

基于卡尔曼滤波的机器人力控制

王宪伦,孙旭祥,丁文壮,段奕林

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:为解决机器人在打磨、装配等复杂作业环境下,其末端力传感器获取到的机器人本体与作业环境间的接触力信号存在干扰噪声影响的问题,设计了基于卡尔曼滤波的机器人力控制模型。通过搭建力控制模块,对比经典阻抗控制与基于卡尔曼滤波的机器人力控制下的接触力跟踪效果,分别搭建平面轨迹跟踪与曲面轨迹跟踪机器人可视化平台。经仿真验证发现,两种工况下基于卡尔曼滤波的机器人力控制比经典阻抗控制的力控制效果更优。

关键词:机器人;卡尔曼滤波;力控制;轨迹跟踪

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)04-0159-03

Force Control of Robot Based on Kalman Filter

WANG Xianlun, SUN Xuxiang, DING Wenzhuang, DUAN Yilin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: To cope with the noise from the contact force signal obtained via terminal force sensor of robot in complex operation of polishing and assembling, a force control model of robot based on Kalman filter was designed. By force controlling module construction, and comparing the classical impedance control with force control of robot based on Kalman filter in contact force tracking effect, a plane and a surface trajectory tracking of robot visual platforms were set up respectively. The verification shows the force control of robot based on Kalman filter presents better force control effect than that of the classical impedance control under both conditions.

Keywords: robot; Kalman filter; force control; trajectory tracking

0 引言

随着社会需求的不断提升,机器人已经不再局限于在特定环境下进行简单作业。机器人应用领域也在不断扩展,像公共服务领域的服务机器人,医疗领域的手术机器人,康复机器人等。这些领域都要求机器人能够对复杂的工作环境做出正确快速的响应,所以机器人与环境之间的交互能力就显得尤为重要。仅从机器人已经广泛应用的工业领域来讲,其作业形式也日趋多样化,像打磨、抛光、装配等接触式作业除了有位置精度要求外,还需要对机器人与工件的接触力进行控制。因此,设计出能够适应复杂且未知环境的机器人力控制方法也就受到了越来越多的重视。

文献[1]结合机器人位姿、力和力矩混合控制和Kalman状态观测器的优点,提出了对系统干扰具有较强抑制能力的力/位混合控制方法。文献[2]在室内复杂环境下,采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)对机器人姿态进行实时估计,实现惯性测量单元(IMU)姿态信息与RF20数据的融合,达到降低系统误差的目的。文中主要研究了机器人末端与复杂环境存在实时接触力情况下,针对现有的阻抗控制在力信号采集过程中存在反馈偏差较大的问题,通

过卡尔曼滤波器对返回的力信号进行处理,提高系统的精确性与鲁棒性。

1 机器人与环境接触动力学模型

机器人动力学是机器人进行跟踪控制研究的基础,合适的动力学模型能够帮助机器人更加准确、快速地完成作业任务。当机器人末端与外部环境接触时,机器人的关节空间的动力学表达式为^[3]

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_e \quad (1)$$

其中: $q \in R^n$ 为 n 自由度机器人的关节位移; \dot{q} 为机器人的关节角速度; $M(q)$ 为 $n \times n$ 维的惯性矩阵; $C(q, \dot{q})$ 表示机器人的离心力、哥氏力矩阵; $G(q)$ 为机器人的关节连杆重力向量; τ 为机器人的各轴输出力矩; τ_e 为机器人末端与环境的接触力/力矩。

关节角速度与机器人末端速度关系可表示为

$$\dot{X} = J_q(q)\dot{q} \quad (2)$$

其中 $J_q(q)$ 为机器人的雅可比矩阵,表示机器人末端位移与各关节位移之间的关系式。机器人末端位移的加速度为

$$\ddot{X} = J_q(q)\ddot{q} + \dot{J}_q(q)\dot{q} \quad (3)$$

第一作者简介:王宪伦(1978—),男,山东济宁人,副教授,博士,研究方向为机器人技术。

则机器人末端速度、加速度与机器人雅可比矩阵的关系为:

$$\dot{q} = (J_q^T J_q)^{-1} J_q \dot{X} \quad (4)$$

$$\ddot{q} = J_q^{-1} (\ddot{X} - \dot{J}_q \dot{q}) \quad (5)$$

由上述推导过程式(1)、式(4)、式(5)可以得到机器人与环境接触时的动力学方程为

$$M^* \ddot{X} + C^* \dot{X} + G^* = F - F_e \quad (6)$$

其中: $M^* = J_q^{-T} M J_q^{-1}$, 为惯性矩阵; $G^* = J_q^{-T} G$, 为重力向量; $F_e = J_q^{-T} \tau_e$, 为机器人与环境的接触力。

2 卡尔曼滤波器模型

针对机器人传感器在返回数据时产生的噪声干扰,文中采用卡尔曼滤波器估计控制过程中机器人状态,预测下一时刻状态,使运动过程中的估计均方差最小,且卡尔曼滤波器在轨迹预测方向有较好的应用^[4-9],不需要对机器人各种误差进行精确的数学建模便可估计期望动作。

卡尔曼滤波器的第一个公式为状态预测公式

$$\hat{x}_i^- = F_i \cdot \hat{x}_{i-1} + B_i \cdot u_i \quad (7)$$

其中: \hat{x}_{i-1} 为上一时刻系统状态,是系统的估计量并非系统的真实值; F_i 为状态转移矩阵,表示如何从上一时刻的状态来推测当前时刻的状态; B_i 为控制矩阵,表示控制量 u_i 如何控制当前状态; \hat{x}_i^- 为系统的推测值是从上一时刻推测而来,状态预测公式同样包含噪声,噪声可表示为

$$P_i^- = F_i \cdot P_{i-1} \cdot F_i^T + Q \quad (8)$$

式(8)表示不确定性在系统中传递的关系, P_i^- 为从前一时刻推测当前时刻的协方差, Q 为预测模型本身带来的协方差噪声。

第三个公式为

$$Z_i = H \cdot x_i + v \quad (9)$$

其中: H 为观测矩阵; v 是观测误差; Z_i 为当前时刻的观测值。

系统状态更新的公式为

$$\hat{x}_i = \hat{x}_i^- + k_i (Z_i - H \cdot \hat{x}_i^-) \quad (10)$$

其中: $Z_i - H \cdot \hat{x}_i^-$ 为残差; k_i 为卡尔曼系数。 k_i 首先是用来权衡协方差 P 与观测状态协方差矩阵协方差 R 的大小,来决定观察模型和预测模型之间的权重,还把残差的表现形式从观察域转到了状态域。 k_i 用式(11)表示为

$$k_i = P_i^- \cdot H^T (H \cdot P_i^- \cdot H^T + R)^{-1} \quad (11)$$

最佳估计值的噪声分布为

$$P_i = (I - k_i \cdot H) \cdot P_i^- \quad (12)$$

基于 Kalman 滤波的机器人力控制方法如图 1 所示,其中 $G(s)$ 为机器人的传递函数, F_d 为接触力的期望值, F 为接触力的实际值, K_d 为环境等效刚度, F_i 为机器人末端的受力,机器人的速度反馈为 \dot{X} (增益为 K_v),系统的响应时间为 T_d , AOB 为卡尔曼滤波的观测器,则有式(13):

$$G(s) = \frac{K_d \cdot e^{-s \cdot T_d}}{s(s + K_v)} \quad (13)$$

控制模型内的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t - T_d) + w_r \\ y(t) = x_1(t) + w_o \end{cases} \quad (14)$$

其中: $y(t)$ 为系统输出,是机器人末端与外部相互作用力;

w_r, w_o 为系统噪声,和观测噪声均认为是符合期望为 $u=0$, 方差 σ^2 分别为 Q, R 正态分布; $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$; $A = [0 \ K_d]^T$; $B = [0 \ 1; \ 0 \ -K_v]^T$; 系统分量 $x_1(t), x_2(t)$ 为机器人的受力情况与力相对于时间的一阶导数; 系统的输入是 $u(t - T_d)$, 为系统速度。

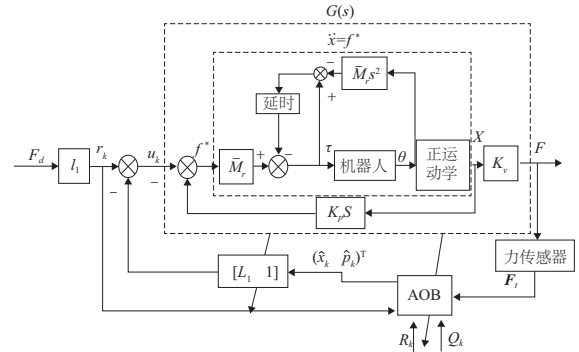


图 1 基于卡尔曼滤波的力控制

3 仿真实验

3.1 力控制模块

通过 MATLAB 软件中的 Simulink 来搭建机器人力控制模块^[10-12],控制模型如图 2 所示,给定期望接触力为 $F_d = 16.75 \text{ N}$,环境刚度 $k_e = 3000 \text{ N/m}$, $M_d = 20, B_d = 600$,系统响应时间 $T_d = 0.001 \text{ s}$,观测状态协方差矩阵协方差 $R_k = 0.0015$,系统测量噪声矩阵型方差 $Q_k = 0.002$,采样时间 $T = 10 T_d = 0.01 \text{ s}$,假设力传感器的测量噪声符合随机。

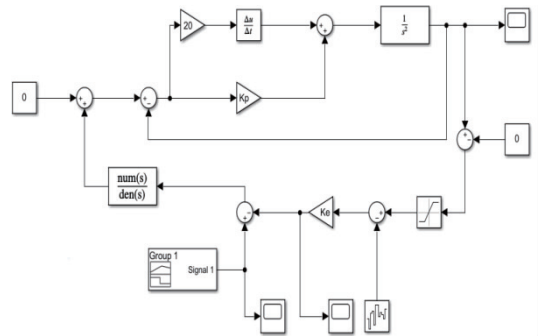


图 2 机器人力控制模块

得到经典阻抗控制与基于卡尔曼滤波的力控制仿真的力跟踪结果如图 3 所示。由图 3 可以得知基于卡尔曼滤波的力控制可以有效地降低噪声,将力控制在期望值附近,与经典阻抗力控制相比,卡尔曼滤波器有较强的鲁棒性可实现预测和抑制噪声。

3.2 可视化仿真

采用某公司 KR60 系列 L45 HA 机器人作为仿真对象,结合 MATLAB 中的 Simscape Multibody 工具箱与 Simulink 中的控制模块可以实现机械系统的可视化仿真,利用基于卡尔曼滤波的力控制模型对目标工件进行外轮廓轨迹跟踪仿真,并与经典阻抗控制模型进行比对,机器人末端力采集位置为力传感器的形心,如图 4 所示。图中

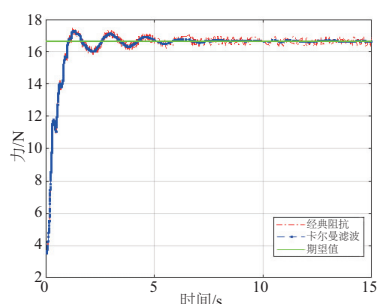


图3 力控制结果对比

机械臂末端坐标系即为力采集位置的坐标系。

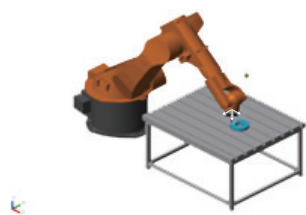


图4 力采集位置

1) 平面轨迹跟踪实验

设定目标工件的刚度 $k_e = 500 \text{ N/m}$,期望力 0 N ,采样时间 $T = 0.01 \text{ s}$,卡尔曼滤波的阻抗控制中各参数观测状态协方差矩阵协方差 $R_k = 0.0015$,系统测量噪声矩阵型方差 $Q_k = 0.002$,力采集的噪声在区间 $(-10 \text{ N}, 20 \text{ N})$ 内均匀分布,在力采集坐标系中 z 轴两组仿真结果如图5、图6所示。

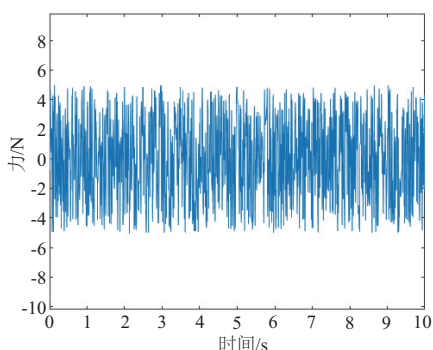


图5 经典阻抗仿真结果

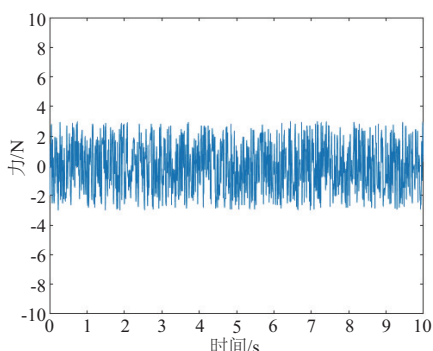


图6 卡尔曼滤波力控制仿真结果

图5为经典阻抗控制模型的力采集结果,图6为基于

卡尔曼滤波的力控制采集结果。从实际的仿真结果中可以看出基于卡尔曼滤波的力控制能够有效降低噪声对力控制的影响且能尽量减小机器人末端与工件的接触力并且能保持位置精确。

2) 曲面轨迹跟踪实验

用同样的方法验证机器人的力控制策略在曲面上轨迹跟踪的效果,设定目标工件的刚度 $k_e = 600 \text{ N/m}$,期望力为 $F = 15 \text{ N}$,机器人工具与目标工件的动摩擦因数 $\mu = 0.07$,采样时间 $T = 0.04 \text{ s}$,卡尔曼滤波的阻抗控制中各参数观测状态协方差矩阵协方差 $R_k = 0.0035$,系统测量噪声矩阵型方差 $Q_k = 0.01$,力采集的噪声在区间 $(10 \text{ N}, 20 \text{ N})$ 内均匀分布,并在目标工件表面添加凹坑、凸起等表面缺陷。仿真过程如图7所示。

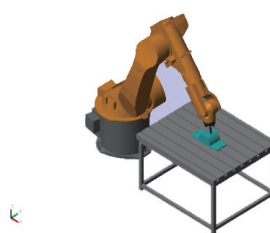


图7 曲面上的轨迹跟踪

在力采集坐标系中 z 轴两组仿真结果如图8、图9所示。

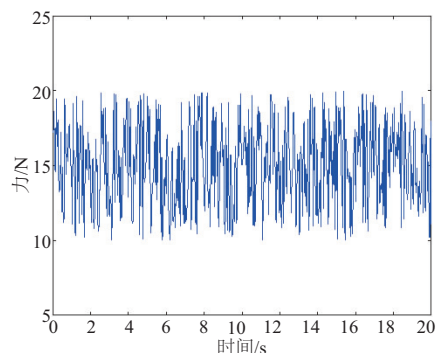


图8 经典阻抗曲面仿真结果

图8为经典阻抗控制模型的力采集结果,图9为基于卡尔曼滤波的力控制采集结果。从两组结果中可以看出基于卡尔曼滤波的力控制在曲面上同样可以降低噪声对力控制的影响,保持末端接触力的变化较小。

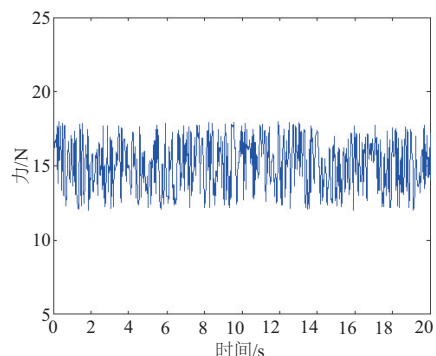


图9 卡尔曼滤波力控制曲面仿真结果

(下转第218页)

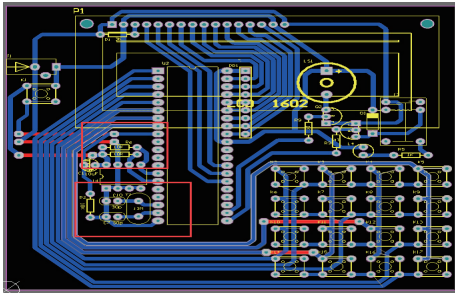


图 6 PCB 板图

接着对 PCB 板进行元器件测试及焊接,然后调试运行,其中密码输入正确运行结果如图 7 所示。

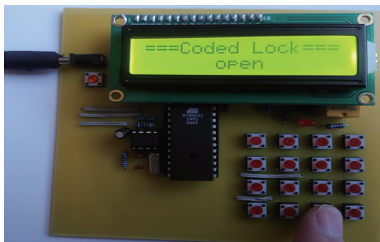


图 7 密码正确开锁图

经测试,实物运行和仿真结果一致,即各个器件均正常工作,证实本系统设计正确、可行。

6 结语

本文利用 Proteus 软件设计及仿真了一个以 8 位数字为密码,具有密码保护、密码修改、成功开锁、输入错误报

警及配设管理员万能密码等多功能电子密码锁控制系统。该系统从软件设计、仿真到实物成功运行,可为类似其他控制系统设计及制作提供一些参考。

参考文献:

- [1] 田晓翠,李林英.基于单片机 AT89C51 电子密码锁的设计[J].无线互联科技,2013(10):94.
- [2] 陈丹萍.基于 AT89S51 单片机的电子密码锁设计[J].大众科技,2010,12(6):45-46.
- [3] 程院莲,卢飞跃.基于 AT89S51 单片机的电子密码锁的设计[J].福建电脑,2010,26(6):147-147,168.
- [4] 周昌海,高海生.手机智能 Wi-Fi 密码锁设计[J].蚌埠学院学报,2019,8(5):62-65.
- [5] 周明理.基于 PLC 的四位密码锁设计[J].电子技术与软件工程,2019(20):100-101.
- [6] 袁轶珂.基于单片机的红外遥控电子密码锁设计[J].电子制作,2017(3):14-16.
- [7] 邓力.基于 Keil 时序逻辑和 Proteus 的电路仿真[J].实验室研究与探索,2017,36(1):80-83.
- [8] 孙万麟,杨莲红,宋莉莉.单片机虚拟实验室的构建及其应用[J].实验技术与管理,2014,31(7):229-231.
- [9] 王勇.基于单片机与串行通信的电子密码锁设计分析[J].电子测试,2017(3):12,65.
- [10] 孙万麟.基于 Proteus 的单片机通信电路设计[J].实验室研究与探索,2016,35(10):135-138.
- [11] 周炳,高美珍,洪家平.基于 AT89C51 的电子密码锁设计[J].电脑知识与技术,2017,13(5):232-233,238.
- [12] 徐剑琴,李克讷,梁奇峰.基于 AVR 单片机的电子密码锁控制系统设计[J].装备制造技术,2017(2):63-67,70.

收稿日期:2020-06-22

(上接第 161 页)

4 结语

考虑到机器人执行复杂作业任务时与环境之间的交互问题,本文采用基于卡尔曼滤波的机器人力控制方法改善了经典阻抗控制力信号产生噪声较大的问题,通过分别搭建平面轨迹跟踪平台和曲面轨迹跟踪平台仿真验证了所用力控制方法的有效性,有效提高了机器人与环境交互时机器人力控制的柔顺性。

参考文献:

- [1] 李正义.机器人与环境间力/位置控制技术研究与应[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [2] 罗耀耀,钟山,王锐,等.基于多传感器融合的机器人位姿估计研究[J].实验技术与管理,2020,37(5):58-62,77.
- [3] 蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [4] PETER Corke.机器人学,机器视觉与控制——MATLAB 算法基础[M].刘荣,译.北京:电子工业出版社,2016.
- [5] 宋爱国.人机交互力觉临场感遥操作机器人技术研究[J].科技导报,2015,33(23):100-109.

- [6] 肖朝文.面向机器人曲面抛磨的柔顺控制技术研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [7] 李二超.未确知环境下机器人力控制技术研究[D].兰州:兰州理工大学,2011.
- [8] 刘振亚.基于力觉与视觉交互的机器人操控技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
- [9] 黄婷,孙立宁,王振华,等.基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J].机器人,2017,39(6):776-785,794.
- [10] KOCH H, KÖNIG A, WEIGL-SEITZ A, et al. Multisensor contour following with vision, force, and acceleration sensors for an industrial robot[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(2): 268-280.
- [11] XIA G H, LI C, ZHU Q D, et al. Hybrid force/position control of industrial robotic manipulator based on Kalman filter[C]// 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China. IEEE, 2016: 2070-2075.
- [12] 覃文雷.工业机器人力位控制的自适应方法研究[D].重庆:重庆大学,2018.

收稿日期:2020-07-22