

DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2022.20.032

引用格式:张庆新,牟金星,陈新禹,等.面向物料抓取机器人的新型手眼标定方法[J].现代电子技术,2022,45(20):162-166.

面向物料抓取机器人的新型手眼标定方法

张庆新¹, 牟金星¹, 陈新禹¹, 王路平², 谢文傲¹, 刘畅³

(1.沈阳航空航天大学 自动化学院, 辽宁 沈阳 110136; 2.沈阳航空航天大学 工程训练中心, 辽宁 沈阳 110136;

3.沈阳航空航天大学 设计艺术学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 单目视觉在工业机器人物料抓取中的应用越来越广泛,为了加快基于单目视觉的工业机器人物料抓取系统的投产速度,降低标定误差,提高机器人的作业精度,文中针对眼在手外系统,提出一种新型的标定方法。首先引入自制的标靶并建立标靶坐标系,通过矩阵关系求取机器人世界坐标系与标靶坐标系的关系;然后利用插值线性法求取图像坐标系与标靶坐标系的关系,以获得工业机器人与摄像机之间的映射关系,完成机器人视觉系统的手眼关系标定。实验结果表明:新型手眼标定方法操作简单、标定操作时间短、在线动态抓取误差较小,标定误差可控制在3 mm以内,具有一定的行业应用意义与经济价值。

关键词: 工业机器人; 物料抓取; 手眼标定; 单目视觉; 自制标靶; 图像坐标; 机器人坐标; 标靶坐标

中图分类号: TN820.4-34; TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2022)20-0162-05

A novel hand-eye calibration method for material grabbing robot

ZHANG Qingxin¹, MU Jinxing¹, CHEN Xinyu¹, WANG Luping², XIE Wena¹, LIU Chang³

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

2. Engineering Training Center, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

3. School of Design and Art, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Monocular vision is more and more widely used in material grasping of industrial robots. In order to speed up the production of the industrial robot material grasping system based on monocular vision, reduce the calibration error, and improve the working accuracy of the robot, a new calibration method is proposed for the eye in hand outside system. The self-made target is introduced to establish the target coordinate system, and the relationship between the robot world coordinate system and the target coordinate system is obtained by means of the matrix relationship. Then, the relationship between the image coordinate system and the target coordinate system is obtained by means of the interpolation linear method to obtain the mapping relationship between the industrial robot and the camera, so as to complete the hand eye relationship calibration of the robot vision system. The experimental results show that the new-type hand eye calibration method is simple in operation, short in calibration operation time, small in online dynamic grasping error, and the calibration error can be controlled within 3 mm. It has certain industrial application significance and economic value.

Keywords: industrial robot; material grasping; hand-eye calibration; monocular vision; self-made targets; image coordinates; robot coordinates; target coordinates

0 引言

在近年来,基于单目视觉的工业机器人物料抓取系统成为了研究热点。在工业机器人的研究中,获取相机坐标系与机器人坐标系之间的转换关系是首先要完成

的任务,即手眼标定。手眼标定技术是基于视觉的机器人控制的重要组成部分,它的目的是测算搭载在机器人末端执行器上的相机坐标系到末端执行器坐标系的姿态变换矩阵^[1-3]。

自1989年Tsai和Shiu等首次提出手眼标定问题^[4]

收稿日期:2022-03-09

修回日期:2022-04-06

基金项目:辽宁省教育厅基础研究项目(一般项目)(JYT2020018);辽宁省教育厅《双座电动飞机驱动电机容错控制关键技术研究》(JYT19002)

以来,国内外学者对此进行了大量的研究。目前研究领域上,根据标定方式的不同,手眼标定可分为传统相机标定法与相机自标定法两种。传统相机标定法,如1998年提出的张正友标定法^[5]是一种单平面棋盘格的相机标定方法,该方法利用棋盘格的角点作为特征点,克服了标定过程中需要高精度、高标准标定物的要求。相机自标定法^[6-7]由Faugeras等于20世纪90年代提出,常应用于相机内部参数需要调整或相机的位姿发生变换时。相机的自标定方法灵活性强,主要是利用相机运动的约束性,可对工业相机进行在线标定,不需要精确的参照物,通过获取的图像序列完成相机内外参数的计算。但上述两种方法标定过程繁琐复杂,计算量大,操作方法复杂且鲁棒性差,不适用于Eye-to-hand方式的单目视觉的物料抓取系统。

针对上述问题,本文利用ABB六轴工业机器人具有响应时间短、动作迅速、自动化程度高、精度高、控制性能方便灵活等优点,提出一种新型的标定方法,利用自制圆模式的标靶,将圆心作为特征点,其具有受环境影响小、快速简单、准确率高、算法鲁棒性强等优点。通过建立标靶坐标系与机器人坐标系的关系,可获得高精度的标定结果,因此该方法可应用于实际操作中。

1 系统组成

物料抓取系统主要包括工业机器人、单目视觉、工控机和传送带等部分,如图1所示。工业相机位于抓取平台上方,即Eye-to-hand结构,该结构视觉视角广且连接方式简单,运输带起到传送物料的作用。工控机含有物料抓取系统所需的软件模块,通过以太网与控制柜及视觉系统进行通信,将获取的图像数据传至工控机进行图像处理来提取有用信息。物料抓取机器人的控制功能主要通过机器人控制柜来实现,工控机与控制柜通过通信进行数据交换,工控机将末端在基坐标系的相对运动量发送给机器人控制柜,机器人当前的位姿从机器人的控制柜中读取^[8]。

2 机器人系统标定

2.1 相机模型

对相机进行标定是对机器人进行引导的前提,本文提出了一种基于新型标靶的标定方法,标靶上的一点坐标 (x_B, y_B, z_B) 映射到图像坐标系的坐标 (u, v) ,表达式为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{in} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{in} \mathbf{M}_{out} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: s 为深度系数; $\mathbf{M}_{in} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为相机的内参数矩阵; (k_x, k_y) 是相机模型的畸变参数; (u_0, v_0) 为图像坐标系的原点;相机的外参数矩阵 \mathbf{M}_{out} 用旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 表示。

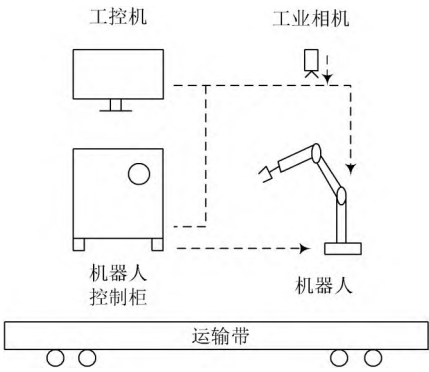


图1 整体系统结构示意图

2.2 手眼标定原理

本文提出一种便捷的机器人手眼标定方法,其基本过程如图2所示。首先利用机器手工具尖端触碰几组标靶特征点的圆心并记录这些特征点在机器人坐标系下的坐标值,同时记录特征点的标靶坐标,通过非共线三点以上的对应点坐标可求出机器人世界坐标系与标靶坐标系的关系矩阵 ${}^R_B\mathbf{T}$;其次,利用视觉单元^[9]检测自制标靶的图像坐标,利用线性插值法计算标靶坐标与像素坐标之间的关系 ${}^C_B\mathbf{T}$,进而得出图像坐标与机器人世界坐标的关系 ${}^R_C\mathbf{T}$ 。

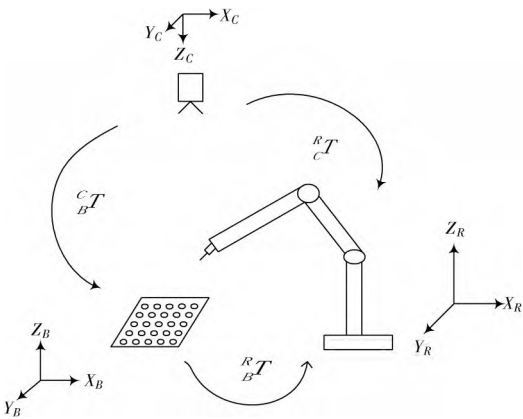


图2 机器人手眼标定模型图

变换关系表达式为:

$${}^R_C\mathbf{T} = {}^R_B\mathbf{T} {}^C_B\mathbf{T} = {}^R_B\mathbf{T} {}^C_B\mathbf{T}^{-1} \quad (2)$$

3 标定过程

3.1 机器人坐标与标靶坐标的关系

为了更容易地获取机器人与工业相机的坐标关系,

文中方法引入自制的标靶,通过操作机器人求出标靶与其他坐标系之间的关系,以此建立桥梁,从而得到相机坐标系和机器人坐标系的变换关系。

建立机器人坐标系,因为机器人在获取标靶信息时需求精度极高,所以在工业机器人的吸盘上安装一个尖端,用此尖端去触碰标靶的选取圆点的圆心,此时读取机器人示教器上的机器人坐标值。

建立的标靶坐标系如图3所示,设 p_1 的圆心点为坐标轴原点,以横向为 X 轴方向,纵向为 Y 轴方向, Z 轴垂直于标靶。实验中,所有标靶的每个圆形的圆心距离为20 mm, p_1,p_2,p_3,p_4 四个点坐标分别为 $(0,0),(80,0),(0,80),(80,80)$ 。

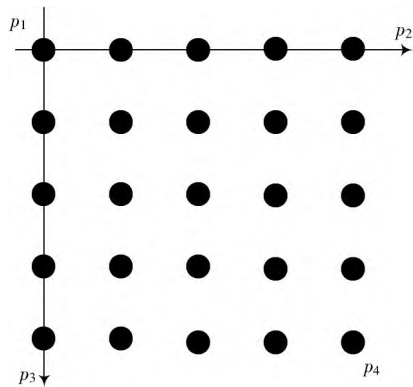


图3 自制标靶坐标示意图

获取机器人与标靶之间的空间关系。基于上述过程,将分别获取的机器人的世界坐标系设为 (x_R,y_R,z_R) ,标靶坐标系设为 (x_B,y_B,z_B) ,则机器人世界坐标系与标靶坐标系之间的转换为:

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^R_B T = \begin{bmatrix} A & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: A 为标靶坐标系在机器人坐标系的旋转变换矩阵; p 为平移向量; ${}^R_B T$ 为变化矩阵。

旋转变换矩阵 A 的求解公式设为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

应用空间向量的机器人与标靶位姿标定的计算方法^[10]计算上述矩阵 A 的系数,利用特征点 p_1 和特征点 p_2 可求出系数 a_{11},a_{21},a_{31} ,根据 p_2,p_3 和 p_4 可求出系数 a_{12},a_{22},a_{32} 。各系数求解公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} a_{11} &= \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \\ a_{21} &= \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \\ a_{31} &= \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \\ a_{12} &= \frac{x_3 - x_1}{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2 + (z_4 - z_1)^2}} \\ a_{22} &= \frac{y_3 - y_1}{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2 + (z_4 - z_1)^2}} \\ a_{32} &= \frac{z_3 - z_1}{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2 + (z_4 - z_1)^2}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式(6)所描述的 x_i,y_i,z_i 是在机器人坐标系下, p_i 为 x,y,z 方向的坐标向量。根据空间向量与平面向量相垂直,则系数为 a_{13},a_{23},a_{33} :

$$(a_{13},a_{23},a_{33}) = (a_{11},a_{21},a_{31}) \times (a_{12},a_{22},a_{32}) \quad (7)$$

标定过程示意图如图4所示。根据上述操作方法采集记录一组数据,如表1所示,综合上述计算方法可得到平面上固定的自制标靶与机器人世界坐标的内部数学关系矩阵。

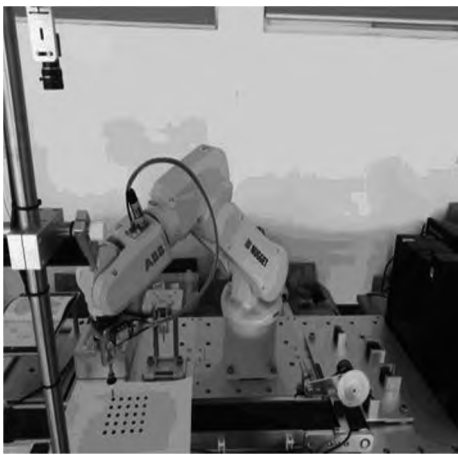


图4 标定过程示意图

表1 机器人各坐标系下位置数据 mm

机器人世界坐标	标靶坐标
(334.22,-386.72,296.11)	(0,0,0)
(332.55,-308.62,297.74)	(80,0,0)
(416.33,-385.76,299.78)	(0,80,0)
(416.09,-305.90,297.39)	(80,80,0)

3.2 图像坐标与标靶坐标的关系

对自制标靶图像进行图像处理,利用Hough变换可

以求得自制标靶上每个特征点的图像坐标 (u,v) ,同时记录每个特征点对应的标靶坐标 (x_i,y_i,z_i) ,从而得到一个二维到三维的对应关系,如图5所示。

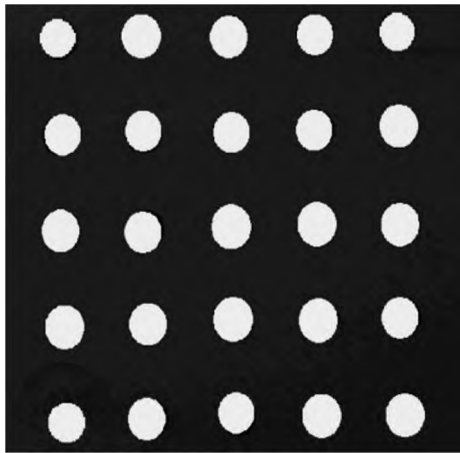


图5 特征点图像坐标获取效果图

利用线性插值法进行插值,求得两种坐标的转换关系,则任意一点标靶坐标的线性插值的表达式为:

$$x = x_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{x_{i+1} - x_i}(u - u_i) \tag{8}$$

$$y = y_i + \frac{v_{i+1} - v_i}{y_{i+1} - y_i}(v - v_i) \tag{9}$$

式中: $i=0,1,2\cdots$,表示线性插值的分区次数,根据物料位置确定位置所属分区,并把测量数据中 u,v 值和 x,y 值作为分区界限值; x_i,y_i 表示第 i 个分区标靶坐标系的 X,Y 轴的坐标值; u,v 表示第 i 个分区图像的 X,Y 轴的坐标值。式(8)、式(9)中, u,v 对应于图像坐标 X,Y 轴区间 $[u_i - u_{i+1}],[v_i - v_{i+1}]$ 的值。

4 实验验证

4.1 机器人坐标与标靶坐标关系验证

利用上述计算方法推算矩阵 R_bT 为:

$${}^R_bT = \begin{bmatrix} -0.0213 & 0.7137 & -0.0152 & 334.22 \\ 0.9982 & 0.0083 & 0.0083 & -386.72 \\ -0.0559 & 0.0319 & -0.0018 & 296.11 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将特征点的标靶坐标系反代入推算矩阵,反代入后机器人坐标系下的坐标如表2所示。由表1、表2对比可知,得到的计算值与实际坐标值大致相同,且误差不超过3 mm,证明该演算过程正确,矩阵关系成立。

4.2 图像坐标与标靶坐标关系的验证

在自制标靶范围内,任意选取4个特征点,通过图像处理 Hough^[11]变换获取特征点的图像坐标,使用第3.2节的计算方式,得出4个特征点的标靶坐标系计算值,如表3所示。将计算值与实际值进行对比,发现误差不足2 mm,证明该运算方法可行性高。

表2 反代入后机器人坐标系下的坐标

序号	在机器人坐标系上的坐标
1	(334.22,-386.72,296.11)
2	(332.516,-317.62,294.89)
3	(414.08,-386.06,296.77)
4	(412.372,-308.96,295.558)

表3 图像坐标标定实验数据

图像坐标 /pixel	标靶坐标 /mm	标靶计算值 /mm
(543,211)	(20,20)	(19.8,20.1)
(666,272)	(60,40)	(61.2,39.1)
(486,337)	(0,60)	(0.67,60.2)
(667,331)	(60,60)	(61.5,58.2)

4.3 系统验证

如图6所示,分4次在标靶范围内任意置放一小型工件并检测其图像坐标,将计算值与实测值进行对比验证,结果如表4、表5所示。

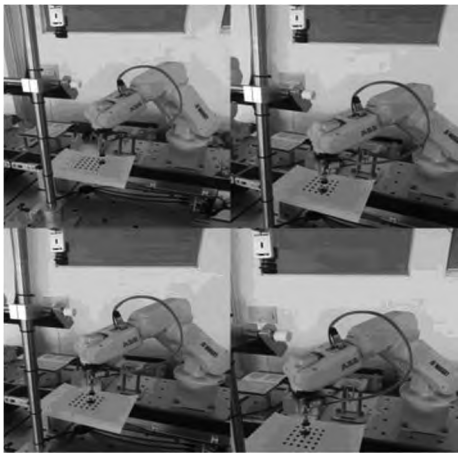


图6 标定实验现场图

表4 工件位置实验数据对比 mm

序号	机器人世界坐标实测值	机器人世界坐标计算值
1	(355.20,-345.78,297.30)	(353.33,-348.01,295.67)
2	(375.76,-323.01,294.93)	(372.87,-323.60,295.53)
3	(395.19,-323.00,294.78)	(392.83,-323.4,295.69)
4	(415.69,-362.98,296.94)	(413.65,-361.78,296.47)

根据表5实验结果可知, X 方向误差均值为2.79 mm, Y 方向误差均值为1.62 mm, Z 方向误差均值为0.90 mm,

且每次操作最大实验误差均不超过 3 mm,误差均值,误差方差都很稳定,证明该标定方法有效且可行性高。

表 5 误差实验结果

类型	误差均值	误差方差	最大误差
X 方向误差	2.79	0.87	4.04
Y 方向误差	1.62	3.26	4.28
Z 方向误差	0.90	0.27	1.63

5 结 语

本文提出了一种新型标定方法,使用自制的圆形标定板,避免了原棋盘格标定板要求精度高、操作过程复杂的限制,同时可获得简化模型中的所有参数。该方法避免了多个坐标系之间的复杂变换,且操作简单,缺点是目
前仅适应于平面范围内。通过对实物抓取实验结果进行分析,验证了结果的准确性。通过对测量误差结果进行分析,转换后实验点的位置误差可控制在 3 mm 以内,满足工业机器人物料抓取作业要求。

参 考 文 献

[1] 李志敏,林雅洁,张砦,等.基于地面移动机器人的相机标定实验设计[J].实验技术与管理,2020,37(12):89-93.
[2] 谢丰隆,韩建海,李向攀.一种快速的机器人固定视觉标定方法[J].机械设计与制造,2018(11):237-240.
[3] 任杰轩,张旭,刘少丽,等.一种高精度机器人手眼标定方法[J].现代制造工程,2020(4):44-51.

[4] LI M Y, DU Z J, MA X X, et al. A robot hand-eye calibration method of line laser sensor based on 3D reconstruction [J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2021, 71 (2017): 102136.
[5] DENG S C, MEI F, YANG L, et al. Research on the hand-eye calibration method based on monocular robot [J]. Journal of physics: conference series, 2021, 1820(1): 012007.
[6] SUN Y W, PAN B, GUO Y C, et al. Vision-based hand-eye calibration for robot-assisted minimally invasive surgery [J]. International journal of computer assisted radiology and surgery, 2020(15): 2061-2069.
[7] SARA S, ISTVAN B, PETER K. Robust hand-eye calibration of 2D laser sensors using a single-plane calibration artefact [J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2020, 61: 101823.1-101823.10.
[8] 张弛,普杰信,牛新月.基于视觉导引与机器人的自动对准策略[J].火力与指挥控制,2020,45(9):140-145.
[9] 陈洵凇,殷素峰,黎小巨,等.一种改进的基于九圆点的摄像机自标定算法[J].机床与液压,2021,49(1):86-90.
[10] 王伟.基于视觉引导的机器人系统标定及跟随控制的问题研究[D].武汉:湖北工业大学,2017.
[11] 吉协福.基于视觉的建筑垃圾机器人分拣系统研究[D].赣州:江西理工大学,2020.
[12] 曾灿灿,倪磊,倪晋.机器人气囊抛光工具的参数标定[J].机械科学与技术,2020,39(7):1060-1065.
[13] 燕浩,程小虎,杨正蒙,等.基于手眼关系与基坐标关系的协作焊接机器人标定[J].机械工程与自动化,2020(4):27-30.
[14] 徐呈艺,刘英,贾民平,等.木板抓取机器人手眼标定方法[J].农业机械学报,2019,50(12):420-426.

作者介绍:张庆新(1970—),男,河北人,博士,教授,研究方向为自动化技术、工业机器人仿真技术。
牟金星(1997—),男,辽宁丹东人,硕士,研究方向为工业机器人控制技术、机器视觉、图像处理。
王路平(1989—),女,辽宁锦州人,硕士,研究方向为智能机器人控制技术。
陈新禹(1986—),男,辽宁鞍山人,博士,讲师,研究方向为视觉测量、焊接自动化、三维数据处理。
谢文傲(1996—),男,辽宁铁岭人,硕士,研究方向为机器视觉、工业机器人仿真技术。
刘 畅(1996—),女,辽宁本溪人,硕士,研究方向为视觉传达。