

基于 ARM 的嵌入式包装搬运机器人控制系统设计

孙玥, 魏欣

(南京信息职业技术学院, 南京 210023)

摘要: **目的** 为提高包装物品生产效率, 提升直角包装搬运机器人的稳定性、可靠性和运动精度。**方法** 根据四自由度直角坐标型包装搬运机器人的机械结构和功能需求, 设计一款基于 ARM 嵌入式的直角包装搬运机器人控制系统。控制系统硬件由主控制器 ARM、FPGA 和示教器 ARM 组成, 主控制器 ARM 通过串口与 FPGA、示教器 ARM 以及伺服系统进行通讯。同时基于上述硬件结构提出一种改进型 S 曲线插值速度控制方法。**结果** 实验结果表明, 该控制系统下的直角包装搬运机器人定位精度为 ± 0.5 mm, 完全满足设计要求。**结论** 该控制系统能够满足实际作业需求, 提升了包装效率, 降低了成本。

关键词: 机器人; ARM; 嵌入式; 定位精度

中图分类号: TB486; TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)23-0172-05

Design of Control System for Embedded Packaging and Handling Robot Based on ARM

SUN Yue, WEI Xin

(Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the production efficiency of packaging goods and improve the stability, reliability and movement accuracy of right angle packaging and handling robot. According to the mechanical structure and function requirements of the four-degree-of-freedom Cartesian coordinate robot, a control system based on ARM embedded right angle packaging and handling robot was designed. The hardware of the control system was composed of the main controller ARM, FPGA and teaching device ARM. The main controller ARM communicated with the FPGA, teaching device ARM and servo system through the serial port. An improved S-curve interpolation speed control method was proposed based on the above-mentioned hardware structure. The experimental results showed that the positioning accuracy of the right angle packaging and handling robot under the control system was at ± 0.5 mm, and fully met the design requirements. The control system can meet the actual operation demand and has improved the packaging efficiency and reduced the cost.

KEY WORDS: robot; ARM; embedded; positioning accuracy

随着自动化水平的提高, 搬运、包装生产线对智能化的需求日益迫切, 在某种程度上促进了智能机器人的发展^[1-3]。目前, 智能机器人已广泛应用于各个行业, 如化工、食品饮料、机械制造、仓储物流等, 成为自动化生产过程中必不可少的设备^[4-7]。直角坐标机器人因其具有多个自由度, 运动简单, 承载能力强, 能够根据不同执行机构进行重复编程等优点, 在食品包装和称量包装等领域中被广泛应用^[8-10]。

直角坐标机器人控制系统是一种典型的多轴同步运动控制系统, 目前较为常用的控制系统主要有基

于 PC 控制系统、基于 PLC 控制系统以及基于微处理器控制系统。基于 PC 控制系统是以 PC 为主机, 主要进行人机交互处理, 显示系统运行过程中的状态, 发送运动指令, 反馈信号的监控等。运动控制器主要是完成运动控制, 实现与伺服系统数据交换以及相关信号的输入输出。该控制系统受硬件因素影响, 开发周期长。基于 PLC 控制系统主要由电源模块、CPU、运动控制模块以及 I/O 模块等组成。PLC 控制系统开发难度小、抗干扰能力强, 但该系统不够灵活, 不能实现通用化^[11-13]。基于嵌入式控制系统硬件结构主

收稿日期: 2017-06-21

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015A092)

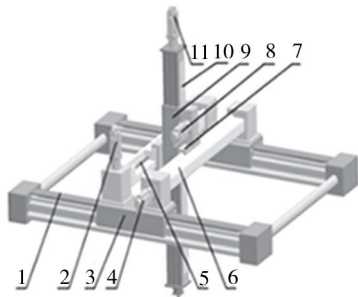
作者简介: 孙玥 (1982—), 女, 硕士, 南京信息职业技术学院讲师, 主要研究方向为嵌入式系统设计及数字信号处理。

要由 RAM, FPG 或 DSP 等组成, 随着微处理芯片运算速度的快速提升, 复杂的机器人运动算法能够得以实现, 且微处理器成本较低, 能够根据机器人不同功能要求选择不同芯片组成相应的控制器^[14-15]。

根据四自由度包装搬运直角坐标机器人工作过程, 提出了一种基于 ARM+FPGA 的直角坐标机器人控制系统, 采用 ARM 处理器对机器人进行示教。针对机器人轨迹规划提出一种基于改进型 S 曲线的规划方法, 有效提高机器人运动的平稳性和准确性

1 包装搬运机器人工作原理

直角坐标机器人拥有 4 个自由度, 该直角坐标机器人能够带动特定的机械抓手在三维空间中沿着 x 轴、 y 轴以及 z 轴进行水平移动, z 轴上的抓手可以围绕 z 轴进行旋转。该直角坐标机器人本体结构模型见图 1。机器人中的 4 个关节由 4 个伺服电机进行驱动, 下位机通过发送一定数量的脉冲对电机实现高精度控制, 从而实现对机器人的精确控制。机器人在启动后, 当上位机采集到物料检测传感器信号时, 上位机控制机器人末端执行器夹紧物料, 然后 z 轴上的伺服电机带动齿轮齿条副运动从而带动抓手垂直向上移动。当上升到上限位传感器时, x 轴与 y 轴电机进行直线插补同步运动。当插补运动完成后, 抓手运动到目标点正上方, z 轴伺服电机开始做反向运动, 从而带动抓手开始向下动作到达目标点, 至此完成整个轨迹运行。



1.x 轴同步带 2.y 轴电机 3.x 滑块 4.x 轴电机 5.y 轴丝杠
6.y 轴导轨 7.y 轴滑块 8.z 轴电机 9.z 轴滑块 10.z 轴齿条
11.z 轴电机

图 1 直角坐标机器人本体结构
Fig.1 The ontology structure of Cartesian coordinate robot

2 控制系统硬件设计

2.1 控制系统工作原理

包装搬运机器人控制系统由主控制系统和轨迹示教系统构成, 主要实现机器人在线示教和运动轨迹再现等功能。示教模式是通过操纵器上面的示教按钮向主控制器发出运转命令, 主控制器控制伺服电机使搬运机器人末端到达相应的示教点, 并将该点坐标进

行记录, 并放到数据寄存器中, 以备示教再现。示教再现是主控制系统根据上面记录的示教点信息, 进行路径轨迹规划, 通过发送脉冲和脉冲频率对 4 个伺服电机进行同步控制, 将已存储的示教点进行再现, 控制系统的工作流程见图 2。

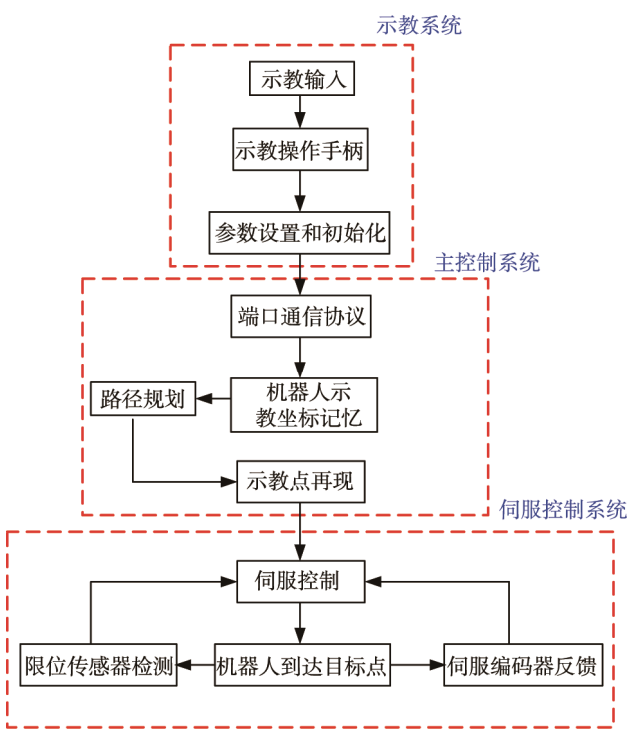


图 2 控制系统的工作流程
Fig.2 Workflow of control system

2.2 控制系统硬件结构

包装搬运机器人控制系统主要由主控制系统和示教系统组成, 主控制系统采用 ARM 和 FPGA 作为控制器核心, 主控制系统中的 ARM 主要用于对采集传感器信号、上位机通信、故障检测等, 而 FPGA 主要负责机器人的运动控制, 包括机器人路径轨迹规划以及对伺服发送脉冲数量以及脉冲频率从而完成伺服电机控制从而实现示教再现。示教操作器中的 ARM 主要负责人机界面的控制, 向主控制系统发送控制指令, 控制系统硬件结构见图 3。

ARM 采用基于 S3C6410 的微处理器, 主控制器和示教控制器的核心板均基于 MINI2440 开发板, 该开发板拥有多个接口, 能够满足机器人的多功能要求。ARM 部分包括数据存储器、液晶显示屏、UART 接口、SD 卡槽以及外部 I/O 接口等。FPGA 采用基于 EP2C5T44C8N 芯片的 KIT-FPGA-V2.5 开发板, 该开发板采用 Altera 公司 Cyclone II 系列 FPGA 芯片 EP2C5T144C8N。FPGA 部分包括 UART 接口、定时器、存储器以及外围设备接口等, 其外部扩展了 Flash 和 SDRAM 存储器。

伺服电机选用通用松下 MINAS-A5 系列

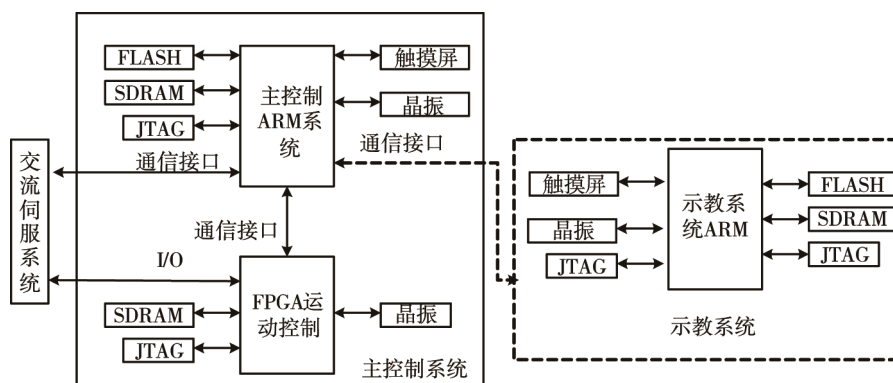


图3 控制系统硬件结构

Fig.3 Hardware structure of control system

MDME152GCH 伺服电机，与其配套的伺服驱动器为MDDHT5540。电机相关参数：额定转速为 3000 r/min，额定输出功率为 750 W，最大转速为 4500 r/min，最大输出转矩为 7.2 N·m，瞬间最大转速为 5175 r/min。

3 控制系统软件设计

3.1 控制系统软件模块化设计

在上述硬件平台基础上，对包装搬运机器人控制系统软件进行了设计，控制系统软件采用开放式、模块化形式进行设计，根据机器人功能对每个模块结构进行了相应开发并使各模块相互之间进行通信，并对人机触摸屏进行了人性化设计。包装搬运机器人控制系统软件采用 Linux 操作系统和 Qt 界面，Linux 具有抢占机制以及支持多线程、多任务操作等优点，Qt 界面便于模块化设计，还具有独立的消息机制，便于各模块之间的通信。

包装搬运机器人控制系统软件主要分为主控制模块和示教模块，其中软件结构见图 4。其中主控制系统模块主要包括初始化模块、通讯模块、轨迹在线模块、数据存储模块以及故障报警模块，示教软件系统包括参数设置模块、通讯模块、点动模块、四轴联动模块、示教模块、示教故障监控模块等。

3.2 空间直线插补

建立了包装搬运机器人示教控制系统后，机器人需要经过轨迹插补算法将机器人示教点按照一定轨迹进行再现。插补算法的精确度直接影响机器人的运动定位精度，插补过程是在路径的起始点到终止点中插入多个点，将轨迹进行多段切断处理，采用一定的插值算法对每一段轨迹进行再拟合。文中为了提高机器人的运动精度，降低算法的复杂度提出了一种空间直线插补算法。

空间直线插补的过程是已知机器人运动轨迹中直线始末两点的坐标，求该直线轨迹上插补点的位置和姿态。在包装物品搬运机器人轨迹规划过程中，需要保证机器人在运动过程避免碰撞流水线和其他物品，机器人空间直线插补一段运动轨迹见图 5。

直线插补具体过程为：根据一个固定的步长 ΔL 或者一个固定时间间隔 ΔT ，在所规划的轨迹中插入点，然后根据机器人本体的几何数学模型进行逆运动学求解，将所插入的各个点的坐标经过转换，从而得到关节空间中的关节角度值，最后将计算得到的关节角通过伺服控制系统的控制从而实现所规划的路径。以空间直线 P_1P_2 为例，直线插补具体算法为：

设 P_1 点空间坐标为 (x_1, y_1, z_1) ， P_2 点空间坐标

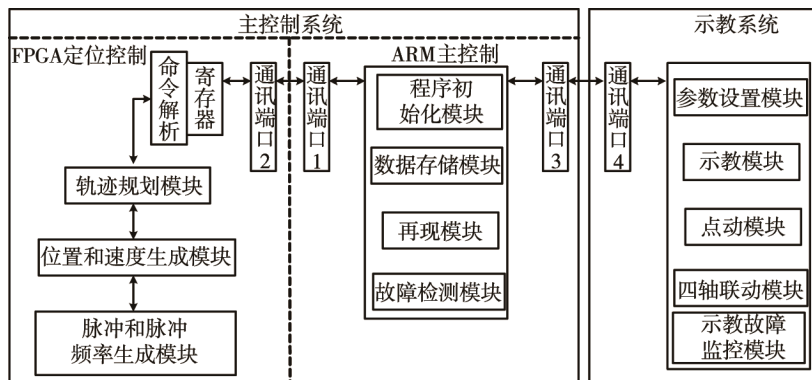


图4 控制系统软件结构

Fig.4 Software structure of control system

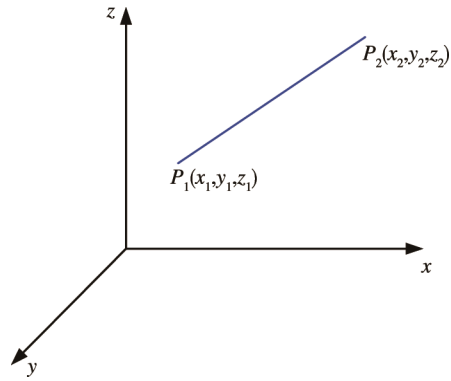


图 5 直线插补运动轨迹
Fig.5 Linear interpolation motion trajectory

为 (x_2, y_2, z_2) ，则 P_1 点到 P_2 点距离为：

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1)$$

规定直线段 P_1P_2 的固定插补步长为 ΔL ，则 P_1P_2 中间的总插补步数为：

$$N = L / \Delta L \quad (2)$$

设加速阶段加速度为 a ，达到匀速时的速度为 v ，则在加速阶段需要插补的距离 L_1 为：

$$L_1 = \int_{v_0}^v \frac{v}{a} dt = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \quad (3)$$

加速阶段的过程中需要插补的步数 N_1 为：

$$N_1 = \frac{L_1}{\Delta L} = \text{ent}\left(\frac{v - v_0}{2a\Delta L}\right) + 1 \quad (4)$$

式中： ent 为取整数，同理可以计算出减速段插补步数为：

$$N_3 = \text{ent}\left(\frac{v - v_0}{2a\Delta L}\right) + 1 \quad (5)$$

有插补总步数和加减速插补步数，可以算出匀速段插补步数为：

$$N_2 = N - N_1 - N_3 \quad (6)$$

根据插补总步数，可以推出在笛卡尔坐标系下各个轴的增量为：

$$\begin{cases} \Delta x = (x_2 - x_1) / N \\ \Delta y = (y_2 - y_1) / N \\ \Delta z = (z_2 - z_1) / N \end{cases} \quad (7)$$

由式 (7) 可以计算出第 i 步时插补点的笛卡尔坐标为：

$$\begin{cases} x_i = x_1 + i \times \Delta x \\ y_i = y_1 + i \times \Delta y \\ z_i = z_1 + i \times \Delta z \end{cases} \quad (8)$$

4 实验分析

为验证所设计包装搬运机器人控制系统可行性和实际应用效果，进行相关实验验证。分别在高速和低速情况下考察重复定位的精度。所谓重复定位是指

码垛机器人可以重复、高精度地到达相同位置的能力，用于衡量持续工作的定位精度。实验中采用激光跟踪仪实时跟随机器人末端执行器运动，以测量其位置，从而获取包装搬运机器人重复定位精度。相关实验结果见表 1。由表 1 可知，所述控制系统能够保证包装搬运机器人具有较高的重复定位精度，误差数值大约为 0.5 mm，完全满足包装码垛要求。

表 1 重复定位实验结果
Tab.1 Experimental results of repeated positioning

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

在基于 RAM 控制系统基础上，通过操作示教手柄使机器人对路径上的 3 个点进行示教，并调用直线插补算法对路径点之间的轨迹进行插补，机器人各轴轨迹曲线见图 6。通过示教点运行轨迹曲线可以看出，包装搬运机器人各轴通过直线插补算法均能保证各轴轨迹平滑过渡，有效地提高了机器人运行平稳性。

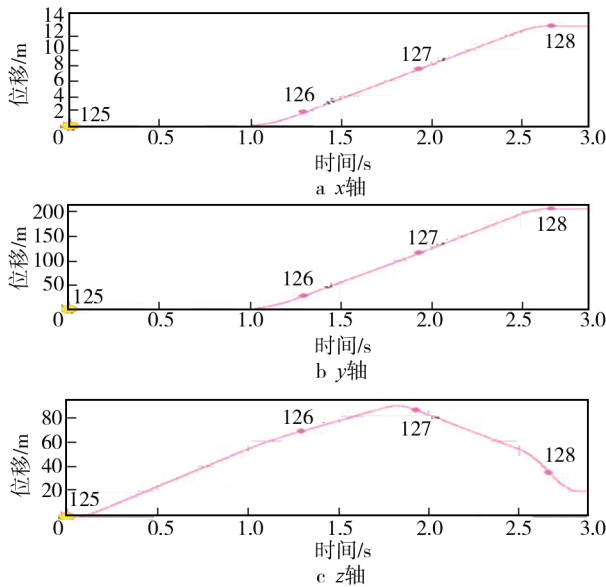


图 6 示教点运行轨迹
Fig.6 The running trajectory of teaching point

5 结语

包装搬运机器人在化工、食品饮料、机械制造、仓储物流等行业的应用十分广泛，如何提高包装搬运机器人的可靠性、稳定性、运行精度对提高包装效率至关重要。文中基于 ARM+FPGA 微控制器设计一种包装搬运直角坐标机器人控制系统，在硬件结构基础

上对机器人控制系统进行了软件设计,并提出了一种基于直线插补的轨迹插值方法。该控制系统不仅具有较好的通用性、扩展性,通过实验验证了所述控制系统的可行性和有效性。该控制系统对如何提高包装自动程度具有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 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, 30(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, 30(6): 27—32.
- [2] 赵臣, 王刚. 我国工业机器人产业发展的现状调研报告[J]. 机器人技术与应用, 2009(2): 9—13.
ZHAO Chen, WANG Gang. The Development Research Report of Chinese Industrial Robot[J]. Robot Technique and Application, 2009(2): 9—13.
- [3] 柳鹏. 我国工业机器人发展及趋势[J]. 机器人技术与应用, 2012(5): 20—22.
LIU Peng. The Development and Trend of Chinese Industrial Robot[J]. Robot Technique and Application, 2012(5): 20—22.
- [4] 赵杰. 我国工业机器人发展现状与面临的挑战[J]. 航空制造技术, 2012(12): 26—29.
ZHAO Jie. Development and Challenge of Chinese Industrial Robot[J]. Aeronautical Manufacturing Gechnology, 2012(12): 26—29.
- [5] YI Lun-han, ZHEN Guang-jiao, YAN Fang-tian, et al. Design of Loading Robot Control System Based on PLC[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 441: 792—795.
- [6] 翟阳, 曹亦轩, 肖永松. 热封切制袋机中多通道温控系统的设计[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 68—71.
ZHAI Yang, CAO Yi-xuan, XIAO Yong-song. Design of Multi-channel Temperature Control System for Heat Sealing and Cutting Bag Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 68—71.
- [7] 李坤全, 邵凤翔. 全自动包装码垛机器人控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2017(4): 259—262.
LI Kun-quan, SHAO Feng-xiang. Design of Fully Automatic Packaging Palletizing Robot Control System[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(4): 259—262.
- [8] 曹成涛, 许伦辉, 赵雪, 等. 四轴工业机器人运动控制与视觉码垛[J]. 机械设计与制造, 2016(11): 158—161.
CAO Cheng-tao, XU Lun-hui, ZHAO Xue, et al. Four Axis Industrian Robot Motion Control and Visual Palletizing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(11): 158—161.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 宋鹏飞, 和瑞林, 苗金钟, 等. 基于 Solidworks 的工业机器人离线编程系统[J]. 制造业自动化, 2013, 35(5): 1—4.
SONG Peng-fei, HE Rui-lin, MIAO Jin-zhong, et al. Offline Programming System Based on SolidWorks for Industrial Robot[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(5): 1—4.
- [12] 张斌, 方强, 柯映林. 大型刚体调姿系统最优时间轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 248—252.
ZHANG Bin, FANG Qiang, KE Ying-lin. Optimal Time Trajectory Planning Method for a Kind of Posture Aligning System of Large Rigid Bodies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 248—252.
- [13] HADDAD M, KHALIL W, LEHTIHET H E. Trajectory Planning of Unicycle Mobile Robots with a Trapezoidal-velocity Constraint[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(5): 954—962.
- [14] 徐海黎, 解祥荣, 庄键, 等. 工业机器人的最优时间与最优能量轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 19—25.
XU Hai-li, XIE Xiang-rong, ZHUANG Jian, et al. Global Time-energy Optimal Planning of Industrial Robot Trajectories[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 19—25.
- [15] CHEN C S, CHEN L Y. Cross-coupling Position Command Shaping Control in a Multi-axis Motion System[J]. Mechatronics, 2011, 21: 625—632.