

## 锻压线搬运机器人的视觉标定

王 卿, 岳建锋, 杨方兴, 王天琪

(天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

**摘 要:** 针对传统锻压生产线机器人与工件标定方法耗时长、精度低等问题, 提出一种视觉标定的方法, 确定机器人与工件的位置关系. 利用摄像机参数标定工具箱实现对平面标定模板的角点提取和校正, 得到摄像机的内外参数. 通过示教工件坐标的试验, 验证了该标定方法的可行性. 结果表明: 该方法可以保证机器人对工件快速准确的抓取, 得到工件坐标的平均误差在 0.3% 以内, 标定精度达到生产线的实际要求.

**关键词:** 锻压线; 搬运机器人; 视觉标定; 标定工具箱; 相机内外参数

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2014)02-0066-04

### Vision calibration about robot in forging production line

WANG Qing, YUE Jian-feng, YANG Fang-xing, WANG Tian-qi

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In forging production line, solving the problem of workpiece calibration by the traditional method is low efficiency and poor accuracy, so a visual calibration method is proposed to get the posture relationship between robot and workpiece. To obtain the intrinsic and extrinsic parameters of camera, a calibration toolbox is used to extract grid corners and calibrate the plane calibration template. A teaching workpiece's coordinates experiment is used to test the validity of the method above. The experimental result shows that the robot could finish the workpiece grasping job quickly and accurately, the average error of workpiece coordinate is within 0.3% and the accuracy of the calibration can meet the requirements of the actual production line.

**Key words:** forging production line; robot; vision calibration; camera calibration toolbox; camera's intrinsic and extrinsic parameters

针对传统工业锻压生产线上锻压件无法完成自动搬运的问题, 为了实现“一火多锻”的目的, 先进的锻压生产线正逐步利用搬运机器人代替人工实现对工件的快速搬运. 机器人搬运的技术难点在于如何快速准确地确定机器人与锻压件的位置关系以及工件更换后机器人与工件的重新定位问题. 哈尔滨工业大学宋月娥等<sup>[1]</sup>针对一般工件的特点, 提出 3 种基于机器人示教的工件标定方法, 这些标定方法实用面很广, 但是不能满足测量精度的要求, 且效率低, 不适于锻压件的快速标定. 国外先进的生产线中, 搬运机器人多采用视觉系统控制. 如欧宝、保时捷等知名品牌汽车的生产线, 使用了多台摄像机进行模式识别和 3D 定位; 瑞士 SIG 公司研发了一种结合视觉系统的机器人, 可以完成对输送机上货物的迅速抓取<sup>[2]</sup>. 运用视觉

标定的方法对机器人与工件的位置关系进行确定, 效率和精度较高, 且易于实现工件更换后的重新定位. 结合锻压生产线的特点, 本文采用视觉系统控制搬运机器人. 机器人视觉系统的标定主要包括机器人手眼关系的标定与摄像机标定 2 部分. 而摄像机的标定又是视觉控制中最基础的一部分<sup>[3-5]</sup>. 关于摄像机参数的标定, 理论研究已经比较成熟, 当前研究工作的重点是针对实际问题找到简便、快速、准确的标定方法<sup>[6]</sup>. 相机标定与摄像机标定同理<sup>[7]</sup>.

### 1 机器人手眼关系的标定

机器人手眼关系标定即对摄像机和机器人之间的关系进行确定. 根据摄像机与机器人的相互位置不

收稿日期: 2013-06-24 基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(10JCZDJC23500)

第一作者: 王 卿(1989—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 岳建锋(1973—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. E-mail: billyue7303@sina.com

同分为 Eye-in-hand 系统和 Eye-to-hand 系统. Eye-in-hand 系统的摄像机安装在机器人末端, 在拍摄工作中随机器人末端一起移动. Eye-to-hand 系统的摄像机位置固定, 不随机器人末端一起移动<sup>[9]</sup>. 由于后者具有视场范围固定、标定过程相对简单、系统稳定可靠的特点, 本文采用 Eye-to-hand 系统, 标定时求取的是摄像机坐标系相对于机器人的世界坐标系的关系, 如图 1 所示.

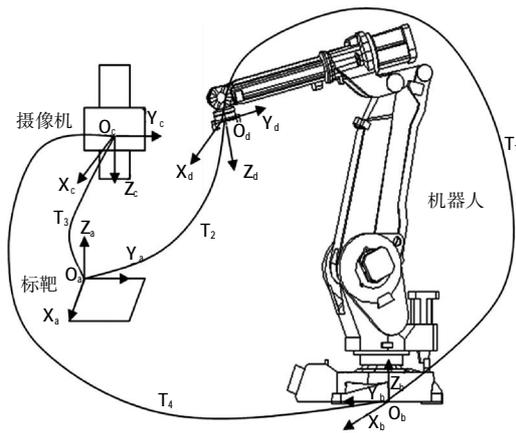


图 1 机器人与摄像机坐标系标定关系

Fig.1 Calibration of robot and camera coordinate system

标定的具体步骤如下:

(1) 采用 ABB 机器人, 在机器人末端安装机械手爪后要要进行工具标定. 对工具坐标系的标定采用五点法, 标定完成后, 通过机器人示教盒能够直接显示出机器人工具坐标系在基座标下的位置及姿态, 即工具坐标系和机器人基座标系之间的关系  $T_1$ .

(2) 通过机器人末端手爪示教标靶 3 个特殊参考点的方法, 根据三点成面公式, 标定机器人的工具坐标系与标靶坐标系之间的关系  $T_2$ .

(3) 标定摄像机的外部参数, 得到摄像机坐标系与标靶坐标系之间的关系  $T_3$ . 如图 1 所示,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  构成一个封闭解, 利用矩阵变换获得摄像机坐标系相对于机器人世界坐标系的关系  $T_4$ .

$$T_4 = T_1 T_2 T_3 \quad (1)$$

## 2 摄像机标定

### 2.1 摄像机成像模型

带有透镜径向畸变的摄像机模型是对理想的小孔成像模型的一个修正, 它考虑了沿透镜径向的畸变<sup>[9]</sup>, 如图 2 所示.

在摄像机的光轴中心建立坐标系, 坐标系原点在  $O$  点(光学中心),  $z$  轴方向平行于摄像机光轴,  $X$  轴方

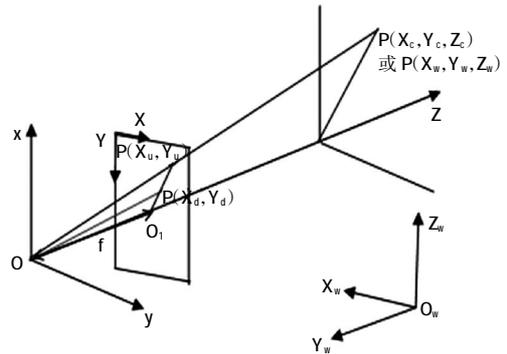


图 2 考虑透镜径向畸变的小孔成像模型

Fig.2 Pinhole imaging model considering radial lens distortion

向取图像坐标沿水平增加的方向.  $(X, Y)$  是图像坐标系, 其原点在  $O_1$  点(光轴  $Z$  与图像平面的交点)上,  $X$ 、 $Y$  轴分别平行于摄像机坐标的  $x$ 、 $y$  轴. 焦距  $f$  是图像平面和光学中心的距离. 设  $(x_w, y_w, z_w)$  是三维世界坐标系中物体点  $P$  的三维坐标;  $(x_c, y_c, z_c)$  是点  $P$  在摄像机坐标系中的三维坐标;  $(X_u, Y_u)$  是在理想小孔成像模型下  $P$  点的图像坐标;  $(X_d, Y_d)$  是由透镜变形引起偏离  $(X_u, Y_u)$  的实际图像坐标.

### 2.2 摄像机标定原理

摄像机标定是获得相机内部参数和外部参数, 建立图像中像素坐标与空间位置之间关系的过程. 相机标定的基本方法是利用标靶放在相机前采集图像, 通过图像处理获得特征点的图像坐标, 再利用这些特征点位于世界坐标系下的位置, 求得摄像机的内部参数和外部参数.

摄像机的内部参数模型为:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: 矩阵  $A$  便是相机的内参数矩阵, 被称为相机的四参数模型, 若考虑到摄像机的畸变, 则应使用相机的五参数模型.

摄像机的外参数反映了摄像机坐标系下的空间点  $(x_c, y_c, z_c)$  与世界坐标系下位置  $(x_w, y_w, z_w)$  之间的转换关系, 外参数矩阵由 1 个旋转矩阵和 3 个平移参数组成, 则有(3)式.

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: 旋转矩阵  $R$  是一个  $3 \times 3$  的矩阵; 平移矩阵  $T$  是

一个 3×1 的矩阵. 由式(2)、式(3)联立得:

$$Z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = A T_1 \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

公式(4)直接反应了世界坐标系坐标与图像坐标的相互关系. 其中:A 表示相机的内部参数;T<sub>1</sub> 表示相机的外部参数.

### 2.3 摄像机标定实验

在实验中采用 10×10 的黑白棋盘作为平面标定模板,如图 3 所示,每个模板的正方形格子边长为 40 mm,摄像机输出平面分辨率为 1 024×1 024. 采用 Matlab 标定工具箱对摄像机进行标定,具体标定过程如图 4 所示.

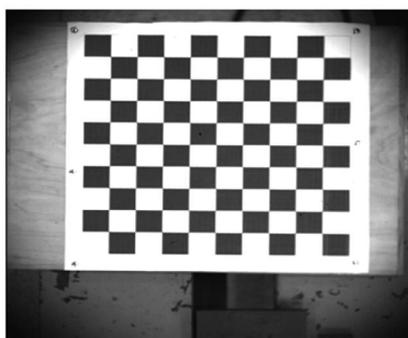


图 3 标定模板

Fig.3 Calibration template

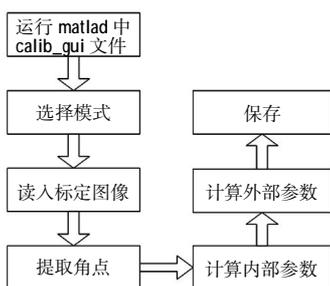


图 4 相机参数标定过程

Fig.4 Process of camera parameter calibration

将 toolbox\_calib 文件添加到 Matlab 的工作路径中,读取 10 张在不同位置和姿态下的标定模板图像. 运行主函数 calib\_gui,显示选择模式窗口,本实验选择标准模式. 在标定工具箱中点击 Read images 读入所有标定图像,点击 Extract grid corners 进行图像网格角点提取,最后点击 Calibration 校准图像,计算摄像机的内部参数. 内部参数的标定结果如表 1 所示.

由于 x 和 y 像素坐标轴的角度非常接近于 90°,

表 1 摄像机内部参数

Tab.1 Camera's intrinsic parameters

内部参数	有效数值/mm	偏差估计/mm
有效焦距 [f <sub>x</sub> , f <sub>y</sub> ]	[1 563.806 872 714 013 300; 1 565.990 238 430 997 600]	[5.037 247 096 583 736; 5.054 981 302 119 008]
主点坐标 [c <sub>x1</sub> , c <sub>y1</sub> ]	[515.702 106 808 701 960; 494.359 110 449 417 810]	[6.818 097 465 561 452; 6.558 939 113 983 412]
畸变系数 k <sub>c</sub>	[0.003 800 661 022 799; 0.064 887 523 912 273;	[0.025 424 904 013 476; 0.252 693 030 731 361;
	-0.002 252 734 572 708;	0.001 621 545 785 893;
	-0.000 826 230 262 949;	0.001 649 859 231 848;
	0.000 000 000 000 000]	0.000 000 000 000 000]

所以在工具箱标定中假设像素扭曲系数 alpha\_c=0. k<sub>c</sub> 为图像失真系数(径向和切向扭曲),存储在一个 5×1 的矢量矩阵中.

在内部参数已知的情况下,点击 Comp.Extrinsic 按钮,计算摄像机坐标系相对于标靶固定点坐标系的转化关系,即摄像机外部参数,外参标定结果如表 2 所示.

表 2 摄像机外部参数

Tab.2 Camera's extrinsic parameters

外部参数	有效值/mm
平移矢量	[-149.304 -204.570 935.540]
旋转矢量	[2.207 2.226 -0.034]
旋转矩阵	[-0.009 1.000 -0.011 1.000 0.009 -0.020 -0.020 -0.011 -1.000]
像素偏差	[0.155 0.163]

从以上实验过程可以看出,基于 Matlab 的标定方法操作简单、设置灵活、可视化好,具有较高的精度和鲁棒性. 但是当标定的图像大量失真时,再进行校正,程序可能无法自动计算出网格中的正方形个数,因此在标定过程中应避免标靶图像大量失真的情况. 当标靶图像大量失真时,需要手动输入网格中的正方形个数,比较繁琐,这将是下一步研究的重点方向.

### 3 机器人抓取实验

将同一工件作为目标,水平放置在 5 个不同的位置,工件所处的位置均有较大差异. 首先示教工件表面几何中心的实际位置,然后通过摄像机拍照和图像处理,找到工件边缘和其表面几何中心点,计算出表面几何中心点的位置坐标. 实验得到的工件几何中心点的位置如表 3 所示.

表3 目标表面几何中心点的定位结果

Tab.3 Positioning result of target surface geometric center

工件位置	实际坐标( $x_1, y_1$ )	求得坐标( $x_2, y_2$ )	$\Delta x/\%$	$\Delta y/\%$
a	(240.5, 82.3)	(239.9, 81.9)	0.25	0.49
b	(135.8, 58.1)	(136.1, 58.3)	0.22	0.34
c	(70.1, 189.6)	(69.9, 190.1)	0.29	0.26
d	(289.5, 89.6)	(288.9, 89.8)	0.21	0.22
e	(66.8, 215.9)	(66.5, 215.5)	0.45	0.19

由表3中数据计算表面几何中心点坐标的平均误差不大于0.3%,误差较小,表明该标定系统准确可用,位置精度能够满足锻压生产线的要求。

#### 4 结束语

本文针对锻压线搬运机器人与锻压件的标定问题进行研究,结合实验室的现有条件,得出如下研究成果:

(1) 通过一种机器人视觉标定的方法标定出了工件坐标系相对于机器人基坐标系之间的关系。

(2) 对摄像机进行标定分析和实验,由实验数据得到了摄像机的内外参数,确定了图像坐标系和工件坐标系之间的关系。

(上接第65页)

#### 4 结束语

本文针对异步电机的传统直接转矩控制在低速运行时转矩脉动大的问题,提出了一种利用零矢量代替反向矢量实现转矩下降的方法,改进了开关表并优化了磁链与转矩滞环控制器。实验结果表明,该方法有效的降低了转矩脉动,并且通过采用新型滞环器解决了磁链衰减和转矩不能迅速下降的问题,使系统在正常运行的前提下有效地减小了转矩脉动,优化了系统性能并拓宽了电机低速运行范围。此方案操作简单,效果明显,是解决此类问题的较好方案,为以后对减小转矩脉动的深入研究提出了一种思路和方向,并且易于硬件实现,有较好的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 巫庆辉,邵诚,徐占国.直接转矩控制技术的研究现状与发展趋势[J].信息与控制,2005,34(4):444-450.

(3) 依据标定得到的数据以及图像处理结果,进行了机器人抓取工件的实验,工件抓取的误差不大于0.3%,验证了该标定方案的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 宋月娥,吴林,田劲松,等.用于机器人离线编程的工件标定算法研究[J].哈尔滨工业大学学报,2002,34(6):735-738.
- [2] 董文辉.基于机器视觉的工业机器人抓取技术的研究[D].武汉:华中科技大学,2011:1-3.
- [3] 陈一民,张涛,薛广涛.基于网络和Linux的机器人仿真和监控系统[J].机器人,2001,23(4):356-362.
- [4] 徐德.机器人的实时视觉控制与定位研究[R].北京:中国科学院自动化研究所,2003.
- [5] 张广军.机器视觉[M].北京:科学出版社,2004.
- [6] 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,2003.
- [7] KUO H C, WU L J. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(2): 169-185.
- [8] 徐德,谭民,李原.机器人视觉测量与控制[M].北京:国防工业出版社,2008:3-50.
- [9] PREISING B, HSIA T C. Robot performance measurement and calibration using a 3D computer vision system [J]. Robotica, 1995, 13: 327-337.
- [2] 张岳,王凤翔.直接转矩控制技术研究综述[J].微电机,2007,40(9):72-76.
- [3] 王焕钢,徐文立,黎坚,等.一种新型的感应电动机直接转矩控制[J].中国电机工程学报,2004,24(1):107-111.
- [4] 冯亮,王芳林.异步电机直接转矩控制的滞环控制器研究[J].电气传动,2008,38(8):28-31.
- [5] 瞿成明,江明,陈其工.直接转矩控制转矩脉动最小化方法研究[J].电子科技大学学报,2006,35(6):942-945.
- [6] 高志光,张爱玲,蔚兰.一种改进的转矩和磁链调节器异步电机直接转矩控制系统的研究[J].电机与控制学报,2004,8(3):218-221.
- [7] 瞿成明,时少军,薛树功,等.滞环容差自适应算法的直接转矩控制研究[J].电子科技大学学报,2013,42(1):75-80.
- [8] 高圣伟,蔡燕,汪友华,等.转矩滞环幅值可调的直接转矩控制方法研究[J].天津工业大学学报,2010,29(3):58-61.
- [9] FATIHA Z, RACHD N S. Direct torque control of induction motor with fuzzy minimization torque ripple[J]. Journal of Electrical Engineering, 2005, 56(7/8): 183-188.