

文章编号 1004-924X(2018)03-0733-09

工业机器人单目视觉对准技术研究

雷金周¹, 曾令斌², 叶 南^{1*}

- (1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;
2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘要:针对工业机器人精确对准问题,提出了一种基于单目视觉的工业机器人对准技术。该技术把机器人与单目视觉测量技术相结合,根据特制的手眼标定板,快速建立单目视觉测量系统与机器人上对准轴之间的手眼关系和对准的基准位姿;在对准环节,通过单目视觉系统获取工件目标的姿态,然后根据已有的手眼关系和基准位姿,求解在机器人基坐标系下机器人末端的对准轴的位置调整量,迭代调整机器人末端位姿,从而实现了机械人末端的对准轴与工件目标的精确对准。实验结果表明:在测量距离约是 150 mm 处,对准平均精度优于 0.2° 。

关键词:位置对准;单目视觉;位姿求解;手眼标定;工业机器人

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182603.0733

Research on industrial robot alignment technique with monocular vision

LEI Jin-zhou¹, ZENG Ling-bin², YE Nan^{1*}

- (1. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Shanghai aerospace system engineering institution, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail: yen@nuaa.edu.cn

Abstract: Aiming at the problem of precise alignment of industrial arm, an industrial robot alignment method based on monocular vision is proposed. Combining the industrial robot with monocular vision measurement and a specialized hand-eye calibration panel, the method is able to quickly establish the hand-eye relationship between the camera coordinate system and the alignment axis on the robot's end-effector. In the alignment stage, the attitude of the workpiece is obtained by monocular vision system, and then according to the existing hand-eye relationship and datum posture, the position and orientation between the alignment axis and the workpiece of the alignment axis are evaluated. The experimental results show that the average precision of the alignment is better than 0.2° under the measuring distance of 150 mm.

Key words: position alignment; monocular vision; pose solution; hand-eye calibration; industrial robots

收稿日期:2017-07-03;修订日期:2017-08-18.

基金项目:上海航天科技创新基金资助项目;国家自然科学基金科学基金资助项目(No. 51605222);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20160799);南京航空航天大学基本科研业务费资助项目(No. NS2015053)

1 引言

工业机器人对准技术是工业机器人实现对接、装配、抓取、钻孔等功能的技术基础^[1-4]。实现工业机器人对准,通常采用两种办法:第一种是采用示教或离线编程的方式调节工业机器人末端执行器每次以固定的姿态到达同一个固定的位置,通过调节工件的位姿,与工业机器人末端执行器对准^[5];第二种是给工业机器人末端安装位姿测量传感器,通过测量工件位置和姿态,调节工业机器人末端执行器的姿态并与工件对准。前者高度依靠机器人精度,对工件位置和姿态要求严格,存在累计误差,常用于喷漆,简单抓取等低精度的场合。后者通过调节工业机器人末端与工件对准,对工件位姿要求低,更加灵活实用。常见对工件位姿测量方法有陀螺仪导向、激光标靶导向和视觉测量^[6]。陀螺仪的测量精度受机械加工和装配、振动、累计误差等影响,需要定期校准,稳定性差,测量精度低,常作为辅助测量。激光标靶导向法主要使用激光标靶和全站仪对工件的位姿测量,具有测量效率高、范围广、精度高等优点,但要联合全站仪,结构复杂^[7]。视觉测量技术是建立在计算机视觉研究基础上的一门新兴技术^[8],具有非接触、精度高、实时性强等优点,因此把工业机器人对准技术与视觉测量技术相结合已成为工业机器人应用研究的热点之一。

单目视觉测量是利用视觉传感器获取工件特征点的图像,然后结合视觉测量原理,估计三维物体的位置和姿态,其结构简单,视场大、无需立体匹配^[9]。把单目视觉测量和工业机器人相结合,组成工业机器人视觉系统,使机器人具备一定的环境认知能力,增强了工业机器人柔性,具有重要研究意义^[10]。根据相机与工业机器人的位置关系,机器人视觉系统可以分为:Eye-in-Hand 和 Eye-to-Hand。相机安装在机械臂本体之外的固定位置,且相机不随机械臂运动的视觉系统称为 Eye-to-Hand 式手眼系统,这种方式已经研究很多而且技术成熟。相机安装在机械臂末端,并随机械臂一起运动的视觉系统称为 Eye-in-Hand 式手眼系统,该方式具有测量误差小,视野不受阻挡等优点,是工业机器人视觉应用领域的关键内容,也是难点。常见的 Eye-in-Hand 式手眼标定

方法有:通过控制工业机器人末端变换至不同的位置,拍摄同一个靶标实现手眼标定^[12],或者借助辅助相机作为中转,实现手眼的标定^[13];前者标定的精度易受工业机器人精度和回程误差影响,后者借助辅助相机,对辅助相机摆放位置有限制。Zhu 等^[14]采用高精度的手眼标定板和稳定的椭圆提取方法,根据弱透视原理,实现相机的标定和手眼标定,搭建一个实用单目视觉工业机器人钻孔系统,并获得较好的钻孔精度。

本文提出了一种基于单目视觉的工业机器人对准技术。该技术采用 Eye-in-Hand 方式,利用特制的手眼标定板,获得了工业机器人末端执行器与相机之间的手眼关系,并在此基础上,利用 N 点透视(PNP)原理,解算出工业机器人末端与工件对准时的位姿。与一般的基于视觉的工业机器人对准方法相比,本文方法获得手眼关系时不需要辅助相机或者多次变换工业机器人至不同的位置,因此该对准技术更加灵活,更适合工厂的实际应用。

2 系统组成及技术原理

2.1 系统软硬件组成

基于单目视觉的工业机器人对准系统主要由工业机器人、相机、对准轴、对准目标(含有对准孔和对准参考板)、标定板及对准位姿计算处理软件等构成,如图 1 所示。相机和对准轴都安装在工业机器人法兰盘上,对准轴和相机的光轴近似平行;对准参考板上加工出相对位置已知的高精度群排孔(本文采用 9 个直径为 5 mm 的圆孔);对

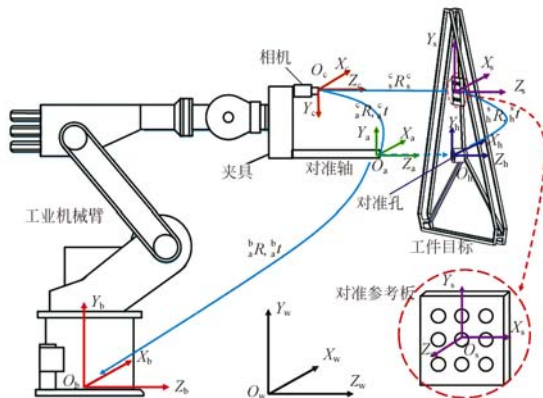


图 1 单目视觉对准系统示意图

Fig. 1 System schematic of monocular visual alignment

准孔和对准参考板都固定在工件同一侧上,两者的几何关系可通过机加或装配保证,且对准参考板的中心到对准孔中心的距离和相机光轴到对准轴的轴线之间的距离近似相同,这样当对准轴与对准孔对准时,相机的光轴近似垂直对准参考板,此时相机拍摄角度最佳,成像质量较好。

2.2 坐标系的定义

基于单目视觉的工业机器人对准系统的坐标系包括:机器人基坐标系: $O_b X_b Y_b Z_b$; 相机坐标系: $O_c X_c Y_c Z_c$; 对准轴坐标系: $O_a X_a Y_a Z_a$; 工件目标上对准孔的坐标系: $O_h X_h Y_h Z_h$; 对准参考板坐标系: $O_s X_s Y_s Z_s$; 世界坐标系: $O_w X_w Y_w Z_w$ 。相机坐标系的原点在光心处, Y_c 轴竖直向下, Z_c 指向工件目标。对准轴坐标系原点对准轴端面的中心, Z_c 轴与对准轴的回转轴共线,指向对准孔。 X_h 和 X_a 一致,且都与 X_s 同向; Y_h, Y_a, Y_s 三者同向。此时,若不考虑 O_a 和 O_h 在 Z_a 轴向的偏差, $O_a X_a Y_a Z_a$ 和 $O_h X_h Y_h Z_h$ 出于对准状态,在本文中称为基准位姿状态,所有坐标系都遵守右手准则。

2.3 对准技术实现过程

对准技术实现流程如图 2 所示。

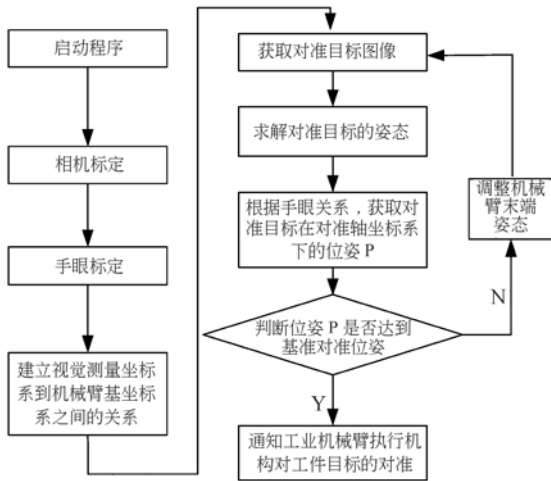


图 2 对准技术流程图

Fig. 2 Flow chart of alignment

(1)在相机和对准轴都安装在工业机器人的末端夹具上之后,首先通过机器人 TCP 找正程序或通过文献[14]中提出的测量方法获取对准轴的坐标系和机械臂的基坐标系的位置关系 ${}^a R_b$ 和 ${}^a t_b$ (其中 R 表示旋转矩阵和 t 表示平移向量,下同);

(2)然后根据本文第 3 节提出的标定方法对准准系统进行相机标定和手眼标定,确定对准轴

坐标系 $O_a X_a Y_a Z_a$ 和相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 之间的变换关系,即 ${}^c R_a$ 和 ${}^c t_a$;

(3)对准环节,相机不断获取对准参考板的图像,根据本文第 4 节所述位姿解算技术,获得对准目标在相机坐标系下位置关系 ${}^c R_h$ 和 ${}^c t_h$ 。再结合各坐标系之间的转换关系,计算获得对准轴和对准孔间的位姿偏差 ${}^a R_h$, ${}^a t_h$,将末端对准轴位姿偏差转换至机器人基坐标系下的位姿,调整工业机器人末端的姿态;

(4)循环执行第 3 步,直到 ${}^a R_h$, ${}^a t_h$ 小于设定阈值,此时为精确对准状态。

3 系统标定

为了精确获得对准目标在工业机器人的基坐标系下的姿态,需要先对获取对准目标姿态的相机模型参数进行解算,即相机的标定;然后再获取相机坐标系与对准轴坐标系之间的位置关系,即手眼标定,最后结合机器人对准轴和机器人基坐标系之间的位姿关系,把待对准目标姿态转换到工业机器人的基坐标系下的姿态,为后续对准做准备。

3.1 相机标定

对于相机能够测量物体的位置几何等信息,是由相机几何模型(如下图 3 所示)决定的,通常用针孔模型来表达。

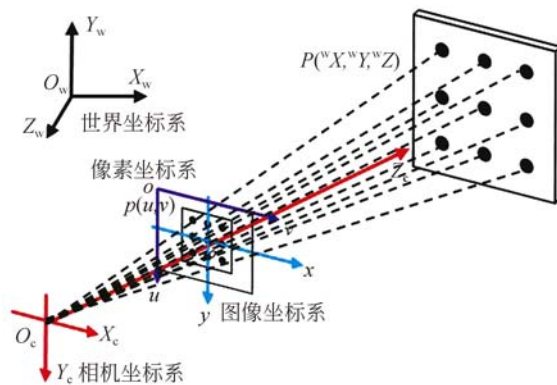


图 3 针孔模型

Fig. 3 Pinhole model

齐次坐标下相机模型可表示为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w X \\ {}^w Y \\ {}^w Z \\ 1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, (1)$$

式(1)中： $({}^w X, {}^w Y, {}^w Z)$ 是空间一点 P 在世界坐标系的坐标， (u, v) 是点 P 的像在像素坐标系的坐标， s 是比例系数，矩阵 A 是相机的内参矩阵， R 和 t 是从世界坐标系到相机坐标系的转换关系。 (u_0, v_0) 是图像平面的主点坐标， α 和 β 分别是图像在 u 和 v 轴的等效焦距参数。

由于相机镜头存在畸变，使得实际成像点偏离相机光心与空间点 P 的在成像平面的交点。镜头畸变呈现复杂的非线性，一般可用高阶多项式模型近似。综合考虑了径向畸变和切向畸变，畸变模型可表示为：

$$u_i = u_0 + u_i [k_1 r^2 + k_2 r^4] + [2 p_1 u_i v_i + p_2 (r^2 + 2 u_i^2)]$$

$$v_i = v_0 + v_i [k_1 r^2 + k_2 r^4] + [2 p_2 u_i v_i + p_1 (r^2 + 2 v_i^2)].$$

(2)

(u_0, v_0) 和 (u_i, v_i) 表示空间某一点 P 的无畸变和有畸变时的像素坐标， $r = \sqrt{u_i^2 + v_i^2}$ ，其中 k_1, k_2, p_1, p_2 分别是径向和切向畸变系数。相机的标定对于是视觉测量至关重要，本文在采用圆孔的标定板，根据 Zhang Z 等^[16]方法进行标定。

3.2 手眼标定

手眼标定是单目视觉工业机器人的对准技术的关键内容。本文手眼标定示意图如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。

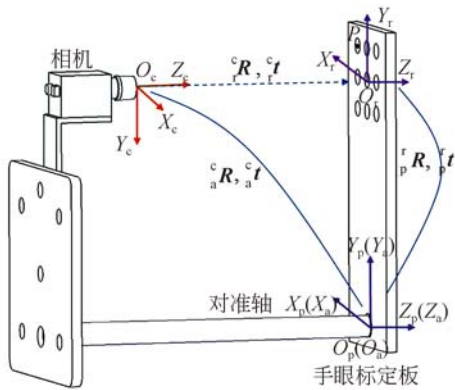


图 4 手眼标定示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hand-eye calibration

通过手眼标定，把机械臂上对准轴这只“手”与视觉测量系统这个“眼”建立联系，即求对准轴坐标系到相机坐标系之间的关系 ${}^c R, {}^c t$ ；另外还为后续对准环节中的对准提供了基准位姿 ${}^a R, {}^a t$ 。

为了获取手眼关系，本文设计了手眼标定板，如图 5 所示，左边是设计简图，右边是手眼标定板实物图。其中排孔尺寸、排孔与适配孔之间的位

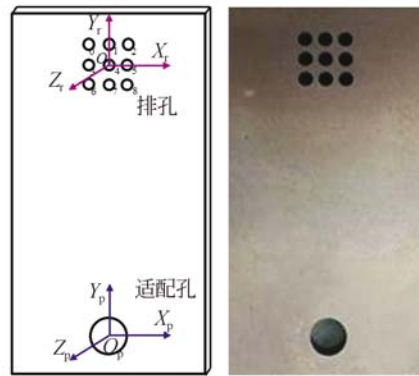


图 5 手眼标定板

Fig. 5 Hand-eye calibration board

置关系已知。把手眼标定板装在对准轴上，用相机获取手眼标定板上排孔的图像，提取排孔的中心像素坐标。提取像素坐标操作流程：手眼标定板(或者对准参考板)图像进行灰度化、高斯平滑、阈值化处理、Canny 边缘提取、椭圆拟合和椭圆中心提取等处理，图像特征提取流程详见下图 6 所示。

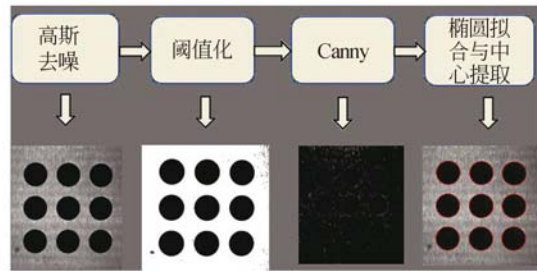


图 6 圆孔的图像处理

Fig. 6 Image processing diagram of circular hole

已知控制点(圆孔中心)的像素坐标、物理坐标和相机模型参数之后，求取控制点所在的工件目标姿态问题，都可以归纳成 N 点透视(PNP)问题。PNP 的几何关系和相机成像几何关系类似，如图 3 所示，其数学模型如公式(1)所示。与相机标定不同的是，PNP 是在已知相机内参数的前提下，通过空间物体上已知物理坐标和图像坐标的对应关系，获得空间物体在相机坐标系下的姿态。常见的 PNP 解算方法通过迭代和非迭代方法，前者效率低，后者精度不高，鉴于此，本文采用另一种解算方法 EPNP。EPNP 算法可以处理所有 $N \geq 4$ 的情况，时间复杂度较低，结果比较精确，鲁棒性较强。其算法的核心思想是用 4 个虚拟控制点坐标的加权表示空间内的点，这样就将 PNP 问

题转化为了在摄像机坐标下求这 4 个控制点的问题^[17]。本文在工件上设计 9 个中心坐标已知的排孔,即 $N=9$,采用 EPNP 方法,获取到排孔坐标系到相机坐标系的转换关系 cR_r 和 ${}^c t_r$,再结合适配孔和标定板上排孔的机械加工关系 rR_p 和 ${}^r t_p$,如图 4 中蓝色曲线所示。

$$\begin{cases} P_c = {}^cR_r P_r + {}^c t_r \\ P_r = {}^rR_p P_p + {}^r t_p \end{cases} \quad (3)$$

可获得相机坐标系与适配孔坐标系之间的位置关系 ${}^cR_p, {}^c t_p$:

$$\begin{cases} {}^cR_p = {}^cR_r {}^rR_p \\ {}^c t_p = {}^cR_r {}^r t_p + {}^c t_r \end{cases}, \quad (4)$$

其中 P_r, P_c, P_p 分别表示是世界坐标系的点 P 在手眼标定板坐标系的坐标、相机坐标系的坐标、对准孔坐标系下的坐标。由于适配孔与对准轴之间是精密的机械配合关系,因此适配孔坐标系和对准轴坐标系重合的,即 ${}^aR_p = E$ 和 ${}^a t_p = 0$,并把 aR_p 和 ${}^a t_p$ 作为后续对准环节中对准轴和工件对准孔达到对准时的基准位姿。如图 4 所示,因此相机与对准轴之间的位置关系 ${}^cR_a, {}^c t_a$,即手眼关系:

$$\begin{cases} {}^cR_a = {}^cR_r {}^rR_p \\ {}^c t_a = {}^cR_r {}^r t_p + {}^c t_r \end{cases}. \quad (5)$$

4 位姿对准

基于单目视觉的位姿对准方法通常有两种:基于图像和基于位置。当工件目标上的对准参考板与基准相同时(比如对准参考板与对准孔的相对位置关系 ${}^hR_s, {}^h t_s$ 和手眼标定板上的适配孔与排孔的相对位姿关系 ${}^rR_p, {}^r t_p$ 、手眼标定板与对准参考板上对应的排孔在整体尺寸形状、排孔分布以及排孔的大小等都相同),上述两种方法皆可适用。如果工件目标上的对准参考板与基准不相同,像本文对准参考板与手眼标定板外形不一致时,基于图像的方法使用受限,基于位置的方法可以使用,本文采用基于位置的对准方法。

由于对准系统已经通过手眼标定,获取了相机和对准轴的位置关系 ${}^cR_a, {}^c t_a$,而且工件目标上的对准孔与排孔的位姿关系 ${}^hR_s, {}^h t_s$ 和手眼标定板上适配孔与排孔位姿关系 ${}^rR_p, {}^r t_p$ 一致的,所以只要在对准轴坐标系下工件目标的对准孔的姿态和手眼标定时在对准轴坐标系下适配孔的姿态一致,

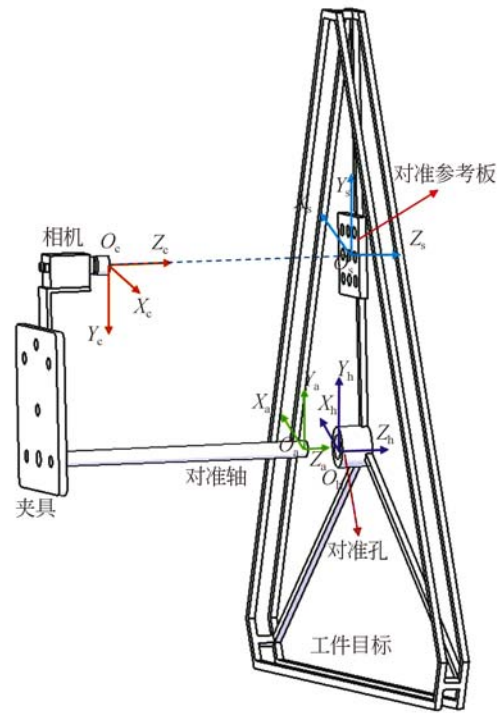


图 7 对准轴与工件目标对准示意图
Fig. 7 Relation of alignment axis and work-piece target

就可以实现对工件目标的对准。对准轴与工件目标对准示意图,如图 7 所示。

当工业机器人末端执行器在执行对准动作时,选择工业机器人的基坐标系为参考系。另外工业机器人末端对准轴和相机一起移动,工业机器人末端把相机送到清晰拍摄的范围,拍摄工件目标,然后根据工件目标上对准参考板的控制点(排孔的中心)的位置关系、控制点的像素坐标、相机内参数、相机的畸变参数,并基于透视原理(PNP),解算工件目标上对准参考板坐标系相对相机坐标系的位置转换关系 cR_s 和 ${}^c t_s$ 。根据式(4)式(5),对准孔与对准参考板之间的位置关系 hR_s 与 ${}^h t_s$,对准轴与相机之间的手眼关系 cR_a 与 ${}^c t_a$,可以获得对准轴坐标系下对准孔的位姿:

$$P_a = {}^cR_s^T {}^cR_a^T {}^cR_s^T {}^cR_a^T P_s + {}^cR_s^T {}^cR_a^T {}^cR_s^T {}^cR_a^T t_s + {}^cR_s^T {}^cR_a^T {}^cR_s^T {}^cR_a^T t_a \quad (6)$$

根据式(7)可推导出对准孔与对准轴之间的位置关系 aR_h 和 ${}^a t_h$,即

$$\begin{cases} {}^aR_h = {}^cR_s^T {}^cR_a^T {}^cR_s^T {}^cR_a^T R \\ {}^a t_h = {}^cR_s^T {}^cR_a^T {}^cR_s^T {}^cR_a^T t_s + {}^cR_s^T {}^cR_a^T {}^cR_s^T {}^cR_a^T t_a \end{cases}, \quad (7)$$

其中 P_a 表示对准参考板上一点 P 在机械臂的对

准轴坐标系下的坐标, P_s 表示对准参考板上一点 P 在参考板的坐标系下的坐标, P_h 表示对准参考板上一点 P 在对准孔坐标系下的坐标。由上式(7)可知, 单目视觉测量系统测得待对准工件目标在对准轴坐标系下的位置关系是 ${}^a_h \mathbf{R}$ 和 ${}^a_h \mathbf{t}$, 然后将 ${}^a_h \mathbf{R}$ 和 ${}^a_h \mathbf{t}$ 与手眼标定时测得手眼标定板在对准轴坐标系下的基准位置关系 ${}^a_p \mathbf{R}$ 和 ${}^a_p \mathbf{t}$ 比较, 得到 $\Delta_h^a \mathbf{R}$ 和 $\Delta_h^a \mathbf{t}$, 再结合机械臂的基坐标系与对准轴坐标系之间的关系 ${}^b_a \mathbf{R}$, ${}^b_a \mathbf{t}$, 把 $\Delta_h^a \mathbf{R}$ 和 $\Delta_h^a \mathbf{t}$ 转换至基坐标系下, 并以此调整机械臂末端位姿。当机械臂末端到达新位置后, 再获取工件目标位姿、 $\Delta_h^a \mathbf{R}$ 和 $\Delta_h^a \mathbf{t}$, 调整机械臂末端位姿, 直到 ${}^a_h \mathbf{R}$ 和 ${}^a_h \mathbf{t}$ 分别等于 ${}^a_p \mathbf{R}$ 和 ${}^a_p \mathbf{t}$ 时, 或者 $\Delta_h^a \mathbf{R}$ 和 $\Delta_h^a \mathbf{t}$ 达到对准所允许的误差范围内, 认为达到对准要求。

5 实验验证

5.1 位姿测量实验

为了验证基于单目视觉的工业机器人对准系统的有效性, 本文先将视觉对准装置装在工业机器人上, 如图 8 所示。

本实验采用德国 Allied Vision Prosilica GC2450 工业相机和德国 Schneider 公司的 CINEGON 1.4/12-0906 的定焦镜头, 焦距 12 mm。手眼标定板外形尺寸 110 mm × 130 mm, 手眼标定板参考孔直径 5 mm, 手眼标定板机械加工精度达到 0.01 mm。

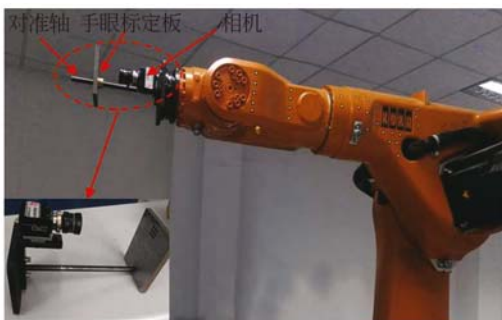


图 8 标定板的位姿求解

Fig. 8 Position and posture solving of calibration board

位姿测量实验如下:

(1) 对准装置依次进行相机标定、手眼标定, 获得相机坐标系和对准轴坐标系间变换关系。相机标定时, 采用平面标定板, 其中标定板距离相机成像平面约 220 mm 处。标定结果见表 1:

表 1 相机标定结果

Tab. 1 Camera calibration results

相机内参		畸变参数	
α	3 632.904	k_1	-0.145 81
β	3 632.613	k_2	0.000 00
u_0	1 232.269	k_3	0.000 00
v_0	1 033.734	p_1	-0.000 580
γ	0.000 00	p_2	0.000 07

同样的, 在测工件目标位姿之前, 根据已标定的结果, 需要把对准轴和相机进行标定, 以获得手眼关系, 采用图 5 所示标定板, 标定板距离相机约 220 mm 的位置进行手眼标定, 标定结果如下:

$${}^p \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.997 3 & -0.009 83 & 0.012 82 \\ -0.010 51 & -0.996 51 & 0.078 80 \\ 0.011 81 & -0.078 05 & -0.996 27 \end{bmatrix},$$

$${}^p \mathbf{t} = \begin{bmatrix} -2.379 18 \\ 83.888 56 \\ 200.514 76 \end{bmatrix}$$

(2) 通过机器人自身的 TCP 找正功能, 建立对准轴和机器人基坐标系间变换关系。

(3) 将工件目标安装在支座上, 调整机械臂末端至合适的位置, 获取工件目标图像, 解算工件目标在机械臂对准轴坐标系下的姿态, 与基准位姿作比较。

(4) 选取 6 组相对基准位姿时工件目标的位姿, 见下表 2, 其中 $\Delta\gamma$ 表示在对准轴坐标系下实际位姿的法向与基准位姿的法向夹角, $\Delta\gamma$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\alpha$ 分别表示实际位姿与基准位姿在对准轴坐标系下分别绕 X_a 轴、 Y_a 轴、 Z_a 轴转角差值, $\Delta^a \mathbf{T}_x$ 、 $\Delta^a \mathbf{T}_y$ 、 $\Delta^a \mathbf{T}_z$ 分别表示实际位姿与基准位姿相比在对准轴坐标系下 $O_a X_a Y_a Z_a$ 沿 X_a 轴、 Y_a 轴、 Z_a 轴方向的位移偏移量。

在调整机器人末端对准轴与工件目标对准时, 优先考虑姿态的对准, 然后考虑是沿 3 个轴向的平移对准。从表 2 中可以看出, 在 6 次机械臂末端的对准中, 前 5 次工件目标的姿态角和 3 个轴向偏移量逐渐逼近基准对准位置, 在第 6 次对准环节中, 仅沿着对准轴坐标系 X_a 轴方向调整机械臂末端, 逼近基准对准位姿。由于本

文允许对准孔与对准轴在对准时有 1 mm 的误差,而且对准轴沿 Z_0 轴方向可以伸缩,因此本

文机械臂末端对准轴经过第 6 次的调整,实现了对准要求。

表 2 目标实际位姿与对准基准位姿的偏差

Tab.2 Deviation of the actual pose and the datum position

	$\Delta\eta/(^\circ)$	$\Delta\gamma/(^\circ)$	$\Delta\beta/(^\circ)$	$\Delta\alpha/(^\circ)$	$\Delta^a T_x/\text{mm}$	$\Delta^a T_y/\text{mm}$	$\Delta^a T_z/\text{mm}$
1	8.822	-0.818	8.784	-0.058	1.765	0.121	2.514
2	5.757	-0.605	5.725	-0.014	1.310	0.107	1.926
3	3.511	-0.403	3.488	-0.007	0.962	0.089	1.158
4	1.492	-0.431	1.429	-0.012	0.638	0.004	0.726
5	0.239	0.162	0.175	-0.003	0.664	-0.016	-0.144
6	0.235	0.160	0.174	-0.003	0.108	-0.014	-0.146

5.2 测量精度验证实验

为验证位姿测量的精度,本文采用北京衡工 HGRM282 千分尺转台,将手眼标定板安装在高精度的转台上,调整手眼标定板法向与相机光轴方向初始方向近似一致,如图 9 所示。每隔约 0.1° 转动一次转台,并记录对应的手眼标定板法向测量读数。选择夹角的初始角约 5° 和 10° 时转台读数与测量数据,如下图 10 和图 11 所示(彩图见期刊电子版)。其中蓝色曲线代表是精密转台测量的数据,红色曲线代表位姿测量的方法获得的数据。绿色曲线表示两者偏差值。

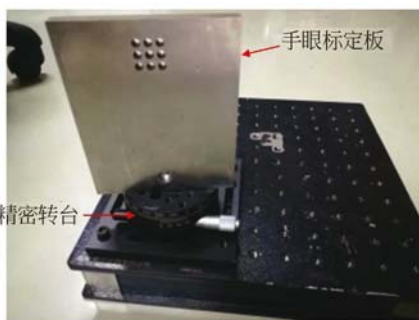


图 9 精度验证实验

Fig.9 Accuracy verification experiment

实验数据表明,实际测量转动的夹角读数接近转台读数,仍存在误差,主要是提取像素坐标时和手眼标定板与对准轴的装配时存在误差;但是基于单目视觉的工业机器人对准系统测量精度可控制在 0.2° 以内,该精度可以满足基于单目视觉的工业机器人对准系统测量的需求。

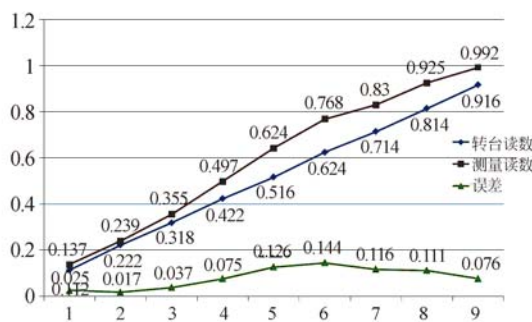


图 10 起始夹角是 5° 时测量读数与转台读数

Fig. 10 Measuring readings and turntable readings at 5° starting angle

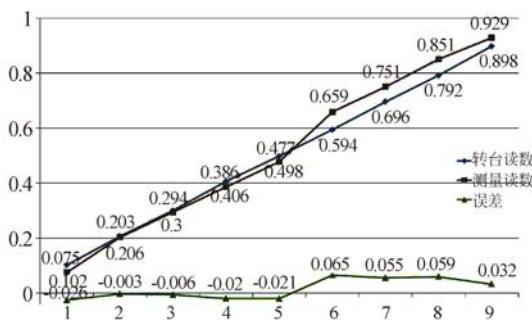


图 11 起始夹角是 10° 时测量读数与转台读数

Fig. 11 Measuring readings and turntable readings at 10° starting angle

6 结论

本文提出了一种基于单目视觉的工业机器人对准技术。该对准技术实现了对工件目标姿态的

求解,精确获取了工业机器人末端执行器坐标系和相机坐标系之间的手眼关系、对准参考板的中心位置,给出了工业机器人末端与工件对准时的基准位姿,并搭建了基于单目视觉的工业机器人对准的系统。为了验证系统,搭建了基于单目视觉的工业机

器人对准装置,并利用高精度的精密转台验证了测量精度。实验结果表明,在测量距离是 150 mm 处时,对准系统的精度优于 0.2° 。如何在较复杂背景下提高图像处理算法鲁棒性和位姿测量的精度是本文接下来要步研究的问题之一。

参考文献:

- [1] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996.
XUN Y L. *Fundamentals of Robotics*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [2] 徐德, 谭氏, 李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 3 版. 北京: 国防工业出版社, 2016.
XU D, TAN M, LI Y. *Visual Measurement and Control for Robots*[M]. 3rd ed.. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [3] 任梦晴. 自动对接检测定位技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
REN M Q. *Detection technology for positioning in automatic joint*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [4] ZHAN Q, WANG X. Hand-eye calibration and positioning for a robot drilling system[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(5-8): 691-701.
- [5] 吕游. 视觉引导技术在工业机器人智能抓取中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
LÜ Y. *Application of vision guiding technique in intelligent grasp of industrial robot*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 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): 1112005.
YANG W H, LIN J R, GAO Y, *et al.*. Pose measurement system of double shield universal compact TBM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112005. (in Chinese)
- [7] 孟祥瑞. 新型激光靶位姿测量系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
MENG X R. *Key techniques on new type laser target pose measurement system*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [8] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
ZHANG G J. *Visual Measurement*[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [9] 晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 312001.
CHAO ZH CH, FU S H, JIANG G W, *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 312001. (in Chinese)
- [10] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer Vision: Theory and Algorithms*[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [11] 赵锐. 基于单目视觉的物体位姿测量方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
ZHAO R. *Research on measurement method of object's position and orientation based on single hand-eye vision*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [12] 魏振忠, 高明, 周富强, 等. 基于辅助摄像机的机器人延伸手眼标定方法[J]. 光电工程, 2008, 35(9): 76-80, 121.
WEI ZH ZH, GAO M, ZHOU F Q, *et al.*. Robot extended eye-in-hand calibration method based on an assistant camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9): 76-80, 121. (in Chinese)
- [13] ZHU W D, MEI B, YAN G R, *et al.*. Development of a monocular vision system for robotic drilling[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, 15(8): 593-606.
- [14] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] 翟光, 张景瑞, 张尧. 基于共面光标提取的空间目标单目测量技术[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(10): 1015-1020.
ZHAI G, ZHANG J R, ZHANG Y. Linear-monocular vision based on coplanar feature points for space target relative determination[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013,

33(10): 1015-1020. (in Chinese)

- [16] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24

(6): 381-395.

- [17] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155-166.

作者简介:



雷金周(1988—),男,河南信阳人,2014年于河南科技大学获得学士学位,主要研究方向为视觉测量。E-mail: charmlei1988@163.com

通讯作者:



叶南(1982—),男,安徽芜湖人,2004年、2011年于南京航空航天大学分别获学士、博士学位,主要从事机器视觉检测、三维数字化测量、逆向工程方面的研究工作。E-mail: yen@nuaa.edu.cn

(本栏目编辑:秦 思)