal of Robotics Research, 1991, 10(3).
- [10] Zhao Z,Liu Y. A hand-eye calibration algorithm based on screw motions[J]. Robotica, 2009, 2.
- [11] 陈天飞,汪洋,陈余庆,等.一种基于级联滤波的手眼在线标定方法[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(S1):138-142.
- [12] Zhao Zijian,Weng Ying. A flexible method combining camera calibration and hand-eye calibration[J]. Robotica, 2013, 5.
- [13] 李永泉,王皓辰,张阳,等.一种基于手眼视觉的并联机器人标定方法[J].中国机械工程,2020,6.
- [14] 许国树,言勇华.一种基于场景特征的工业机器人手眼自动标定方法[J].机械设计与研究,2019,6.
- [15] Feng Chun,Wu Hong-tao,Qiao Bing. Combining camera calibration with hand-eye calibration and using in monocular vision[C]. International Conference on Computer Mechatronics, Control and Electronic Engineering. IEEE, 2010: 21-24.
- [16] Wang Haixia,Lu Xiao,Hu Zhanyi. A vision-based fully-automatic calibration method for hand-eye serial robot[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015, 42(1).
- [17] 陈宝存,吴巍,郭毓.基于 ROS 的机器人自动手眼标定系统设计[J].计算机仿真,2020,2.
- [18] Ren YongJie,Yin ShiBin,Zhu JiGui. Calibration technology in application of robot-laser scanning system [J]. Optical Engineering, 2012, 51(11).