

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210826

# 一种结合 TCP 标定的深度相机手眼标定方法\*

毛成林<sup>1,2</sup>, 于瑞强<sup>2</sup>, 宋爱国<sup>1</sup>

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096; 2. 亿嘉和科技股份有限公司 南京 210012)

**摘要:**手眼标定是机器人实现视觉引导下精准作业中的关键技术。传统手眼标定和机器人工具中心点(TCP)标定分开进行,存在较大累积误差,同时针对深度相机的手眼标定存在精度不足的缺点。本文提出了一种结合 TCP 标定过程同步标定深度相机手眼关系的新方法。方法基于深度相机观测和 TCP 标定相同的标定平面,相机坐标系下标定平面方程和机械臂坐标系下标定平面方程为对应关系,通过平面方程之间的变换来计算手眼关系。本文方法减少了 TCP 和手眼关系独立标定累积误差影响,节约标定时间和标定件成本。仿真和实测结果表明,本文方法提高了深度相机手眼标定精度,标定后实测位置误差平均为 0.2 mm,为机器人视觉控制系统高精度作业所需标定提供了一种新的思路。

**关键词:** 机器人 TCP 标定;深度相机;手眼标定;位姿测量

**中图分类号:** TP242.6 TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.10

## A hand-eye calibration method of depth camera combined with TCP calibration

Mao Chenglin<sup>1,2</sup>, Yu Ruiqiang<sup>2</sup>, Song Aiguo<sup>1</sup>

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. Yijiahe Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

**Abstract:** The hand-eye calibration is a key technology in robot vision guided precision operation. The traditional hand-eye calibration and the robot tool center point (TCP) calibration are carried out separately, which has a large cumulative error. Meanwhile the hand-eye calibration for depth cameras has a disadvantage of insufficient accuracy. In this article, a new method for simultaneous calibration of hand-eye relationship of depth camera and TCP calibration is proposed. Based on the calibration plane in the camera coordinate system and the calibration plane in the robot arm coordinate system are actually the same plane, and the hand-eye relationship is calculated through the transformation between the two plane equations. This method reduces the cumulative error effect of independent calibration of TCP and hand-eye relationship, and saves calibration time and calibration cost. The results of simulation and measurement show that the proposed method can improve the hand-eye calibration accuracy of depth camera, and the average measured position error after calibration is 0.2 mm, which provides a new idea for the calibration required for high-precision operation of the robot vision control system.

**Keywords:** robot TCP calibration; depth camera; hand-eye calibration; pose measurement

## 0 引 言

典型的视觉引导机器人(vision guided robot, VGR)系统<sup>[1]</sup>通常由相机、机器人和目标物体组成。机器人在机械臂的法兰上安装不同的工具,在视觉引导下完成各种任务。对于 VGR 系统,利用相机感知工作空间中操作

对象和障碍物的位姿是必不可少的一环。手眼标定用于确定机器人末端执行器(“手”)坐标系与相机(“眼”)坐标系两者之间的变换关系,是实现上述功能的首要任务。

手眼标定通过获取标定件(代表为高精度棋盘格)在机器人坐标系和相机坐标系下的对应位姿数据集进行求解。现阶段通常有两类方法来解决这一问题。第一类将问题表述为求解方程  $AX = XB^{[2]}$ , 机器人手臂

收稿日期:2022-12-04 Received Date: 2022-12-04

\* 基金项目:江苏省科技成果转化专项资金(BA2020006)、2021年度江苏省博士后科研资助计划(2021K352C)项目资助

需要被摆成两个及以上不同的姿势,由于标定件在机器人坐标系中被观测到的位姿相同,以此获取机器人“手”在机器人坐标系下的相对运动  $A$ , 和标定件在相机“眼”坐标系下的相对运动  $B$ , 从而求解“手”坐标系与“眼”坐标系之间的齐次变换矩阵  $X$ 。当前已经开发了许多方法来求解此方程,包括基于四元数<sup>[3]</sup>、对偶四元数<sup>[4]</sup>、欧几里得群<sup>[5]</sup>、运动结构<sup>[6]</sup>、非线性求解器<sup>[7]</sup>的方法,等等。

第二类将问题表述为求解方程  $AX=YB$ <sup>[8]</sup>, 同时计算手眼变换关系  $X$ , 以及标定件与机器人基坐标系之间的位姿变换  $Y$ 。其中  $A$  表示机器人基坐标系到机器人“手”坐标系的变换关系,  $B$  表示标定件到相机“眼”坐标系的变换关系。目前此方程的求解方法主要分为3类:两步法、单步法和迭代法。两步法先求解变换的姿态旋转矩阵,再求解平移向量。Wu等<sup>[9]</sup>首先假定  $X$  中的旋转矩阵为一个非正交  $3 \times 3$  矩阵,然后将该矩阵的解作为旋转矩阵的解。单步法同时求解  $X$  中的旋转矩阵和平移向量。张召瑞等<sup>[10]</sup>通过融合机器人手臂的旋转运动约束信息和纯平移运动约束信息,精确求得手眼变换矩阵。迭代法利用非线性迭代方法逐步对标定方程中的旋转矩阵和平移向量进行迭代优化。Li等<sup>[11]</sup>基于李群李代数的概率统计方法进行求解。

除了高精度的手眼标定外,工具中心点(tool center point, TCP)标定也是导致VGR系统不准确的典型原因。TCP代表机器人末端执行器上和操作对象实际接触的位置,它的标定精度直接影响操作的质量。TCP标定可以分为两类。第一类方法使用高精度测量设备在世界坐标系中跟踪TCP,比如Cheng<sup>[12]</sup>设计的DynaCal校准系统。第二类方法通过移动机器人并让TCP接触某些特定点上来手动完成,包括参照点<sup>[13]</sup>、参照球面<sup>[14]</sup>和参照平面<sup>[15-16]</sup>。

对于VGR系统,相机的观测结果最终用于控制末端执行器的到达位置。然而现在的学术和工业界通常将相机的手眼标定和末端执行器的TCP标定分开进行。两次标定耗费大量时间,而且标定的误差是独立的,叠加在一起会造成整个系统更大的误差。有一些研究尝试同时进行TCP标定和手眼标定,杜惠斌等<sup>[17]</sup>利用安装在机器人末端法兰上的3D打印标定球作为标定件,来控制机械臂运动,并从深度摄像头获取标定球的位置计算手眼关系和标定球的真实TCP。然而此种方法一方面需要特定的标定球,同时标出的TCP也只能是标定球的位置。

深度相机,代表是Microsoft的Kinect相机和Intel的RealSense相机,可以同时获取彩色和深度图像,被广泛应用于协作型机器人。此类相机通常出厂时已标定了深度传感器和彩色传感器之间的坐标系转换关系。但是深

度相机彩色图像的分辨率较低,通过彩色图像进行手眼标定的方法存在精度不足的缺点<sup>[17]</sup>。

本文针对深度相机手眼标定研究,提出了一种结合TCP标定过程同步标定深度相机手眼关系的新方法,在TCP标定的同时使用深度相机观测同一标定平面,同时标定TCP和手眼关系,以减少误差累积,同时节约标定时间和标定件成本。

## 1 基于平面的TCP标定方法

基于平面的TCP标定方法保持机械臂基坐标系静止,利用一个相对机械臂基坐标系固定不动的平板(标定平面)来进行标定<sup>[16]</sup>。该方法分为如下两步:

1)保持机械臂法兰姿态不变,仅进行位置移动。移动法兰从而使末端执行器TCP接触固定的标定平面。当接触发生时,记录此时法兰在机械臂基坐标系下的位置。多次重复这一操作,从而获得多个法兰位置。由于法兰姿态是固定的,所以对坐标点进行最小二乘法平面拟合,拟合出来的平面与标定平面平行。

设机械臂基坐标系下标定平面方程为  $ax+by-z+d=0$ , TCP标定中获得的机械臂基坐标系下拟合平面方程为  $ax+by-z+d_1=0$ ,其中平面法向量  $\vec{n}=(a,b,-1)$ ,法兰的位置记为  $\vec{P}=(P_x, P_y, P_z)^T$ , 有:

$$\vec{n} \times \vec{P} + d_1 = 0 \quad (1)$$

应用最小二乘法可得:

$$\begin{bmatrix} \sum P_x^2 & \sum P_x P_y & \sum P_x \\ \sum P_x P_y & \sum P_y^2 & \sum P_y \\ \sum P_x & \sum P_y & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum P_x P_z \\ \sum P_y P_z \\ \sum P_z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

应用QR分解可求出  $(a, b, d_1)$ ,  $\vec{n}$  为对向量  $(a, b, -1)$  归一化。

2)改变机械臂法兰的位姿,移动法兰使TCP接触固定的标定平面,则有:

$$[a, b, -1, d] \times \begin{bmatrix} \mathbf{R}_B^W & \mathbf{T}_B^W \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{TCP} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{R}_B^W$  代表机械臂基坐标系下该组位姿法兰的  $3 \times 3$  旋转矩阵,  $\mathbf{T}_B^W$  代表机械臂基坐标系下该组位姿法兰的  $3 \times 1$  平移向量。  $\mathbf{R}_B^W, \mathbf{T}_B^W, \vec{n}$  为已知量。  $\mathbf{P}_{TCP}$  为所求解的TCP标定值,为  $3 \times 1$  向量。使用任意两组位姿方程相减消去  $d$  可得:

$$\vec{n} \times (\mathbf{R}_{B(i)}^W - \mathbf{R}_{B(j)}^W) \times \mathbf{P}_{TCP} = \vec{n} \times (\mathbf{T}_{B(i)}^W - \mathbf{T}_{B(j)}^W) \quad (4)$$

问题转化为  $AX=B$  的形式,其中  $A = \vec{n} \times (\mathbf{R}_{B(i)}^W - \mathbf{R}_{B(j)}^W)$ ,  $B = \vec{n} \times (T_{B(i)}^W - T_{B(j)}^W)$ ,  $X = P_{TCP}$ 。

测量  $m$  组位姿,可以写成超定方程:

$$\tilde{A} \times P_{TCP} = \tilde{B} \quad (5)$$

其中,  $\tilde{A} \in \mathbb{R}^{m \times 3}$ ,  $\tilde{B} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 。应用 QR 分解可求解  $P_{TCP}$ 。解出  $P_{TCP}$  后,代回标定平面方程可求解出  $d$ :

$$d = - \frac{\sum_{i=1}^m (\vec{n} \times \mathbf{R}_{B(i)}^W \times P_{TCP} + \vec{n} \times T_{B(i)}^W)}{m} \quad (6)$$

此方法的标定精度可以达到 0.5 mm<sup>[16]</sup>。

## 2 两阶段深度相机同步手眼标定方法

本文提出了一种在进行 TCP 标定的同时同步标定深度相机手眼关系的新方法,无需额外的标定件。主要思想是利用深度相机观测和 TCP 标定相同的标定平面,相机坐标系下标定平面方程和机械臂坐标系下标定平面方程实际为同一平面,通过两者之间的变换来计算手眼关系。所述算法是一种两阶段的方法,先标定手眼关系中深度相机相对于机械臂法兰的旋转矩阵  $\mathbf{R}_C^B$ ,再标定相机相对于法兰的平移向量  $T_C^B$ 。

所述算法流程如图 1 所示。图中左边一列和中间一列分别展示了第 1 节中 TCP 标定方法的步骤 1) 和 2),右边一列为本文算法的创新,本文算法对第 1 节中步骤 2) 进行修改:

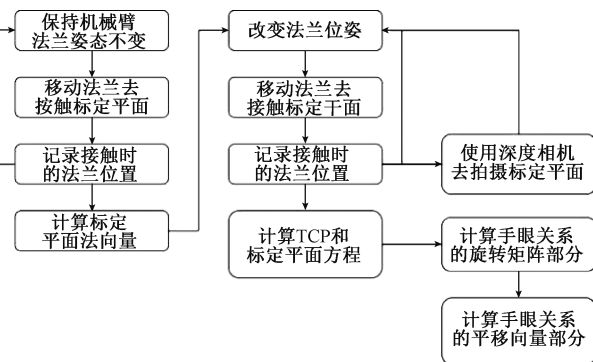


图 1 算法流程

Fig. 1 The algorithm flow chart

改变机械臂法兰的位姿,移动法兰使 TCP 接触固定的标定平面,同时使用深度相机拍摄标定平面,并在相机坐标系中计算标定平面方程。计算方法与式(2)相同。然后按照以下步骤进行手眼校准。

### 2.1 求解旋转矩阵 $\mathbf{R}_C^B$

设从深度相机观测得到的相机坐标系下平面方程为  $a'x + b'y - z + d' = 0$ , 平面法向量  $\vec{n}' = (a', b', -1)$ ,

则有:

$$\mathbf{R}_B^W \times \mathbf{R}_C^B \times (\vec{n}')^T = (\vec{n})^T \quad (7)$$

可通过以下方法计算法向量  $\vec{n}$  和  $\vec{n}'$  之间的旋转四元数  $q$ :

$$q = [1 + \vec{n} \cdot \vec{n}', \vec{n} \times \vec{n}'] \quad (8)$$

$$q = \text{normalize}(q) \quad (9)$$

$q$  满足如下方程:

$$q \times (\vec{n}')^T = (\vec{n})^T \quad (10)$$

将旋转四元数转换为旋转矩阵  $\text{rot}$ , 再代入式(7), 则有:

$$\mathbf{R}_C^B \times (\vec{n}')^T = (\mathbf{R}_B^W)^{-1} \times \text{rot} \times (\vec{n}')^T \quad (11)$$

方程被转换为  $X'C = D$  的形式,其中  $C = (\vec{n}')^T$ ,  $D = (\mathbf{R}_B^W)^{-1} \times \text{rot} \times (\vec{n}')^T$ ,  $X' = \mathbf{R}_C^B$ 。因为  $C \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ,  $X' \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , 为解决矩阵不满秩的问题,取 3 组姿态,列出如下方程:

$$\widehat{\mathbf{R}}_C^B \begin{bmatrix} C_1^T \\ C_2^T \\ C_3^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1^T \\ D_2^T \\ D_3^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

假设一共取了  $m$  组位姿,共有  $C_m^3$  组解,对所有解计算重投影误差:

$$\widehat{\mathbf{R}}_C^B = \min_{C_m^3} \sum_{i=1}^N (\widehat{\mathbf{R}}_C^B(k) \times C_i - D_i) \quad (13)$$

注意到式(13)无法保证  $\widehat{\mathbf{R}}_C^B$  为旋转矩阵,可以通过正交化步骤将  $\widehat{\mathbf{R}}_C^B$  投影成一个最近似的旋转矩阵。一种方法是使用 SVD 分解:

$$\widehat{\mathbf{R}}_C^B = USV^T \quad (14)$$

最近似的旋转矩阵为<sup>[18]</sup>:

$$\mathbf{R}_C^B = \text{sign}(\det(S)) UV^T \quad (15)$$

### 2.2 求解平移向量 $T_C^B$

对于机械臂坐标系中标定平面上任一点  $p_w$ , 存在如下坐标转换关系:

$$p_w = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_B^W & T_B^W \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{R}_C^B & T_C^B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I} & T_O^C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $T_O^C$  为深度相机坐标系下观测到的目标  $p_w$  位置。展开得:

$$p_w = \mathbf{R}_B^W \times \mathbf{R}_C^B \times T_O^C + \mathbf{R}_B^W \times T_C^B + T_B^W \quad (17)$$

因为需要满足平面约束,故有:

$$\vec{n} \times p_w + d = 0 \quad (18)$$

展开得:

$$\vec{n} \times \mathbf{R}_B^W \times T_C^B = -d - \vec{n} \times T_B^W - \vec{n} \times \mathbf{R}_B^W \times \mathbf{R}_C^B \times T_O^C \quad (19)$$

方程被转换为  $EX'' = F$  的形式。其中  $E = \vec{n} \times R_B^W$ ,  $F = -d \vec{n} \times T_B^W - \vec{n} \times R_B^W \times R_C^B \times T_O^C$ ,  $X'' = T_C^B$ 。对于  $m$  次测量,可以写成超定方程:

$$\tilde{E} \times T_C^B = \tilde{F} \quad (20)$$

其中,  $\tilde{E} \in \mathbb{R}^{m \times 3}$ ,  $\tilde{F} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ , 可以用 QR 分解求解出  $T_C^B$ 。

## 3 实验

### 3.1 仿真实验结果及分析

本节通过仿真实验验证上述方法的有效性。仿真实验用 MATLAB R2018a 编程。在仿真实验中,手眼标定的真值设为:

$$R_C^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, T_C^B = \begin{bmatrix} 0.0325 \\ 0.27 \\ 0.0438 \end{bmatrix} \quad (21)$$

TCP 标定的真值设为:

$$P_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.345 \end{bmatrix} \quad (22)$$

仿真中,设定深度相机获取的深度误差( $z$  方向)为  $-3 \sim 3$  mm 之间的随机误差, $xy$  方向为  $-1.5 \sim 1.5$  mm 之间的随机误差(符合 3.2 节使用的 Intel RealSense d435 相机在物距为 25~50 cm 的实际表现),设定 TCP 标定时检测接触点的测量误差为  $0 \sim 0.2$  mm 和  $0 \sim 0.5$  mm<sup>[16]</sup>(因为接触点不可能越过标定平面,故不会为负值)。每次标定设置 30 个 TCP 接触点和手眼采样姿态点,进行 50 次仿真随机计算。

当 TCP 测量误差为  $0 \sim 0.2$  mm 时,最终获得的手眼关系平均标定值为:

$$R_C^B = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0002 & 0.0001 \\ -0.0002 & -1.0000 & 0.0001 \\ 0.0001 & -0.0001 & -1.0000 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$T_C^B = \begin{bmatrix} 0.03256 \\ 0.26997 \\ 0.04382 \end{bmatrix}$$

当 TCP 测量误差为  $0 \sim 0.5$  mm 时,最终获得的手眼关系平均标定值为:

$$R_C^B = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0005 & 0.0003 \\ -0.0005 & -1.0000 & 0.0004 \\ 0.0003 & -0.0004 & -1.0000 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$T_C^B = \begin{bmatrix} 0.03267 \\ 0.26997 \\ 0.04384 \end{bmatrix}$$

姿态的平均计算方式是先和真值计算误差,再将误差转换为欧拉角,进行均值计算后,再转换为旋转矩阵,叠加回真值上。可见使用带噪声的数据测量出的手眼标定矩阵和真值较为接近,任一轴平移向量平均测量误差在 0.2 mm 以内,旋转矩阵转换为欧拉角,任一轴平均测量误差在  $0.035^\circ$  以内。

定义标定误差为测量值和真值之间的欧氏距离(将姿态误差转换为欧拉角再计算)。TCP 测量误差采用  $0 \sim 0.5$  mm,50 次标定的误差分布取欧氏距离(为便于展示,由于位置的误差同时存在于  $x, y, z$  三个维度,姿态的误差同时存在于  $rx, ry, rz$  三个维度,故采用欧氏距离,位置的误差表示为  $\sqrt{x^2+y^2+z^2}$ ,姿态的误差表示为  $\sqrt{rx^2+ry^2+rz^2}$ ,后文均同)如图 2 所示,可见单次的平移向量测量误差在 1.5 mm 以内,旋转矩阵误差在  $0.3^\circ$  以内。

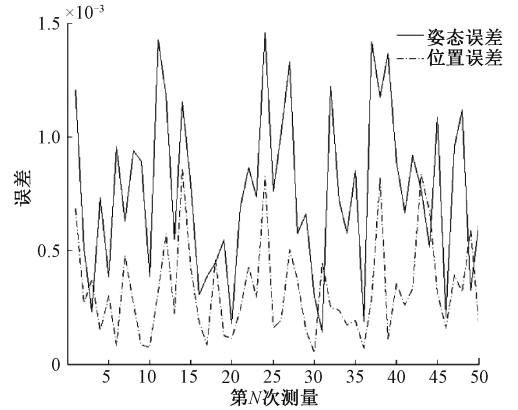


图2 50次测量误差分布

Fig. 2 50 measurement error distribution

将 TCP 接触点和手眼采样姿态点的个数分别设置成 10, 15, 20, 25, 30 个,并进行仿真计算。定义标定误差为测量值和真值之间的欧氏距离(将姿态误差转换为欧拉角再计算)。TCP 测量误差采用  $0 \sim 0.5$  mm,标定误差分布如图 3 所示。可见采样姿态个数越高测量精度越高,当个数达到 25 个以上时误差趋于稳定。

在仿真实验中,总共测试了 200 组不同的真值,TCP 范围设为  $0.1 \sim 0.4$  m, TCP 标定时测量误差设为  $0 \sim 0.2$  mm,手眼标定的位置向量范围设为  $0.02 \sim 0.3$  m,姿态向量范围(欧拉角)设为  $0.05^\circ \sim 2^\circ$ ,采样点数设置为 30 个,每组真值计算 20 次取平均,测试结果如表 1,单次的平移向量测量误差在 0.75 mm 以内,旋转矩阵误差在  $0.02^\circ$  以内。

### 3.2 实测实验结果及分析

本节利用 Universal-Robot-UR5 机械臂和 Intel RealSense d435 深度相机对上述手眼标定方法做了实验验证。试验装置实体照片如图 4(a),末端执行器上深度

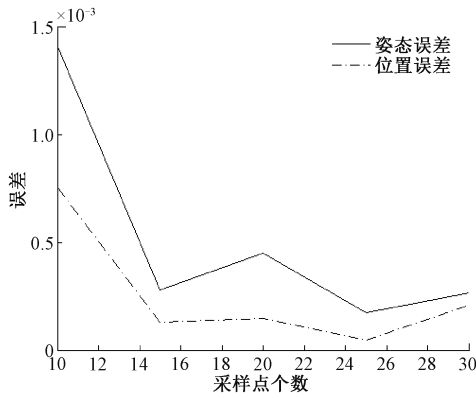


图3 不同采样点个数对标定精度的影响

Fig. 3 The influence of the number of samples on the calibration accuracy

表1 200组手眼标定仿真测量误差

Table 1 200 groups of hand-eye calibration simulation measurement error

误差类别	最大误差	最小误差	平均误差	标准差
平移向量/mm	0.74	0.050 0	0.220	0.114 5
旋转矩阵/(°)	0.02	0.000 4	0.005	0.002 4

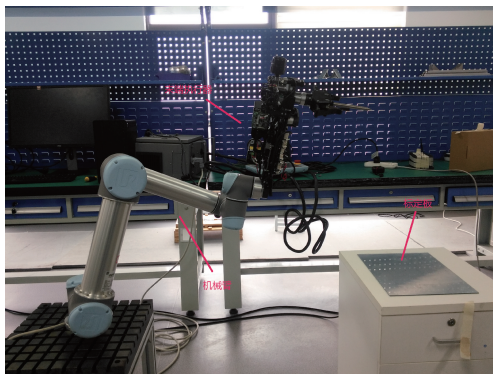
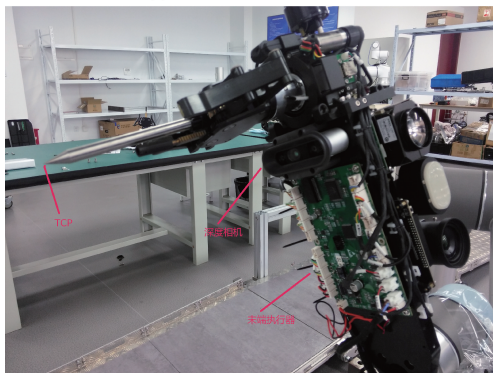
(a) 试验装置  
(a) Experimental device(b) 末端执行器  
(b) End effector

图4 实验装置和末端执行器示意

Fig. 4 Experimental device and end effector

相机和工具安装位置如图4(b)所示。算法运行环境为Ubuntu 16.04, CPU Intel I7-8665U, RAM 8 GB。

UR5机械臂各向重复定位精度为0.1 mm, d435深度相机分辨率为848×480。当TCP接触标定平面时,深度相机需要安装在距离标定平面可测量范围内。当物距为25~50 cm时, d435深度相机在z方向测量精度为±3 mm, xy方向测量精度为±1.5 mm。

具体实验过程按照图1的流程进行:首先按照图1的最左列,控制机械臂法兰以同一姿态移动,使工具的TCP点接触标定板(图5(c)),记录机械臂坐标系下的法兰坐标,拟合平面法向量(图5(a));然后按照图1的中间列,通过程序控制机械臂法兰到达不同末端姿态,使得工具的TCP点接触标定板(使用压力传感器来计算接触时刻,图5(c)),记录此时机械臂坐标系下的法兰的坐标(图5(b)),计算TCP和机械臂坐标系下标定平面方程;同时按照图1的最右列,使用深度相机拍摄同一块标定板,基于点云库(point cloud library, PCL)<sup>[19]</sup>从深度图上自动计算相机坐标系下标定板的平面方程(图5(b));最后基于式(13)和(20)计算TCP和手眼关系。

由于在实测实验中无法直接测量手眼关系和TCP的绝对真值,首先利用所述算法标定出TCP和手眼关系,标定值为:

$$\mathbf{P}_{TCP} = \begin{bmatrix} 0.000\ 3 \\ 0.328\ 9 \\ 0.273\ 4 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_C^B = \begin{bmatrix} 0.034\ 2 \\ 0.273\ 7 \\ 0.044\ 3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{R}_C^B = \begin{bmatrix} -1.026\ 8 & 0.009\ 7 & -0.003\ 2 \\ 0.007\ 6 & -1.022\ 1 & -0.016\ 0 \\ -0.005\ 9 & -0.012\ 0 & 0.998\ 4 \end{bmatrix}$$

然后使用一个高精度棋盘格对算法进行验证,一方面用视觉直接识别棋盘格深度相机坐标系中每个角点的坐标,并计算角点在机械臂基坐标系下的相应坐标 $\mathbf{p}_w$ (式(16))。另一方面用末端执行器TCP去接触棋盘格的角点,并利用TCP计算角点在机械臂基坐标系下的坐标 $\mathbf{p}'_w = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_B^W & \mathbf{T}_B^W \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{P}_{TCP} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。选取居中的24个点比较两者间的欧氏距离。实验结果如表2所示。可见两者间的位置误差最小为0.03 mm,最大为0.40 mm,平均为0.2 mm,具有良好的操作指导意义。

本文提出的方法利用TCP标定方法<sup>[16]</sup>标定出的TCP值作为真值,在此基础上和MATLAB工具箱中提供的Wengert手眼标定算法<sup>[20]</sup>进行了比较(表2),可见在以标定出的TCP值作为真值的前提下,本文算法获得了更高的精度。

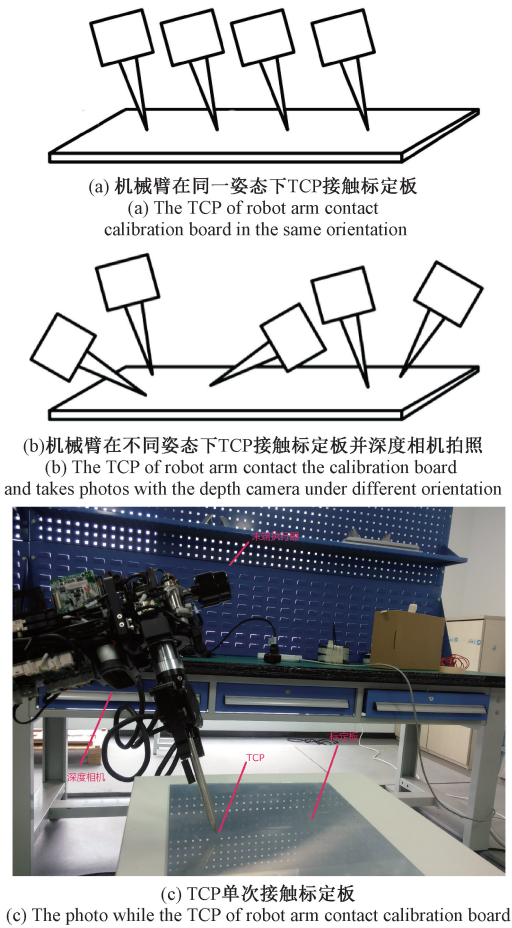


图 5 标定操作过程示意

Fig. 5 Diagram of calibration operation process

表 2 TCP 校准结果与手眼校准结果(本文方法和 Wengert 方法)之间的误差

Table 2 The error between the TCP calibration results and the hand-eye calibration result (the proposed method and Wengert's method)

对比方法	最大误差	最小误差	平均误差	标准差
本文方法	0.40	0.03	0.2	0.000 7
Wengert 方法	1.00	0.10	0.5	0.001 8

## 4 结 论

当前深度相机的手眼标定存在精度不足的缺点,同时传统手眼标定和 TCP 标定分开进行,存在较大累积误差。针对这一问题本文提出了一种结合 TCP 标定过程同步标定深度相机手眼关系的新方法,基于深度相机观测和 TCP 标定相同的标定平面,通过机械臂坐标系和相机坐标系下平面方程之间的变换来计算手眼关系。在减

少 TCP 标定和手眼标定误差累积影响的同时,节约标定时间和标定件成本。仿真和实测结果表明,本文方法针对深度相机手眼标定具有较高的精度,同时也为机器人视觉控制系统高精度作业所需标定提供了一种新的思路。

另一方面,从标定的原理和过程可以看出,算法首先依赖于机械臂的运动,因此对机械臂的绝对定位精度提出了要求;算法同时利用深度相机测量标定板所在平面,因此对深度相机精度也有一定要求。这本质上是将整个系统做了一定的耦合,利用手眼标定的精度去适配硬件的精度,从而使系统整体精度得到提高。因此可以在提高硬件的精度方向上展开进一步的工作,从而使手眼标定的精度也得到提高。

## 参考文献

[ 1 ] AGRAWAL A, SUN Y, BARNWELL J, et al. Vision-guided robot system for picking objects by casting shadows [ J ]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29(2-3) :155-173.

[ 2 ] SHIU Y C, AHMAD S. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX=XB$  [ J ]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(1) :16-29.

[ 3 ] CHOU J C K, KAMEL M. Finding the position and orientation of a sensor on a robot manipulator using quaternions [ J ]. The International Journal of Robotics Research, 1991, 10(3) :240-254.

[ 4 ] DANILIDIS K. Hand-eye calibration using dual quaternions [ J ]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(3) :286-298.

[ 5 ] PARK F C, MARTIN B J. Robot sensor calibration: Solving  $AX = XB$  on the Euclidean group [ J ]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5) :717-721.

[ 6 ] ANDREFF N, HORAUD R, ESPIAU B. Robot hand-eye calibration using structure-from-motion [ J ]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(3) :228-248.

[ 7 ] HORAUD R, DORNAIKA F. Hand-eye calibration [ J ]. The International Journal of Robotics Research, 1995, 14(3) :195-210.

[ 8 ] ZHUANG H, ROTH Z S, SUDHAKAR R. Simultaneous robot/world and tool/flange calibration by solving homogeneous transformation equations of the form  $AX=YB$  [ J ]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(4) :549-554.

[ 9 ] WU L, REN H L. Finding the kinematic base frame of a robot by hand-eye calibration using 3D position data [ J ].

- IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1):314-324.
- [10] 张召瑞, 张旭, 郑泽龙, 等. 融合旋转平移信息的机器人手眼标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11):2443-2450.
- [11] LI H Y, MA Q L, WANG T M, et al. Simultaneous hand-eye and robot-world calibration by solving the  $AX=YB$  problem without correspondence [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 26(1):231-239.
- [12] CHENG F S. The method of recovering robot TCP Positions in industrial robot application programs [C]. 2007 International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, Aug. 2007: 805-810.
- [13] JOOCHIM C, KAEWKORN S, KUNAPINUN A. The 9 points calibration using SCARA robot [C]. 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C), IEEE, 2019.
- [14] HONG L, JI B, SHEN J, et al. Algorithm research for an industrial robot TCP position calibration[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(3):81-85.
- [15] HAN F, LI P, TAN D, et al. Method of using flat plate as calibration tool for robot tool center point calibration[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(1):60-67.
- [16] CAKIR M, DENIZ C. High precise and zero-cost solution for fully automatic industrial robot TCP calibration [J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2019, 46(5):650-659.
- [17] 杜惠斌, 宋国立, 赵忆文, 等. 利用3D打印标定球的机械臂与RGB-D相机手眼标定方法[J]. 机器人, 2018, 40(6):69-76.
- [18] UMEYAMA S. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(4):376-380.
- [19] RUSU R B, COUSINS S. 3D is here: Point cloud library (pcl) [C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China:IEEE, 2011: 1-4.
- [20] WENGERT C, REEFF M, CATTIN P C, et al. Fully

automatic endoscope calibration for intraoperative use[C]. Bildverarbeitung für die Medizin 2006; Algorithmen Systeme Anwendungen Proceedings des Workshops vom 19.-21, März 2006 in Hamburg, Springer Berlin Heidelberg, 2006: 419-423.

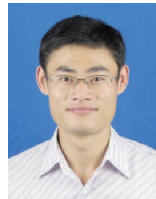
## 作者简介



**毛成林**, 2008年于中国科学技术大学获得学士学位, 2013年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为东南大学与亿嘉和科技股份有限公司联合培养博士后, 主要研究方向为视觉伺服、机械臂操作。

E-mail: rodineye@qq.com

**Mao Chenglin** received his B. Sc. degree from the University of Science and Technology of China in 2008, and received his Ph. D. degree from the University of Science and Technology of China in 2013. He is currently a postdoctoral fellow jointly trained by Southeast University and Yijiahe Technology Co., Ltd. His main research interests include visual servo and robotic arm operation.



**于瑞强**, 2009年于青岛理工大学获得学士学位, 2013年于南京邮电大学获得硕士学位, 现为亿嘉和科技股份有限公司产品总监, 主要研究方向为电子信息工程。

E-mail: yuruiqiang@yijiahe.com

**Yu Ruiqiang** received his B. Sc. degree from Qingdao University of Technology in 2009, and received his M. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2013. He is currently the product director at Yijiahe Technology Co., Ltd. His main research interest is electronic information engineering.



**宋爱国**(通信作者), 1993年于南京航空航天大学获得硕士学位, 1996年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授, 主要研究方向为遥操作技术、人机交互、康复机器人等。

E-mail: a. g. song@seu. edu. cn

**Song Aiguo** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Nanjing Aeronautics and Astronautics University in 1993, and received his Ph. D. degree from Southeast University in 1996. He is currently a professor at Southeast University. His main research interest includes teleoperation technology, human computer interaction, rehabilitation robot, etc.