

基于 Linux 的机械臂实时控制系统研究^{*}

巢惠世,梁宏斌,蔡土淇

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院,辽宁 鞍山 114051)

摘要:针对我国自主研发的机械臂控制系统较少,多依赖于国外价格昂贵的商用系统,采用在 Linux 中加入 RT 补丁的实时改造方法,以六自由度机械臂为研究对象,在下位机上进行系统架构搭建,实现一个包括 TCP 通信进程、译码进程、插补逆解进程、I/O 进程的一个多任务处理的机械臂控制系统;同时对机械臂的上位机进行软件设计,实现人机界面指令输入、状态显示、通信等功能,为机械臂的实时控制系统提供了一种有效开发方案。通过采用 RT 测试工具集进行实时性检验,其结果满足实时性,同时利用 MATLAB/Robotic Toolbox 工具箱建立机器臂运动学模型,对机械臂运动空间及轨迹进行仿真,得到了连续平稳的末端曲线,仿真结果证明了控制系统设计的正确性以及可行性。

关键词:机械臂;Linux;实时操作系统;实时性改造;示教器;控制系统

中图分类号:TP241.2

文献标识码:A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.04.015

引用格式:巢惠世,梁宏斌,蔡土淇.基于 Linux 的机械臂实时控制系统研究[J].信息技术与网络安全,2020,39(4):81-85.

Research on real-time control system of manipulator based on Linux

Chao Huishi, Liang Hongbin, Cai Tuqi

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Aiming at China's self-developed robotic arm control system, it is mostly dependent on foreign expensive commercial businesses. It adopts a real-time transformation method that adds RT patches to Linux. A six-degree-of-freedom robotic arm is used as the research object, and the system architecture is built on the lower computer to implement a multi-tasking robotic arm control system including TCP communication process, decoding process, interpolation inverse solution process, and I/O process. At the same time, software design is performed on the upper computer of the manipulator to realize the input of human-machine interface instructions. Status display, communication and other functions provide an effective development plan for the real-time control system of the robotic arm. By using the RT test tool set for real-time inspection, the results meet the real-time performance. At the same time, the MATLAB/Robotic Toolbox is used to establish the kinematic model of the robot arm, and the movement space and trajectory of the robot arm are simulated to obtain a continuous and stable end curve. The simulation results prove the correctness and feasibility of the control system design.

Key words: robotic arm; Linux; real-time operating system; real-time transformation; teaching device; control system

0 引言

21 世纪以来,我国工业机器人取得了巨大的进步,随着我国传统制造业的转型升级,我国的机械臂市场的潜力是巨大的,所以对机械臂的研究具有重要意义^[1-2]。现在机械臂常用的操作系统像 VxWorks 都是商用的操作系统,虽然实时性好,但是价格昂贵,而价格低廉、开源且可裁剪的 Linux 则非常适合机械臂系统的自主开发。由于

标准的 Linux 操作系统不具备实时性,需要对其进行实时性改造。

在 Linux 的实时改造方面,有采用双内核路线的美国新墨西哥州立大学研制的 RT-Linux、意大利米兰学院研制的 RTAI 以及移植性更好的 Xenomai^[3-4];还有采用直接修改内核路线的加州大学开发的 RED-Linux,堪萨斯大学开发的 Kurt-Linux,以及实时抢占补丁 RT-Patch^[5]。经过改造的 Linux 可以在数控系统、机器人系统、航空领域等得到应用。赵翔宇^[6]采用嵌入式 Linux 对六自由度机械臂控制

^{*} 基金项目:辽宁省自然科学基金项目(2015020128);辽宁省教育厅科学研究基金(2017LNQN22)

系统进行设计,运用 CAN 总线的分布式控制方式,实现了机械臂点到点的抓取控制;应思齐^[7]利用 Linux 系统的嵌入式平台作为 SCARA 机械臂的控制端,并基于 Qt 应用软件对机械臂进行运动控制,提高了系统的实时性;中科院沈阳自动化研究所采用 RT-Linux 实时嵌入式操作系统,研制出基于对话方式设计实现的机器人示教器^[8]。

本文针对机械臂实时控制系统开发,采用 RT-Patch 的改造方法对 Linux 进行实时性改造,在经过改造的 Linux 环境下对机械臂下位机进行系统架构搭建,实现译码、插补、逆解、通信功能;同时结合示教器软件设计,完成机械臂从示教器端的指令输入到下位机的数据处理功能,具有示教再现功能,同时使机械臂在实时性达到要求的前提下运行平稳且满足一定的运动精度要求。

1 实时控制系统的搭建

1.1 标准 Linux 的实时性分析

Linux 作为开放源码项目的典型代表,在各个领域都有广泛的应用,但是标准的 Linux 是一款分时操作系统,追求的是高的信息吞吐量和公平性^[9],虽然 Linux 的内核在 2.4 版本后支持和优化了实时性,但是它本质上并不是一个实时操作系统。主要体现在以下方面^[10]:(1)内核的不完全抢占;(2)中断不可抢占;(3)时钟颗粒粗糙;(4)实时调度策略不足;(5)优先级反转;(6)虚拟内存。

1.2 Linux 实时改造方法

为解决 Linux 的实时性问题,本文采用的方法是在 Linux 社区 kernel 的基础上加上 RT-Preempt 补丁,以使得 Linux 满足实时的需求^[11]。RT-Preempt 补丁对 Linux 内核的主要改造包括:(1)通过用 rt-mutexes 重新实现,使内核内锁定原语(使用自旋锁)可抢占;(2)受 spinlock_t 和 rwlock_t 保护的关键部分现在可以抢占;(3)将中断处理程序转换为可抢占的内核线程,RT-Preempt 补丁在内核线程上下文中处理软中断处理程序,该任务由 task_struct 表示,就像普通的用户空间进程一样,但是也可以在内核上下文中注册 IRQ;(4)将旧的 Linux 计时器 API 转换为用于高分辨率内核计时器的单独基础结构,再加上用于超时的基础结构,从而产生具有高分辨率的用户空间 POSIX 计时器;(5)丰富了实时调度策略算法;(6)实现内核内自旋锁和信号量的优先级继承;(7)提供内存锁定功能,避免实时处理

中存储页被换出。

1.3 实时性验证

测试环境为 Ubuntu10.10,在安装配置完实时补丁后,再在 Linux 下安装 RT 测试工具集,运行其中的 cyclicttest 测试工具,默认创建 5 个 SCHED_FIFO 策略的 RT 线程,优先级 76~80,运行周期是 1 000 μ s、1 500 μ s、2 000 μ s、2 500 μ s、3 000 μ s,分别在标准 Linux 环境下和改造后的 Linux 环境下进行测试,测试结果如图 1 所示。由图可知标准 Linux 内核中 RT 线程投入运行时间非常不稳定,而按照相关文档加入实时补丁的 Linux 系统的最大延迟时间为 436 μ s,平均延迟时间为 192 μ s,本次测试的最大延迟时间为 241 μ s,证明 Linux 系统实时改造是满足要求的。



图 1 延迟调用时间图

2 机械臂控制系统的架构搭建

机械臂的伺服控制系统如图 2 所示,主要由指令平台(示教器端,即 PC 机)、实时平台(控制器端,即内嵌 Linux 系统的工控机)以及关节模块的伺服驱动器和伺服电机组成三级控制。本文主要对指令平台和实平台进行设计。

2.1 上位机(指令平台)软件设计

机器臂示教器作为控制系统的上位机是运动控制器与操作人员之间连接的桥梁,一方面负责对操作人员的操作进行处理,例如机器人作业文件编写、示教再现等;另一方面在图形界面上监控机器人运动过程中的状态信息,并向控制器发送指令使机械臂完成相应的动作。

示教器的软件编写是在 Windows 环境下以 Qt 作为开发工具进行的,主要进行 4 方面设计。

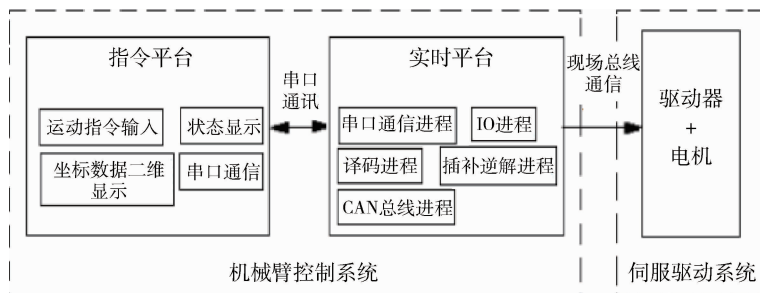


图2 机械臂伺服控制系统框图

(1)设计一款合适的人机交互界面。整个示教器主要分为主界面和控制界面两个界面进行显示。主界面主要显示的是示教编程功能,在该界面可进行指令的输入;控制界面主要进行状态显示、数据点显示、模拟仿真视图显示和通信功能接口。同时示教器也具有指令的插入编辑等功能对应各自的界面。主界面图如图3所示。

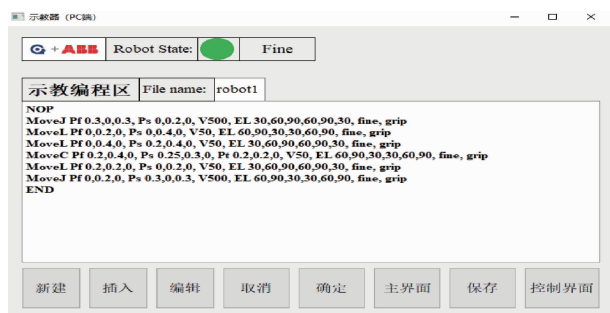


图3 主界面图

(2) 示教器与机器人控制器进行实时交互。示教器与机器人控制器的通信通过基于 TCP/IP 协议的以太网通信实现。

(3) 提供了机器人操作的基本功能, 含有直线、圆弧、关节的插补运动指令, 在控制界面还添加了插补点坐标的显示和插补点的仿真试图。

(4)通过界面上的状态信息显示当前机械臂的状态,遇到故障或者错误时及时反馈到示教器界面。

2.2 下位机(实时平台)系统架构设计

下位机采用 Linux 系统(加入实时补丁)作为多任务控制系统的编写环境平台,具有多进程设计的控制系统其稳定性比较高,因此多任务采用多进程进行处理。本次多任务分为四个进程,分别为:TCP 通信进程、I/O 进程(实时 RT 进程)、译码进程、插补逆解进程(实时 RT 进程)。

TCP 通信进程:与上位机进行 TCP 通信实现数

据信息的交互,上位机获得的人机运动指令 TXT 文档传递给下位机^[12]。上位机先发送文件的头部信息,发送完毕后延时 5 ms,然后循环读取 4 KB 内存大小的文件数据,再发送给下位机直到文件读取结束。下位机先接收文件的头部信息,然后再连续接收文件的内部信息,从而实现人机运动指令 TXT 文档的接收。

I/O 进程:此进程为实时进程,以 20 ms 的周期来读取相关 GPIO 口的状态置位信息,和内部设置好的 GPIO 口置位信息对比从而进行相关的程序处理。

译码进程:逐行读取人机运动指令 TXT 文档,根据每行的运动指令类型添加特征符变量,然后将每行识别的位置、速度、欧拉角的信息和特征符变量依次添加到链表当中,然后通过管道通信给插补逆解进程(实时 RT 进程)传输链表信息。具体过程如图 4 所示。

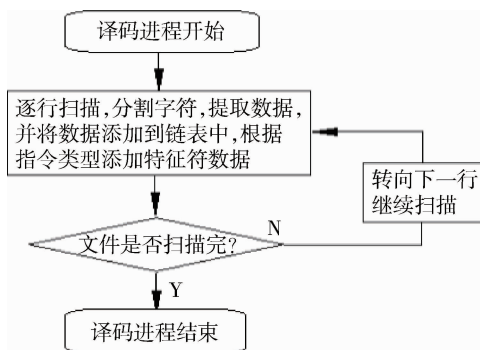


图 4 译码流程框图

插补逆解进程:设置定时器,以 10 ms 为周期触发定时器(设计的插补周期为 10 ms),进程开始依次读取链表信息进行加减速、轨迹插补、逆解计算,然后进程移出工作队列放入等待队列,任务进入阻塞状态,等待定时器触发唤醒进程的下一程序处理,直到链表全部读取完。流程图见图 5。

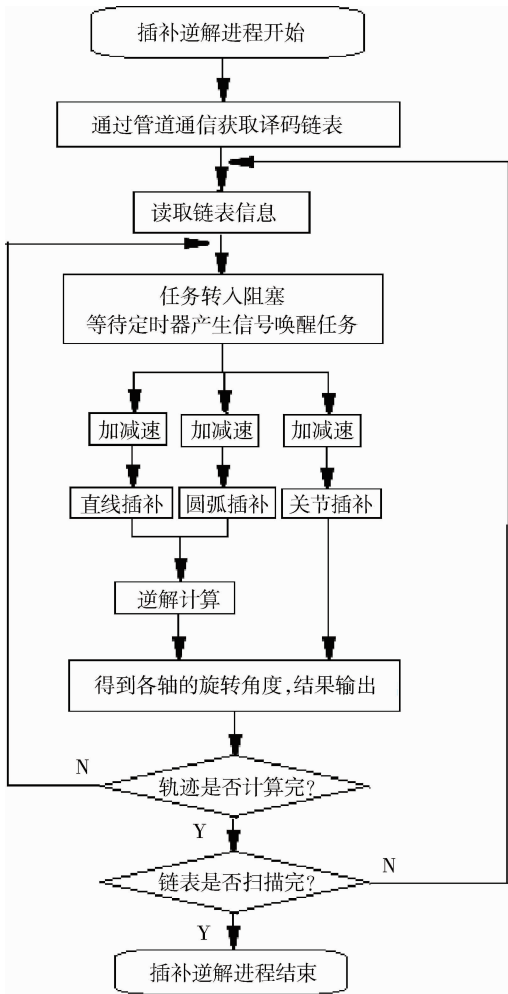


图5 插补逆解流程图

3 运动仿真分析及系统实时性检验

3.1 系统实时性检验

前面已经验证安装 RT 补丁后的系统实时性是满足要求的,这里进行系统调用插补逆解进程完成机械臂运动控制的实时性检验,仍然用 rt-test 测试工具集对其进行实时性测试,测试结果如图 6 所示。

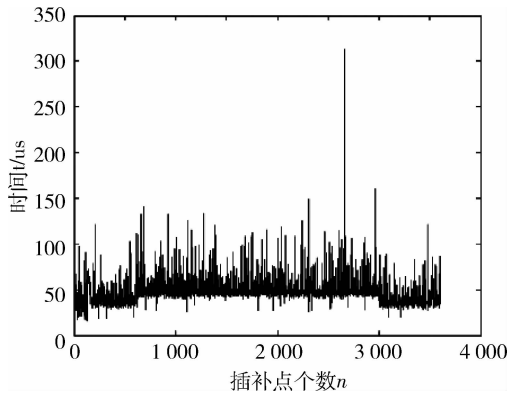


图6 程序执行时间图

图中横坐标为所有插补点,纵坐标为每次执行插补逆解所需要的执行时间,从图中可以看到最大执行时间为 310 μs,加上进程最大延迟调用时间 436 μs,一共耗时不超过 1 ms,为后续添加更复杂功能提供了可能性,证明此系统设计具有良好的实时性和扩展性。

3.2 运动仿真分析

在机械臂的建模方法上采用 D-H 参数法^[13]建立关节坐标系,以 PUMA560 为原型建立机器人连杆坐标系。利用 MATLAB 环境下的 Robotic 工具箱^[14]的 Link 和 robot 函数建立机器人处于零点位置的位姿,根据表 1 给出的 D-H 参数建立机械臂的模型,建立第 i 个连杆的命令如下:

$$L_i = \text{Link}(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i)$$

利用 SerialLink 函数将六个连杆依次序连接起来,命令如下:

$$\text{robot} = \text{SerialLink}([L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6])$$

调用 teach 函数调节 6 个关节变量,实现对机器人模型进行控制,关节变量由实时平台的 Linux 系统计算得到。整个过程模拟焊接轨迹过程,包括三段直线,一段圆弧。机械臂的运动仿真结果如图 7 所示,从仿真中可以直观地看到末端执行器的整个连续平稳的运动轨迹。

表 1 D-H 参数

关节	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i	θ 的范围
1	0.000 0	0°	0.000 0	90°	-160° ~ 160°
2	0.000 0	-90°	0.149 1	0°	-225° ~ 45°
3	0.432 8	0°	0.000 0	-90°	45° ~ 225°
4	0.020 3	-90°	0.433 31	0°	-110° ~ 170°
5	0.000 0	90°	0.000 0	0°	-100° ~ 100°
6	0.000 0	-90°	0.000 0	0°	-266° ~ 266°

4 结论

本文在 Linux 内核上外加 RT 补丁的实时改造的基础上,独立完成对六自由度机械臂控制系统的搭建。进行以示教器为上位机的示教器软件设计,完成了通信、指令输入、视图仿真等功能,下位机则进行了包括 TCP 通信、I/O、译码、插补逆解进程的系统架构搭建。

通过实验,验证了 Linux 外加 RT 补丁的实时性改造的可行性,并且完全可以应用到机械臂的

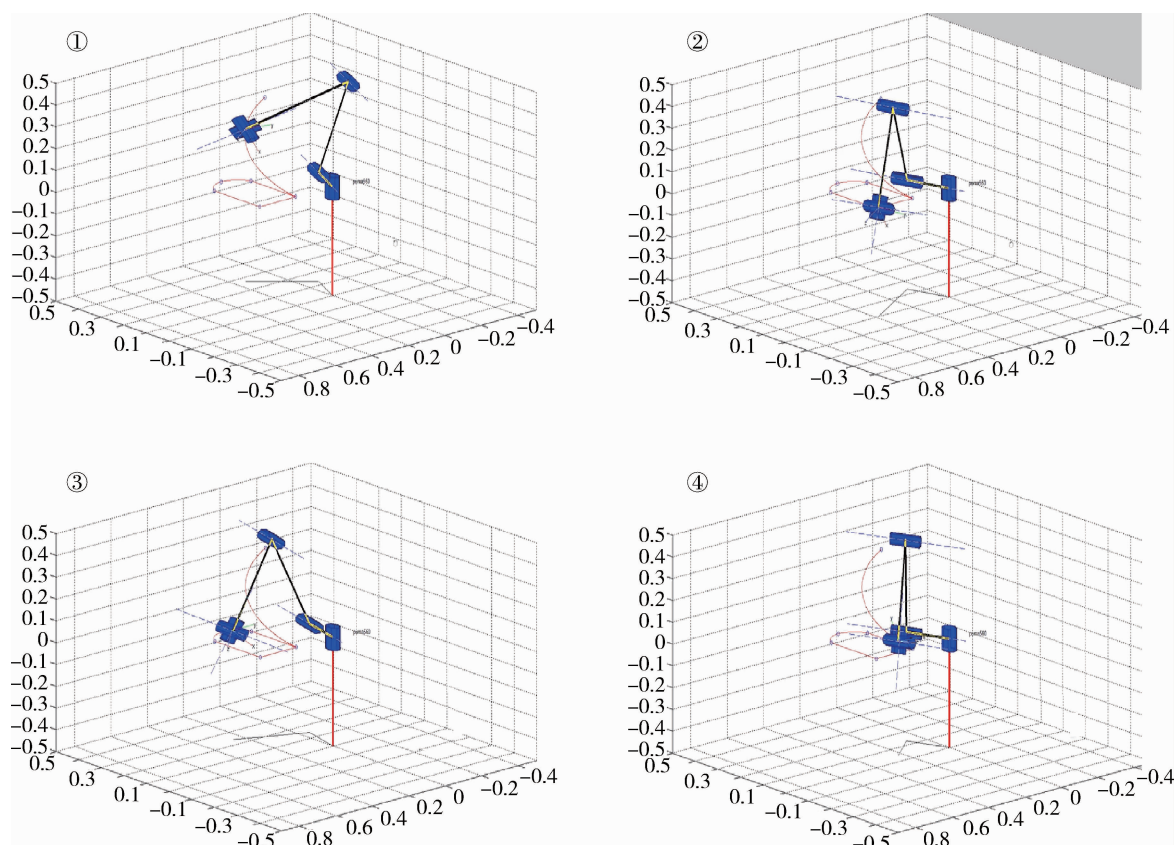


图7 机械臂运动仿真图

控制系统当中,实时性可以满足,同时对整个控制系统进行仿真,仿真结果为连续平稳的曲线,证明了机械臂控制系统的运动控制的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 云洋. 六自由度工业机械臂控制系统研究[D]. 武汉:中国地质大学,2018.
- [2] 岳晴晴. 六轴工业机器人轨迹规划的研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2019.
- [3] KUSHAL KOOLWAL. Myths and realities of real-time linux software systems[C]. Proceedings of Eleventh Real-Time Linux Workshop,2009:13-18.
- [4] JAKUB A, ZDENEK B, VACLAV K. Real-time capabilities of Linux RTAI[J]. IFAC PapersOnLine, 2016, 49(25).
- [5] 吴章金. Linux 实时抢占补丁的研究与实践[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [6] 赵翔宇. 六自由度机械臂及其控制系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [7] 应思齐. 基于 Linux 的 SCARA 型机械臂运动控制系统设计[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.
- [8] 王正阳. 嵌入式系统机器人示教机器人交互界面设计实

验及研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

- [9] 左天军,左圆圆,陈平. Linux 操作系统的实时化分析[J]. 计算机科学,2004(5):110-112.
- [10] 杨立身,王中海. Linux 操作系统的实时化分析[J]. 长春师范学院学报,2007(4):75-78.
- [11] 吴章金. Linux 实时抢占补丁的研究与实践[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [12] 张小寒. 基于 TCP/IP 协议栈的嵌入式系统通信方案设计研究[J]. 现代制造技术与装备,2018(7):59,62.
- [13] 蔡自兴,谢斌. 机器人学(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
- [14] 赵海滨,于清文,刘冲,等. 机械臂控制系统仿真实验设计[J]. 实验室研究与探索,2018,37(11):100-104.

(收稿日期:2020-01-14)

作者简介:

巢惠世(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:机器人控制。

梁宏斌(1967-),男,教授,主要研究方向:数控技术。

蔡士淇(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:机器人技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所