

基于视觉标定的包装搬运机器人定位方法

马晓燕, 张永胜

(阿拉善职业技术学院, 内蒙古 阿拉善盟 750336)

摘要: **目的** 为了提高包装搬运机器人的定位精度, 提出一种基于机器视觉的末端执行器定位方法。**方法** 基于 OpenCV 设计一种视觉标定算法, 该算法包括摄像机标定和位姿标定, 可实现待码放物体图像坐标和机械手坐标之间的变换。结合工控机和运动控制卡设计其控制系统, 同时给出硬件设计和软件设计方法。最后进行实验研究, 包括原点定位和重复定位。**结果** 实验结果表明, 所述控制方法能够提高搬运机器人的定位精度, 原点定位误差约为 0.14 mm, 重复定位误差约为 0.6 mm。**结论** 该搬运机器人定位方法能够满足包装码垛要求。

关键词: 包装机器人; 摄像机标定; 位姿标定; 机器视觉

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)21-0211-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.031

Positioning Method of Package Handling Robot Based on Visual Calibration

MA Xiao-yan, ZHANG Yong-Sheng

(Alxa Vocational & Technical College, Alxa 750336, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an end-effector positioning method based on machine vision, so as to improve the positioning accuracy of the package handling robot. Based on OpenCV, a visual calibration algorithm was designed, which included camera calibration and pose calibration. The transformation between image coordinate of the object to be stacked and manipulator coordinate was realized. The control system was designed based on the IPC and the motion control card. In the meantime, design methods of hardware and software were given. Finally, experimental studies were carried out, including origin positioning and repeated positioning. The experimental results showed that, the proposed control method could improve the positioning accuracy of the handling robot, with the origin positioning error of about 0.14 mm and the repeated positioning error of about 0.6 mm. The positioning method of the handling robot can meet the requirements of packaging and palletizing.

KEY WORDS: packaging robot; camera calibration; pose calibration; machine vision

随着自动化技术的不断发展, 工厂对生产线的智能化要求越来越高, 极大地推动了码垛机器人的发展。当前码垛机器人在众多行业的应用非常广泛, 例如: 仓储物流、机械制造、食品饮料、化工等, 已经变成整条自动化流水线中非常重要的部分^[1-3]。其中多关节、多自由度码垛机器人是一种使用最多、效果最好、十分典型的设备, 该类型码垛机器人具有高灵

活性、高稳定性、操作简单等特点。国内绝大多数码垛机器人从国外采购, 不仅价格非常高而且关键技术受制于人。近几年, 我国码垛机器人技术发展比较快, 不过同进口产品相比, 在某些方面依旧存在不小差距, 如: 通用性、稳定性、智能化程度、自动化水平、核心技术掌控力、关键技术应用等^[4-7]。

“示教再现”能大幅度提高现场操作效率, 直观地

收稿日期: 2019-04-01

作者简介: 马晓燕(1980—), 女, 双学士, 讲师, 主要研究方向为机械自动化。

展现运动轨迹,是码垛机器人必备功能之一。不过实际生产过程中待码放物体的实际位置并不是固定不变的,单纯依靠“示教再现”恐难以满足高速、高精度运动要求^[8-12]。最近几十年,国内对码垛机器人的研究比较多,涵盖控制系统设计、轨迹规划、结构设计等诸多方面,例如:李成伟等^[13]设计了一种四自由度码垛机器人,对控制系统基于模块化进行设计;上位机以PC机为核心,主要实现作业监控、管理;下位机以PLC和PMAC为核心,主要实现运动规划和控制。苏海新等^[14]以四自由度码垛机器人为研究对象,创造性地使用七连杆机构进行结构设计;以IPC和PMAC为核心设计控制系统,可实现多项功能,具有实时性好、开放性强等特点。焦恩璋等^[15]以常用码垛机器人为平台,将机器视觉引入控制系统,可以估计目标下一时刻位置,支持机器人抓取动态目标。

文中在现有研究的基础上,以码垛机器人末端执行器定位为研究对象,提出一种视觉标定算法,并给出相应控制系统设计方案,通过实验验证所述标定算法的有效性。

1 原理介绍

通常情况下,码垛机器人具有较大的工作空间。在视觉处理过程中,为了避免图像特征覆盖,以提高所获图像精度,所以文中将摄像机固定在机械手末端。此种情况下,需要解决码垛机器人视觉系统的视觉标定,主要包括两部分:摄像机标定,完成世界坐标和图像坐标之间的变换;位姿估计,完成世界坐标和机械手坐标之间的变换;进而计算出待码放物体图像坐标和机械手坐标之间的对应关系。

1.1 摄像机标定

为了实现世界坐标和图像坐标之间的变换,需要建立摄像机成像模型,见图1。可定义几个坐标系:世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 、摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 、图像坐标系 O_{xy} 、像素坐标系 $O_o u_o v_o$,那么成像模型可描述为:

$$S \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S 为尺度因子; f_x, f_y, u_0, v_0 为摄像机内参数; r_i, t_j 为外参数。

众所周知,OpenCV 选用“张正友针孔摄像机模型”,该模型含有透镜畸变。非线性畸变可表示为:

$$\delta_x(x, y) = k_1 x(x^2 + y^2) + [p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy] + s_1(x^2 + y^2) \quad (2)$$

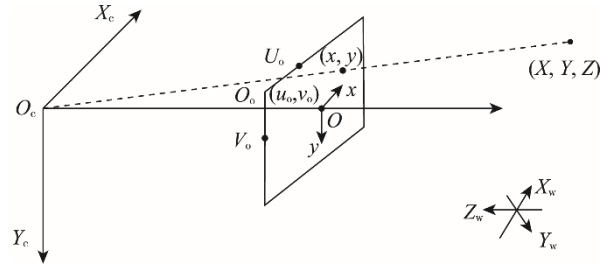


图1 摄像机成像模型
Fig.1 Camera imaging model

式中: δ_x, δ_y 均表示非线性畸变值; k_1, k_2 为径向畸变; p_1, p_2 为切向畸变。

OpenCV 标定流程可作以下描述。

- 1) 读取所采集棋盘图像,并提取其角点。
- 2) 针对步骤1)棋盘图像进行亚像素化处理,进而计算角点的亚像素坐标值。
- 3) 通过上述标定方法获取摄像机相关参数,包括内参数、外参数、畸变参数和投影误差等。

如果空间坐标 (X, Y, Z) 为待码放物体的中心坐标,假设某姿态下棋盘图像和待码放物体所在平面共面,那么该姿态下棋盘外参数就是世界坐标和图像坐标变换的外参数。基于式(1)就可以通过世界坐标 (X, Y, Z) 计算图像坐标 (x, y, z) ,即实现了摄像机标定。

1.2 位姿标定

文中通过设定标记点来实现世界坐标和机械手坐标之间的变换,假设机械手处于原点状态,那么机械手坐标系中标记点摆放位置见图2。其中左侧4个点 P_1-P_4 表示机械手坐标系下的标记点,右侧4个点 p_1-p_4 表示摄像机图像平面内的标记点。

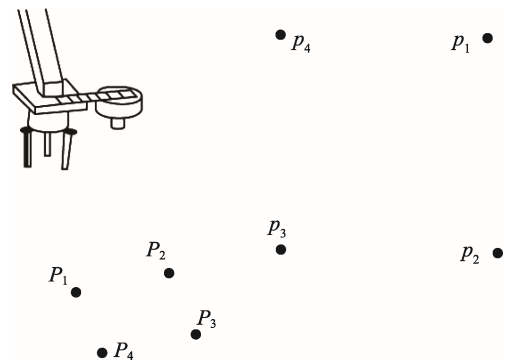


图2 标记点位置
Fig.2 Marker position

点 P_1-P_4 到点 p_1-p_4 的变换可通过旋转向量和平移向量来描述,具体可表示为:

$$T(v) = Rv + t \tag{4}$$

式中： R 为旋转向量； t 为评议向量。

由于待码放物体基本都位于同一平面，所以文中设定圆心坐标 $Z=0$ ，则存在：

$$S \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中： x, y 为待码放物体的图像坐标值； X, Y 为待码放物体的机械手坐标值。

经简化处理可得：

$$S \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t_1 \\ r_4 & r_5 & t_2 \\ r_7 & r_8 & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

可定义 2 幅图像之间的单应性为 H ，若令：

$$H = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t_1 \\ r_4 & r_5 & t_2 \\ r_7 & r_8 & t_3 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

则有：

$$Sx = HX \tag{8}$$

经变换可得：

$$X = H^{-1}Sx \tag{9}$$

式 (9) 可用于求解机器人的移动坐标，从而实现了位姿估计。

2 控制系统设计

2.1 硬件设计

码垛机器人硬件系统主要包括工控机和运动控制卡，其中工控机是整个控制系统的核心；运动控制卡则负责实现机器人四轴同步控制以及插补运动；二者之间的通信方式为 PCI 总线。另外，运动控制卡可实现码垛机器人伺服电机的控制。控制系统结构见图 3。

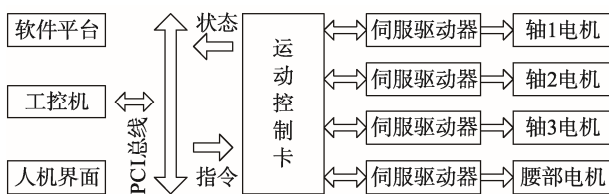


图 3 控制系统结构

Fig.3 Control system structure

文中所选运动控制卡型号为 ADT-8948A1，可实现码垛机器人轴 1、轴 2、轴 3、腰部等 4 台电机的同步运动控制。该运动控制卡是一种高性能多轴伺服电机控制器，内核为 2 片专用运动控制芯片 MCX312，所述芯片支持 DSP 架构，拥有多种接口、编程简单、使用方便。所述运动控制卡可直接插到工控机的卡槽

里。另外，该控制卡支持多种插补运算、伺服驱动、高速数据采集等功能。总体来说，运动控制卡在多行业中的应用十分广泛。

文中所选伺服驱动器型号为 MINASA5，该类伺服驱动器具有定位精度高、抗干扰能力强等特点，支持多种控制方式，例如：位置控制、速度控制、转矩控制等。所述伺服驱动器能够完全满足码垛机器人高精度、高速度的定位要求。另外，该驱动器电机控制接口用于连接伺服电机，电源接口包括主电源和控制电源，编码器接口可用于接收电机编码器反馈信号。除此之外，还包括 USB 等接口。

另外，工控机还包括图像采集接口，用于处理摄像机所采集的图像。人机界面为常用触摸屏。

2.2 软件设计

为提高码垛机器人软件执行效率，可采用模块化编程思路，程序框架见图 4。整体来说，软件主要包括以下几个部分：初始化模块、示教模块、轨迹规划模块、纠偏模块、监控模块、视觉标定模块等。

1) 初始化模块。设定码垛机器人工作参数，包括：码垛速度、工作空间、轨迹选择等。

2) 示教模块。机器人运动起始点、终止点、运动轨迹、运动模式等预设，机器人会按照示教情况工作。

3) 轨迹规划模块。根据具体工作情况，选择合适轨迹，进行插补运算。

4) 纠偏模块。实际采集机器人运动轨迹点，并与理论轨迹点进行比较，得到二者差值，根据差值调整机器人运动轨迹。

5) 视觉标定模块。纠偏和伺服控制的基础，只有定位准确才能实现高精度伺服控制，以及准确地纠偏反馈控制。

6) 监控模块。包括两部分：现场监控，即触摸屏实时显示码垛机器人工作情况；远程监控，实现生产线所有机器人工作情况监控。

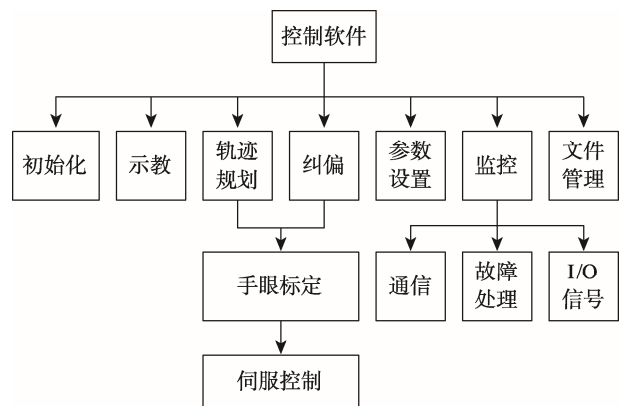


图 4 软件框图

Fig.4 Software block diagram

3 实验研究

为了验证所述视觉标定方法的可行性和有效性,文中进行了相关实验研究。重点考察2个方面:原点定位精度、重复定位精度。

实验对象:4自由度串联码垛机器人,在该平台上搭建文中所述控制系统。

实验条件设定:低速200次/h;高速1500次/h;作业空间为2m。

待码放物品:某型号包装盒,尺寸为300mm×200mm×150mm,质量大约为10kg,材料为瓦楞纸板。

3.1 原点定位

运动原点是码垛机器人轨迹规划、纠偏、实际运动控制的主要参考点。一旦原点定位出现偏差,将直接影响最终的码放精度,进而导致机器人整体性能下降。一般情况下,机器人各轴和其原点之间的位置关系主要有3种:滞后、吻合、超前等。可定义二者之间实际偏差绝对值为 ΔL ,分别在2种速度条件下随机测量 ΔL 的具体数值,部分实验结果见表1。

根据表1数据,经计算可以看出,整个码垛过程中,各轴的原点定位偏差平均值依次为0.12,0.14,0.14,0.14mm。实验结果表明,所述视觉标定方法具有较高的控制精度,能够确保原点定位的准确性,减小了原点误差对码放精度的影响。

表1 原点定位结果
Tab.1 Origin positioning results

序号	$\Delta L/mm$			
	轴1	轴2	轴3	轴4
1	0.11	0.18	0.14	0.20
2	0.12	0.13	0.16	0.18
3	0.14	0.14	0.11	0.13
4	0.13	0.15	0.13	0.15
5	0.10	0.11	0.16	0.16
6	0.12	0.12	0.17	0.12
7	0.15	0.15	0.11	0.13
8	0.11	0.12	0.10	0.14
9	0.10	0.16	0.15	0.11
10	0.13	0.12	0.13	0.12
平均值	0.12	0.14	0.14	0.14

3.2 重复定位实验

重复定位指在起点不变、运动轨迹不变的前提下,码垛机器人到达相同目标位置的能力,该指标可用来判断机器人的稳定性。实验过程中,为了方便捕捉机器人末端执行器的位置,文中采用激光仪对其进行实时跟踪,从而完成了实验数据的记录。

实验共100组,随机抽取其中15组,结果见表2。从实验结果能够看出,所述视觉标定方法具有较高的控制精度,能够确保重复定位的准确性,偏差平均值大约为0.6mm,完全满足包装码垛要求。

表2 重复定位结果
Tab.2 Repeated positioning results

序号	测量值/mm	序号	测量值/mm
1	0.8	9	0.6
2	0.4	10	0.5
3	0.6	11	0.5
4	0.4	12	0.7
5	0.2	13	0.5
6	0.5	14	0.6
7	0.8	15	0.6
8	0.6	平均值	0.6

4 结语

以包装搬运机器人定位为研究对象,提出了一种视觉标定算法。重点论述了摄像机标定和姿态标定方法。同时给出了控制系统硬件和软件设计方法。最后,进行了相关实验验证。实验结果表明,原点定位精度可以达到0.14mm;重复定位精度可以达到0.6mm,完全满足包装码垛要求。所述定位方法具有一定的理论和实际意义。

参考文献:

- [1] 康瑞芳,刘鑫.包装码垛机器人嵌入式控制系统设计[J].包装工程,2017,38(23):132—135.
KANG Rui-fang, LIU Xin. Embedded Control System Design of Packaging Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 132—135.
- [2] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(9):1—13.
WANG Tian-miao, TAO Yong. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1—13.
- [3] 赵伟,李响,郭爱华,等.工业机器人码垛线的设计[J].制造业自动化,2011,33(10):117—120.
ZHAO Wei, LI Xiang, GUO Ai-hua, et al. The Design of Industrial Robot Palletizing System[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(10): 117—120.
- [4] 吴安成,何卫锋,欧阳祥波.基于OpenCV的码垛机器人视觉标定方法[J].制造技术与机床,2018(6):45—49.
WU An-cheng, HE Wei-feng, OUYANG Xiang-bo. A Method of Hand-eye Calibration for Palletizing Robot Based on OpenCV[J]. Manufacturing Technology &

- Machine Tool, 2018(6): 45—49.
- [5] 周亮, 李珍. 基于 PLC 的液体袋装包装机控制系统的设计[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 88—91.
ZHOU Liang, LI Zhen. Design of the Control System of Liquid Bag Packaging Machine Based on PLC[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 88—91.
- [6] 邱素贞, 李庆年, 卢志翔, 等. 基于机器视觉检测的码垛机器人控制系统设计[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 207—211.
QIU Su-zhen, LI Qing-nian, LU Zhi-xiang, et al. Design of Palletizing Robot Control System Based on Machine Vision Detection[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 207—211.
- [7] 王耀南, 陈铁健. 智能制造装备视觉检测控制方法综述[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 273—286.
WANG Yao-nan, CHEN Tie-jian. Control Methods of Intelligent Manufacturing Equipment Visual Inspection[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(3): 273—286.
- [8] 范鲁一, 王冬青, 李芳, 等. 基于 STM32 的码垛机器人控制系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(11): 69—71.
FAN Lu-yi, WANG Dong-qing, LI Fang, et al. Design of Palletizing Robot Control System Based on STM32 [J]. Industrial Control Computer, 2014, 27(11): 69—71.
- [9] 楚广生. 基于图像处理的自动调光系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 69—72.
CHU Guang-sheng. Auto Exposure System Based on Image Processing[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(12): 69—72.
- [10] 陈小立, 严宏志, 温广旭. 基于遗传算法的四自由度混联机器人轨迹规划[J]. 计算机仿真, 2014, 31(5): 346—350.
CHEN Xiao-li, YAN Hong-zhi, WEN Guang-xu. Trajectory Planning of Four DOF Hybrid Robot Based on Genetic Algorithm[J]. Computer Simulation, 2014, 31(5): 346—350.
- [11] 杜巧连, 陈旭辉, 舒柏和. 自动化包装机械控制系统的设计方法研究[J]. 机械管理开发, 2015(6): 27—32.
DU Qiao-lian, CHEN Xu-hui, SHU Bai-he. Study on the Design Method of Packaging Machinery Automation Control System[J]. Mechanical Management and Development, 2015(6): 27—32.
- [12] 付铁, 李金泉, 陈恳, 等. 一种新型高速码垛机械手的设计与实现[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(1): 17—20.
FU Tie, LI Jin-quan, CHEN Ken, et al. Novel Design and Implement of a High-speed Palletizing Manipulator[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(1): 17—20.
- [13] 李成伟, 朱秀丽, 负超. 码垛机器人机构设计与控制系统研究[J]. 机电工程, 2008, 25(12): 81—99.
LI Cheng-wei, ZHU Xiu-li, YUN Chao. Design and Research of Stacking Robot Kinematics[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(12): 81—99.
- [14] 苏海新, 韩宝玲, 罗庆生, 等. 基于 PMAC 的工业码垛机器人控制特性研究[J]. 机械与电子, 2009(9): 57—60.
SU Hai-xin, HAN Bao-ling, LUO Qing-sheng, et al. Research of Control Characteristic of Palletizing Robot Based on PMAC[J]. Machinery & Electronics, 2009(9): 57—60.
- [15] 焦恩璋, 杜荣. 工业机器人分拣技术的实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(2): 84—87.
JIAO En-zhang, DU Rong. Realization of Sorting Technology on Industrial Robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(2): 84—87.