

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.021

基于激光测距仪的视觉对准技术研究*

刘 幸¹, 张爱军^{1*}, 曹小兵²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210000; 2. 无锡职业技术学院 控制技术学院, 江苏 无锡 214121)

摘要:针对机械臂末端视觉系统的姿态校正问题,提出了一种借助激光测距仪实现视觉对准的技术。首先建立了相机成像模型和手眼关系模型,利用标定方法分别求解了相机标定和手眼标定;然后建立了机械臂末端激光测距仪位置标定模型,利用基于平面约束的非线性优化算法,求解了机械臂末端法兰坐标系下激光源坐标和激光光束的单位方向向量;最后建立了视觉对准模型,对投射到目标平面上的激光点拟合了平面方程,并获得了平面单位法向量;结合手眼关系和对准关系,运用优化算法求解了机器人姿态修正角,将该姿态角发送给机器人,使其调整末端位姿,最终实现了相机平面与目标平面的对准。研究表明:相机姿态在 10° 范围内校正误差为 0.6° 以内,相比于基于 PNP 原理的姿态校正方法,该技术具有更高的精度和更好的稳定性。

关键词:单目视觉;工业机器人;激光测距仪标定;姿态校正

中图分类号:TP242;TH711

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)10-1244-07

Visual alignment technology based on laser rangefinder

LIU Xing¹, ZHANG Ai-jun¹, CAO Xiao-bing²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;

2. School of Control Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121 China)

Abstract: Aiming at the posture correction of the vision system at the end of the manipulator, a technique of vision alignment with laser rangefinder was proposed. Firstly, the camera imaging model and the hand-eye relation model were established. Then the position calibration model of the laser rangefinder at the end of the manipulator was established and the nonlinear optimization algorithm based on plane constraint was used to solve the laser source coordinates and the unit direction vector of the laser line in the coordinate system of the end flange of the manipulator. Finally, a vision alignment model was established. The plane equation was fitted to the laser points projected on the target plane and the plane unit normal vector was obtained. Combined with the hand-eye relationship and the alignment relationship, an optimization algorithm was used to solve the posture correction angle of the robot, and the posture angle was sent to the robot to adjust the end pose to finally align the camera plane with the target plane. The results indicate that the camera attitude correction error within 10° is within 0.6° , and it has higher precision and better stability compared with the posture correction method based on PNP principle.

Key words: monocular vision; industrial robots; calibration of laser rangefinder; posture correction

0 引言

基于视觉的测量技术是通过相机获取图像,来实现对工件尺寸或空间位姿进行测量的技术^[1],具有非

接触、精度高、实时性强等优点^[2-3]。其中的视觉对准技术可实现相机平面与工件平面平行,两者平行后可获取无形变的工件图像,以用于图像处理。目前常见的实现视觉对准的方法有基于 PNP (Perspective N Points) 的位姿校正方式^[4]、基于陀螺仪和激光靶标方

收稿日期:2019-12-20

基金项目:江苏省自然科学基金青年项目(BK20190738)

作者简介:刘幸(1995-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail:liuxingmailbox@163.com

通信联系人:张爱军,男,副教授,硕士生导师。E-mail:zhangaijun@njut.edu.cn

式^[5]等。该技术在喷涂、钻孔、抓取等领域应用广泛,研究该技术具有重要意义^[6]。

针对视觉对准技术,很多学者都对此进行了大量研究。王中宇等学者^[7]对传统 PNP 位姿求解方法进行改进,根据工件上共面 4 个特征点之间位置关系,结合特征点的空间坐标和像素坐标求解出物体相对于相机的初始位姿,再利用优化算法求解出了最佳位姿,该方法在求解精度和抗噪能力上都优于传统的 EPNP 算法、两点一线算法和 P3P 算法。雷金周等人^[8]通过特制的手眼标定板求解工业机器人末端执行器与单目相机之间的手眼关系,并获得了工件对准时的基准位姿,再利用 PNP 原理迭代调整机器人末端位姿从而实现了机械臂末端的对准轴与工件目标的精确对准,实验表明该方法对准精度在 0.2° 以内。高学海等学者^[9]基于单目相机和激光测距仪提出了一种空间矩形平面的位姿测量算法,该算法根据矩形物体 4 个顶点的图像坐标、激光点的图像坐标和激光测距结果,即能计算出相机坐标系下物体的位姿,模拟实验表明该算法的有效性和可行性。WANG Hai-liang^[10]等学者设计了一种包含相机和激光测距仪的姿态测量装置,推导了一种新的共线性方程形式,改进了单像空间后方交会算法,实现了目标物体相对于相机的姿态估计,模拟实验表明该方法的姿态数据 RMS 误差小于 0.8° 。

笔者提出一种基于激光测距仪的视觉对准技术,该技术将相机和激光测距仪固定在机械臂末端,通过相关算法实现相机平面与目标平面对准功能。

1 系统结构与视觉标定

1.1 系统介绍与坐标系定义

基于激光测距仪的视觉对准系统^[11]由六轴机器人、工业相机、激光测距仪、标定板、电脑等组成,该系统为 Hand-In-Eye 模型,在安装相机和激光测距仪时保证两者朝向相同。

其系统结构示意图如图 1 所示。

图 1 中各坐标系定义为:机器人基坐标系为 $O_B X_B Y_B Z_B$,该坐标系位于机器人的基座处;相机坐标系为 $O_C X_C Y_C Z_C$,原点位于相机透镜中心,其中 $X_C O_C Y_C$ 平面与成像面平行, Z_C 轴垂直于成像面朝外;机械臂末端法兰坐标系为 $O_H X_H Y_H Z_H$,原点位于法兰盘中心,且 $X_H O_H Y_H$ 平面与法兰盘平面重合, Z_H 轴垂直法兰盘平面朝外。

1.2 相机标定

相机标定是对相机成像模型参数解算,即解算相

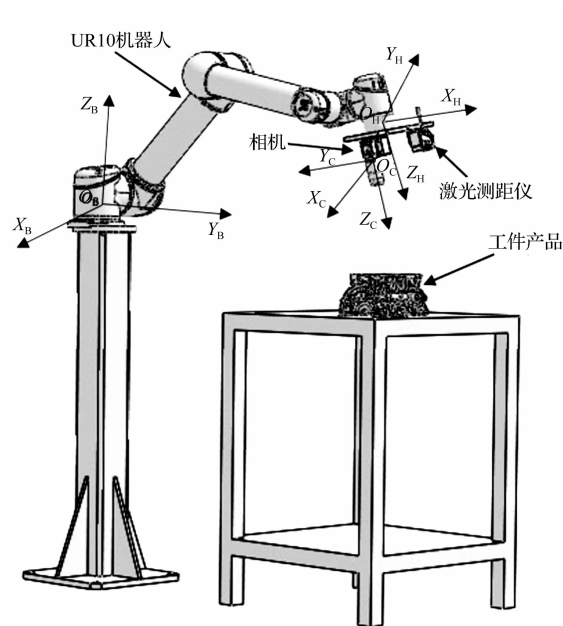


图 1 系统结构示意图

机内参、外参和畸变参数。目前广泛使用的相机模型为小孔透视成像模型,如图 2 所示。

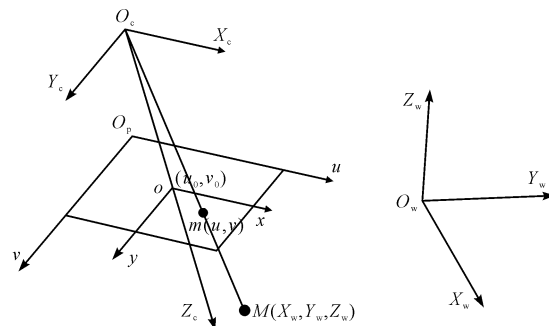


图 2 相机成像模型

M —世界坐标系一点; m — M 点在成像面上的像点

图 2 中,图像像素坐标系为 $O_p uv$,原点位于图像的左上角,图像水平方向为 u 轴,竖直方向为 v 轴;图像物理坐标系为 O_{xy} ,原点位于图像上特定位置, x 轴和 y 轴分别平行于 u 轴和 v 轴。相机坐标系的坐标原点 O_C 与 O 的连线距离为相机的焦距 f 。

齐次坐标下相机的成像原理可表示为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $(X_w Y_w Z_w)$ —空间点 M 在世界坐标系的坐标; (u, v) —点 M 成像点的像素坐标; (u_0, v_0) —图像平面的主点坐标; s —尺度因子; f_u, f_v —图像在 u 轴和 v 轴的尺度因子; $f_u = f/dx, f_v = f/dy; dx, dy$ —每一像素在 x 轴和 y 轴方向上的物理尺寸; R —外参旋转矩阵; t —外参平移向量; M_1, M_2 —相机内外参数。

实际成像过程中, 由于镜头加工和安装精度等因素会带来畸变误差(其中相机径向畸变对测量精度影响最大), 这里采用两阶径向畸变模型, 其中 K_1, K_2 分别为一阶和二阶畸变系数。笔者采用张正友相机标定方法对上述参数进行求解^[12]。

1.3 手眼标定

笔者研究的是 Hand-In-Eye 模型, 对手眼关系进行标定就是求解相机坐标系与机械臂末端法兰盘坐标系的位置关系。

手眼标定模型如图 3 所示。

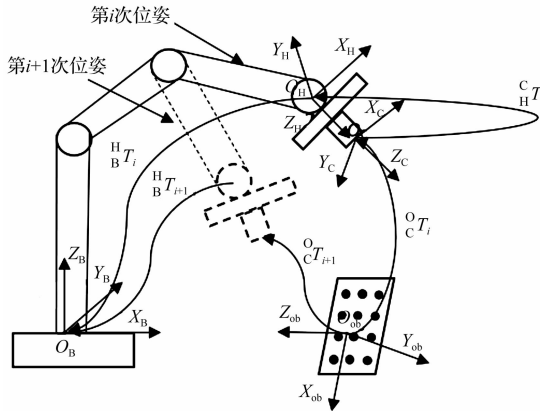


图3 手眼标定模型

定义空间棋盘格坐标系为 $O_{ob} X_{ob} Y_{ob} Z_{ob}$, 两个坐标系的转换关系用 $T = [R, t]$ 来表示, R —旋转矩阵; t —平移向量。设第 i 次物体坐标系到相机坐标系的转换关系为 ${}^o_c T_i$, 它为该状态下相机的外参矩阵; 手眼矩阵为 ${}^h_c T$, 相机固定到法兰盘后该关系保持不变; 第 i 次法兰盘坐标系到基坐标系转换关系为 ${}^h_B T_i$, 该矩阵可由示教器数据转换得到。

设棋盘格上第 j 个特征点在工件坐标系下的坐标为 (X_{oj}, Y_{oj}, Z_{oj}) , 对应基坐标系下的坐标为 (X_{Bj}, Y_{Bj}, Z_{Bj}) , 则可建立如下等式:

$$\begin{bmatrix} X_{Bj} \\ Y_{Bj} \\ Z_{Bj} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^h_B T_i {}^c T_i {}^o_c T_i \begin{bmatrix} X_{oj} \\ Y_{oj} \\ Z_{oj} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于物体上特征点坐标已知且固定, 同时这些点

在基坐标系下的坐标也固定, 则结合式(2)可得相邻两次机械臂运动:

$${}^h_B T_{i+1} {}^c T_i {}^o_c T_i = {}^h_B T_{i+1} {}^c T_i {}^o_c T_{i+1} \quad (3)$$

上式经变形之后可得:

$${}^h_B T_{i+1} {}^c T_i {}^o_c T_i = {}^h_B T_{i+1} {}^c T_i {}^o_c T_{i+1} \quad (4)$$

式中: ${}^h_B T$ —待求量 X 。

上式可转换为:

$$AX = XB \quad (5)$$

式中: A —第 $i+1$ 次到第 i 次的机械臂位姿的转换关系; B —第 i 次到第 $i+1$ 次的相机外参的转换关系, 采集多组数据利用 TSAI 方法求解该手眼矩阵^[13]。

2 激光测距仪位置标定

对机械臂末端固定的激光测距仪的位置标定, 即求解末端法兰坐标系下激光源的坐标和激光光束的单位方向向量^[14]。笔者采用一种基于空间平面约束的激光位置标定方法, 该方法设置机械臂运动规则, 在每个运动状态下构建参数约束方程, 利用激光距离数据和对应的机械臂位姿数据求解激光标定参数的闭式解。由于激光测距仪测量的非线性误差, 建立激光测量非线性方程组利用 LM 法优化求解出准确的位置标定参数。

将激光测距仪安装在机械臂末端, 将平整度良好的平面固定在工作台上, 激光测距仪标定模型如图 4 所示。

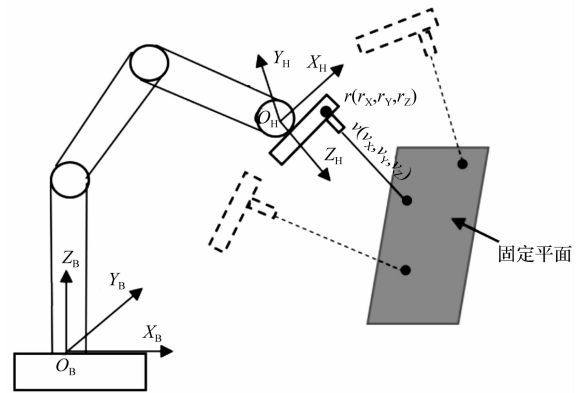


图4 激光测距仪标定模型

设在末端法兰坐标系下激光源坐标 $r = [r_x, r_y, r_z]^T$, 激光光束单位方向向量 $v = [v_x, v_y, v_z]^T$, 对激光测距仪位置标定即求解这两个参数。

设初始位置在 O_H 坐标系下, 标定平面的单位法向量为 n_{H0} , 激光照射到平面上的点为 x_{H0} , 激光测距仪测得距离为 d_0 , 则标定平面方程可表示为:

$$n_{H0}^T x_{H0} + b_0 = 0 \quad (6)$$

式中: b_0 — O_H 坐标系原点到标定平面的距离。

当机械臂末端发生旋转和平移运动后,在第 j 位置的平面方程为:

$$n_{Hj}^T x_{Hj} + b_j = 0 \quad (7)$$

在前后两个 O_H 坐标系下同一平面上的两点关系为:

$$x_{H0} = R_{H0j} x_{Hj} + t_{H0j} \quad (8)$$

式中: R_{H0j} 和 t_{H0j} — O_H 坐标系下从第 j 位置到起始位置的旋转矩阵和平移列向量。

由 O_H 和 O_L 的关系,标定平面上的激光点在 O_H 下可以表示为:

$$x_{Hj} = r + d_j v \quad (9)$$

由前述式子整理后可得:

$$n_{H0}^T R_{H0j} r + d_j n_{H0}^T R_{H0j} v + n_{H0}^T t_{H0j} + b_0 = 0 \quad (10)$$

其中:

$$R_{H0j} = R_{W0}^{-1} R_{Wj} \quad (11)$$

$$t_{H0j} = R_{W0}^{-1} (t_{Wj} - t_{W0}) \quad (12)$$

式中: R_{Wj} 、 t_{Wj} —第 j 位置 O_H 到 O_W 的旋转矩阵和平移向量,这些数据可由示教器数据转换后获得。

当机械臂末端仅有平移运动时,则 $R_{H0j} = I$,代入式(10)可得:

$$n_{H0}^T r + d_j n_{H0}^T v + n_{H0}^T t_{H0j} + b_0 = 0 \quad (13)$$

当机械臂处于起始位置时, $t_{H0j} = [0, 0, 0]^T$,代入式(12)可得:

$$n_{H0}^T r + d_0 n_{H0}^T v + b_0 = 0 \quad (14)$$

由式(13,14)可得:

$$n_{H0}^T t_{H0j} = (d_0 - d_j) n_{H0}^T v \quad (15)$$

式中: $n_{H0}^T v$ —常数,令 $n_{H0}^T v = p_0$,其中 n_{H0} 方向沿着机械臂末端坐标系 Z 轴朝负向。

对于式(15), d_j 、 d_0 和 t_{H0j} 为已知量,求解 n_{H0} 和 p_0 需要机械臂末端在姿态不变的前提下至少平移 1 次。笔者采集多组数据,利用最小二乘法构建下式:

$$n_{H0} = - \left(\sum_j t_{H0j} t_{H0j}^T \right)^{-1} \left(\sum_j t_{H0j} (d_j - d_0) \right) p_0 \quad (16)$$

由上式的结果可得到关于激光方向向量的一个约束,至少还需构建另外两个约束,才可求解激光方向向量。设起始位置为第一姿态,在该姿态下机器人保持末端姿态不变,仅平移 j 次 ($j \geq 2$),使激光点投射到同一平面。同理,可以设置第二、第三姿态,要求 3 次机械臂末端姿态不同,最好有较大变化。

可得到关于 v 的 3 组约束为:

$$v = \begin{bmatrix} n_{H0}^T \\ n_{H1}^T \\ n_{H2}^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

求解出 v 之后,还有 r 和 b_0 是未知的,由式(10,14)可得:

$$r = \left(\sum n_{H0}^T (R_{H0j} - I) \right)^{-1} + \sum \left((d_0 n_{H0}^T - d_j n_{H0}^T R_{H0j}) v - n_{H0}^T t_{H0j} \right) \quad (18)$$

机械臂末端需要至少 3 次以上的旋转和平移复合运动,才可求解上式激光源坐标 r 。

通过上述测量过程可得到初始激光标定参数 r_0 和 v_0 ,当测量过程没有噪声和误差时,上述解即为准确的标定结果。实际测量过程中,由于存在机械臂运动误差、激光测量误差等因素(这里主要考虑激光测距仪的非线性误差),需要通过建立激光测量非线性方程优化求解出准确的标定参数 r 和 v 。

由式(8-14)可得:

$$\hat{d}_j = \frac{n_{Hj}^T r - \frac{1}{M} \left(\left(\sum d_j \right) n_{H0}^T v + n_{H0}^T \sum t_{H0j} \right) - n_{H0}^T r + n_{H0}^T t_{H0j}}{n_{Hj}^T v} \quad (19)$$

式中: $\hat{d}_j$ —准确的激光距离; d_j —激光测得距离; M —第一个姿态下机械臂移动次数。

建立激光测距仪二阶测量模型为:

$$\hat{d}_j = d_j + k_1 d_j + k_2 d_j^2 \quad (20)$$

联立式(19,20),并代入参数初始值,利用优化方法即可求解出最佳标定参数。

3 视觉对准

3.1 视觉对准原理

视觉对准即相机的光轴向量与工件平面法向量平行,从而使相机成像平面与工件平面平行,则拍摄的工件图像不会产生形变。

笔者借助激光测距仪实现机械臂末端的相机与工件平面对准功能。该方法通过机械臂引导激光测距仪在工件平面投射多个激光点,由第 2 节的激光标定参数和激光测得距离值以及机械臂位姿,可得激光点在基坐标系下的坐标,利用随机采样一致性剔除错误点,并拟合工件平面方程以得到平面的单位法向量;根据手眼关系和对准关系建立非线性方程,利用 LM 法求解机器人的最佳姿态修正角,从而实现视觉对准的目的。

3.2 平面方程求解

由机械臂位姿和对应的激光距离可求得激光点在基坐标系下的值为:

$$P_{wj} = H_j(r + d_j v) \quad (21)$$

式中: H_j —机械臂法兰坐标系到基坐标系的转换矩阵; r, v —法兰坐标系下激光源坐标列向量和激光光束单位方向列向量。

在工件平面上投射若干个激光点,可由式(21) 求出这些点的基坐标值。设基坐标系下的工件平面方程为:

$$ax_{wj} + by_{wj} + cz_{wj} + d = 0 \quad (22)$$

方程系数设为 $X = [a \ b \ c \ d]^T$, 则有齐次方程组为:

$$\begin{bmatrix} P_{w1}^T & 1 \\ P_{w2}^T & 1 \\ P_{w3}^T & 1 \\ P_{w4}^T & 1 \end{bmatrix} X = 0 \quad (23)$$

求解上式可得平面方程系数。由于激光点的噪声等因素会产生异常点,这会给拟合的平面和后续对准带来误差,这里通过随机采样一致性剔除异常点,其具体做法是:

- (1) 计算所有激光点到上述已求解平面的距离,并计算这些距离的平均值为 $\bar{d}$;
- (2) 剔除那些到平面距离大于 $1.3 \bar{d}$ 的点;
- (3) 对剩下的点集重新求解平面方程,重复前两个步骤,直到剩余的点距平面的距离都小于 $1.3 \bar{d}$;
- (4) 完成上述步骤后可得最优平面方程。

相比最小二乘法,该方法可有效去除噪声点和异常点,具有良好的稳定性。

3.3 姿态修正角计算

要实现视觉对准,即为求解机械臂末端法兰坐标系基坐标系的旋转角度。设求解出最佳平面单位法向量为 $[A, B, C]^T$, 相机坐标系 Z 轴向量在相机坐标系下表示为 $[0, 0, 1]^T$, 末端法兰坐标系到基坐标系的姿态转换矩阵为 ${}^H_b R$, 手眼姿态矩阵为 p , 则在基坐标系下相机 Z 轴的表示形式为:

$$\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = {}^H_b R \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} {}^H_b R &= \text{Rot}(Z, \gamma) \text{Rot}(Y, \beta) \text{Rot}(X, \alpha) = \\ &\begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\alpha s\beta - c\alpha s\gamma & s\alpha s\gamma + c\alpha c\gamma s\beta \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

式中: (α, β, γ) —末端法兰坐标系绕基坐标系 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的旋转角度, $c = \cos, s = \sin$ 。

实现视觉对准只需考虑绕 X 轴和 Y 轴的旋转角度即可, 令 $\gamma = 0^\circ$, 建立非线性方程组:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{13}c\beta + p_{23}s\alpha s\beta + p_{33}c\alpha s\beta \\ p_{23}c\alpha - p_{33}s\alpha \\ -p_{13}s\beta + p_{23}c\beta s\alpha + p_{33}c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (26)$$

通过示教器获得初始姿态 $[\alpha_0, \beta_0, 0]$, 对上式利用优化方法进行迭代, 求解出机器人的姿态修正角。

4 实 验

相机采用 Cognex 公司的 CAM-CIC-6000-25-G 相机, 分辨率为 $3\ 072 \times 2\ 048$; 镜头为 MORITEX 的 $f = 12\text{ mm}$ 镜头, 视野 $350\text{ mm} \times 240\text{ mm}$, 工作距离 400 mm ; 激光测距仪为基恩士的 LK-500, 测距范围 $250\text{ mm} \sim 450\text{ mm}$, 线性误差为 $\pm 0.02\%$; 重复精度为 $2\text{ }\mu\text{m}$; 机器人 UR10 和 UR5 的 6 轴机器人, 重复精度 $\pm 0.1\text{ mm}$; 棋盘格精为 $\pm 0.03\text{ mm}$ 。

标定实验装置图如图 5 所示。

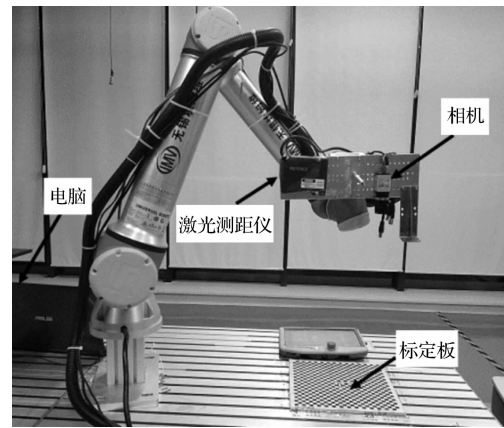


图 5 标定实验装置图

4.1 视觉标定实验与分析

笔者在工作台上放置棋盘格, 引导机器人使相机从 16 个不同方位对棋盘格进行拍照, 保存机械臂位姿数据和棋盘格图片, 利用标定算法分别对相机标定和手眼标定。

相机内参数标定如表 1 所示。

表 1 相机内参标定

标定参数	参数值
f_u	5 249.574
f_v	5 248.587
u_0/pix	1 514.700
v_0/pix	1 029.988
k_1	-0.132
k_2	0.06

对棋盘格角点进行重投影, 计算重投影后的角点像素坐标和实际像素坐标的欧式距离, 可得相机标定误差为 0.077 8 像素, 表明该标定具有较高精度。

手眼标定结果为:

$${}^c_H T = \begin{bmatrix} 0.007 & -0.036 & -0.999 & -54.874 \\ 1 & 0.0074 & 0.006 & -75.193 \\ 0.007 & -0.998 & 0.036 & 102.960 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

为了验证手眼标定精度,笔者将每个位姿下棋盘格角点的世界坐标统一转换到基坐标系下,计算不同位姿下对应角点基坐标值的方差,可得手眼标定误差为 0.133 mm,可见手眼标定具有较高精度。

4.2 激光测距仪标定实验与分析

在工作台上固定放置一个平面度良好的平板,设置机械臂 3 个移动状态,每个状态下机械臂末端保持姿态不变,只在 x 、 y 或 z 这 3 个方向上平移运动,但 3 个状态的姿态需有较大变化,引导机械臂使激光测距仪投射激光点到平板上,分别采集 10 组激光距离数据和对应的机械臂位姿数据;然后使机械臂末端同时有旋转和平移运动,再采集 10 组对应数据。

将采集的数据代入第 2 节的激光标定算法,可得激光标定参数,如表 2 所示。

表 2 激光标定参数

标定参数	参数值
r_0/mm	$[42.836, -40.133, 85.654]^T$
v_0	$[1.000\ 6, 0.062\ 8, 0.026\ 6]^T$
r/mm	$[43.684, -40.493, 90.102]^T$
v	$[0.997\ 7, 0.062\ 6, 0.026\ 5]^T$

将标定参数代入标定方程,通过反解可得到真实激光距离,将该距离与激光测距仪测得距离进行比较,可得标定误差。笔者采集 50 组数据进行验证,结果表明激光标定误差在 0.31 mm 以内,则激光标定精度高。

4.3 视觉对准实验与分析

利用 UR5 和 UR10 两台机器人来完成视觉对准实验,实验装置图如图 6 所示。

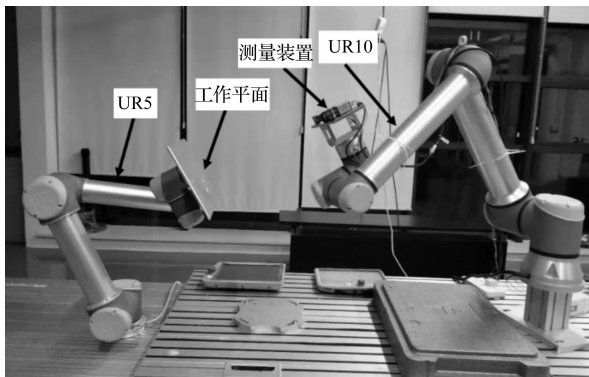


图 6 视觉对准实验装置图

图 6 中,UR10 机器人末端固定相机和激光测距仪,UR5 机器人末端固定一个平面工件,平面工件上设置 4 个特征点,它们分布在边长为 100 mm 的正方形的 4 个顶点。

测试之前先对两个机器人的位置进行标定,即通过设置多个空间公共点分别对两机器人 TCP 标定,而实现两坐标系的标定。

UR10 上的激光测距仪投射激光点到 UR5 末端的工件平面上,利用前述视觉对准算法求解姿态修正角;通过移动 UR5 末端位姿来改变工件平面的姿态,根据两次示教器的位姿数据,可得到第 i 次的姿态相对变化量真值 T_i ,利用笔者提出的视觉对准算法,解算对应的姿态变化量测量值 L_i ,对工件平面 4 个特征点,利用 PNP 原理求解对应的姿态变化量测量值为 P_i ,将真实值和两种方法的测量值统一到同一个基坐标系下进行比较,可得到各自的偏差值。

该测试沿机械臂 x 方向 10° 范围内设置 10 个位姿点,对每个位姿点采集 5 组数据取均值后进行验证。

PNP 方法视觉对准曲线图如图 7 所示。

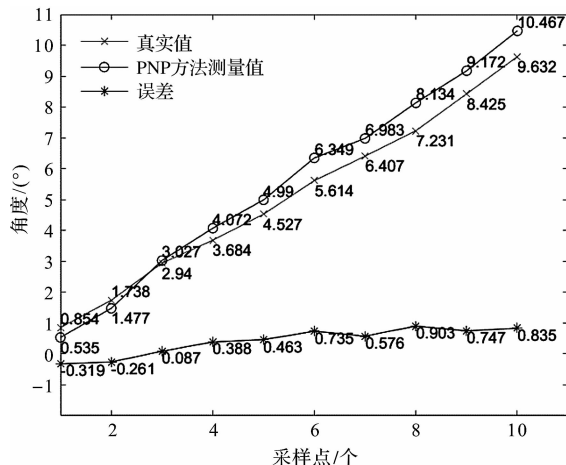


图 7 PNP 方法视觉对准曲线图

本研究方法视觉对准曲线图如图 8 所示。

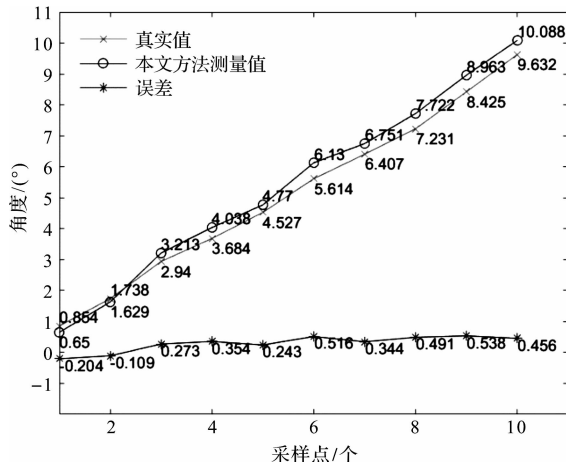


图 8 本文方法视觉对准曲线图

由图(7,8)的实验数据可知:在 10° 范围内,PNP 方法的位姿校正精度在 1° 以内,而本研究视觉对准算法精度在 0.6° 以内。视觉对准精度测标准不确定度为 0.119° ,置信概率为 95% 的扩展不确定度为 0.216° 。由此可见,本研究方法可满足较高的视觉对准精度要求,且具有良好的稳定性。产生误差的原因主要是机械臂移动误差、视觉标定误差、激光标定误差等。

5 结束语

笔者提出了一种基于激光测距仪的机械臂末端视觉对准技术,该技术首先求解了视觉系统中相机标定和手眼标定;接着建立了基于平面约束的激光测距仪标定模型,给出了激光标定参数闭式解与优化解的解法;然后介绍了视觉对准原理,推导了姿态修正角的求解过程;最后搭建实验平台分别进行了标定和对准实验。

实验结果表明:视觉对准算法对 10° 范围内的姿态对准误差在 0.6° 以内,实现了较高且稳定的校正。

参考文献(References):

- [1] 张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [2] 张 振. 基于单目视觉的工件位姿识别与抓取系统[D]. 杭州:中国计量大学机电工程学院,2016.
- [3] 宋 慧,王 刚,宋成国,等. 基于双目视觉识别的定位和抓取方案分析与研究[J]. 机电工程技术,2020,49(1): 34-35,68.
- [4] LIU M L, WONG K H. Pose estimation using four corresponding points[J]. **Pattern Recognition Letters**, 1999, 20(1):69-74.
- [5] 杨文辉,林嘉睿,高 扬,等. 双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统[J]. 光学学报,2015,35(11):147-155.
- [6] 周华飞. 机器人自动化制孔中位姿误差的修正与补偿[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2015.
- [7] 王中宇,李亚茹,郝仁杰,等. 基于点特征的单目视觉位姿测量算法[J]. 红外与激光工程,2019,48(5):169-176.
- [8] 雷金周,曾令斌,叶 南. 工业机器人单目视觉对准技术研究[J]. 光学精密工程,2018,26(3):733-741.
- [9] 高学海,徐科军,张 瀚,等. 基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J]. 仪器仪表学报,2007(8):1479-1485.
- [10] WANG H L, XIANG M S, YOU H J, et al. Precision Relative Pose Estimation at Close Range Using Single Camera and Laser Range Finder[C]. Proceedings of SPIE 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology, 2008.
- [11] 孙美艳,刘 峻,练 毅. 基于机器视觉和决策树算法的智能面包机面团发酵过程识别研究[J]. 包装与食品机械,2019(5):22-26.
- [12] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 2000,22(11):1330-1334.
- [13] TSAI R Y, LENZ R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 2002, 5(3):345-358.
- [14] 袁康正,朱伟东,陈 磊,等. 机器人末端位移传感器的安装位置标定方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2015,49(5):829-834.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

刘 幸,张爱军,曹小兵. 基于激光测距仪的视觉对准技术研究[J]. 机电工程,2020,37(10):1244-1250.

LIU Xing, ZHANG Ai-jun, CAO Xiao-bing. Visual alignment technology based on laser rangefinder[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(10):1244-1250.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>