

基于 PID 控制的全向移动机器人 运动连接系统仿真研究

Simulation research on motion connection system of omnidirectional mobile robot based on PID control

林显新

LIN Xian-xin

(广西机电职业技术学院机械工程系, 广西 南宁 530007)

(Guangxi Institute of Mechanical and Electrical Technology, Nanning, Guangxi 530007, China)

摘要: 构建了以全向移动机器人与菜肴运输托盘硬性连接的数学模型, 并计算其传递函数, 分析了被执行对象受惯性力和摩擦力作用对系统性能的冲击干扰, 提出了采用串联 PID 控制器进行校正的方法。结果表明, 在架空轨道上全向移动机器人与托盘之间用硬性连接的方式通过串联 PID 控制器校正的效果较好, 提高了菜肴的运输效率。

关键词: 全向移动机器人; 菜肴; 运输托盘; PID 校正; 系统仿真研究

Abstract: In this study, the mathematical model of rigid connection between omni-directional mobile robot and dish transportation tray was established, and its transfer function was calculated. The impact interference of the object subjected to inertia force and friction force on the system performance was analyzed, and the method of using series PID controller for correction was proposed. Through theoretical and empirical formula calculation, the optimal control system and the optimal system waveform were obtained. The simulation results showed that the rigid connection between omni-directional mobile robot and tray on overhead track was better, and the efficiency of dish transportation was improved. It had great reference value for the performance analysis of mobile robot with mcnambr wheel as walking system.

Keywords: omnidirectional; mobile robot; dish transport tray; PID correction; system simulation research

2020 年, 新冠肺炎疫情的爆发对实体餐饮行业造成了巨大冲击, 随着人工服务和房租成本的上涨, 餐饮服务行业的发展方向将发生改变。加上信息技术的发展, 点餐、上菜和结账的无人化, 解放了餐厅服务人员, 取而代

之的是采用机器人服务的餐厅正在迅速崛起。

文章在文献[1]的基础上, 采用 STM32F103FD 单片机作为控制器, 控制 4 个步进电机驱动 4 个 ABAB 型麦克纳姆轮, 通过控制 4 个麦克纳姆轮的转向实现机器人的前进、后退和左移、右移运动, 机器人的下端用软线连接的托盘运输菜肴。而菜肴运输机器人与托盘用软线连接的方式受速度、惯性力和摩擦力等因素的干扰冲击, 运行速度小, 稳定调节时间较长, 影响运输效率。试验机器人与托盘之间拟采用可伸缩杆作为硬性连接, 以摆脱惯性力和摩擦力的影响, 加入 PID 控制器优化系统的稳定调节时间, 旨在为全向移动机器人运动连接系统的开发应用提供依据。

1 构建系统数学模型

1.1 运动方式

全向移动机器人的运动方式受 4 个 ABAB 型麦克纳姆轮转向的组合方式控制(见图 1), 当前进、后退纵向运动时, 四轮同向运动, 系统比较稳定; 当左移、右移横向运动时, 四轮不同向, 系统受外界干扰影响较大^[1]。

1.2 PID 控制器设计

全向移动机器人在架空轨道做全向移动时, 受摩擦力、菜肴惯性力和速度的干扰影响, 其在架空轨道运动的方式如图 2 所示。

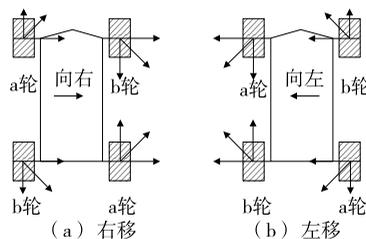


图 1 驱动模式

Figure 1 Driving mode

基金项目: 广西职业教育教学改革研究项目(编号: GXGZJG2020B051)

作者简介: 林显新(1986—), 男, 广西机电职业技术学院讲师, 硕士。E-mail: 170115146@qq.com

收稿日期: 2020-08-06

原系统方框图中加入PID校正环节后的控制原理如图3所示。

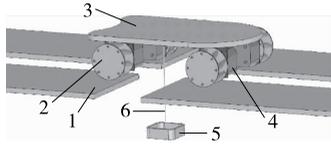


图2 运动方式

Figure 2 Move mode

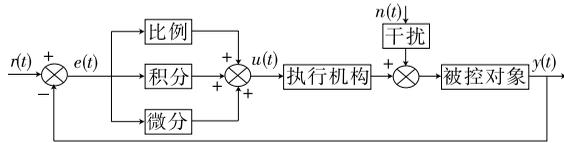


图3 PID控制原理图

Figure 3 The control of PID principle diagram

PID控制校正采用比例环节以迅速反映偏差,从而减小偏差,使用积分环节消除静差以提高系统的无差度,而使用微分环节反映偏差信号的变化速率会加快系统的动作速度,减小调节时间^[2]。PID控制的时域函数:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \int_0^t \frac{e(t)}{T_i} dt + T_d \frac{e(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

将 $u(t)$ 进行拉普拉斯变换,得PID传递函数:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

通过试验获得 K_p 、 T_i 和 T_d 的参数值,调整 T_i 可以改善系统稳定的时间,消除偏差,而调整 T_d 时间参数可改变系统的动态性能。

2 比例环节 K_p 范围的确定

根据监测现象与预定值,驱动机构中机器的传递函数为比例环节,即 $G_1(s) = K_p$,麦克纳姆轮与地面之间的摩擦力 f ,与接触面粗糙程度和轮子接触面大小等有关,根据动力学方程,系统驱动机构的传递函数为 $G_2(s) = \frac{1}{s(s+1)}$ 。对菜肴进行牛顿方程受力分析,采用硬性连接替代软性连接方式,此条件下同样以 $\sin\theta = \theta$ 分析,当 $q = \frac{k}{Lm_2} = 10$ 时,干扰传递函数 $G_3(s) = \frac{1}{s+10}$,构成一个非线性系统模型如图4所示。

系统模型中有控制器发出的信号,也有来自模型的干扰信号,当忽略干扰情况时,其系统广义被控对象的闭环传递函数为:

$$G_{Xi}(s) = \frac{K_p}{s^2 + s + K_p} \quad (3)$$

当忽略控制器输入信号,只考虑干扰有效的情况时,系统广义被控对象的闭环传递函数为:

$$G_N(s) = \frac{1}{(s^2 + s + K_p)(s + 10)} \quad (4)$$

而系统闭环传递函数为式(1)和式(2)两者之和,其闭环传递函数为:

$$G_B(s) = \frac{K_p(s+10)}{s^3 + 11s^2 + (K_p+10)s + 10K_p} \quad (5)$$

通过系统闭环函数的特征方程判断系统的稳定性,进而确定稳定条件下 K_p 的取值范围,令特征方程等于0,则:

$$s^3 + 11s^2 + (K_p+10)s + 10K_p = 0 \quad (6)$$

基于方程式根和系数的关系,采用Routh判据,通过对系统特征方程式的各项系数进行代数运算,得出全部根具有负实部的条件^[3-5],以系统的稳定性为先决条件,确定系统系数 K_p 的取值见表1。

由系统稳定的充要条件,第一列所有数值均 > 0 ,有:

$$(1) 11 \times (K_p + 10) - 10K_p > 0, \text{即 } K_p > -110.$$

$$(2) 10K_p > 0, \text{即 } K_p > 0.$$

因此,能使系统稳定的参数 K_p 的取值范围为 $K_p > 0$,可保证系统稳定。

3 PID控制器参数整定

PID控制的参数整定以工程整定方法为主,该方法精度高,可应用于实际情况^[6-8]。根据系统闭环传递 $G_B(s)$ 是大于或等于3阶函数,故采用临界比例度法进行整定。在闭环的控制系统中,将调节器置于纯比例作用下,从大到小逐渐改变调节器的比例度,得到等幅振荡的过渡过程。根据 $G_B(s)$ 建立 Simulink 模型。

将PID控制器的积分时间调整至最大,微分时间置零,比例度取 $K_p = 0.1$,平衡操作一段时间,将系统投入到自动运行中观察其输出波形(图6)。

此情况下,比例度取 $K_p = 30$,平衡操作一段时间,将系统投入到自动运行中观察其输出波形(图7)。

由图5和图6可知,当 $0 < K_p < 30$ 时,系统会出现等幅振荡的波形,将比例度30逐渐调小,并继续观察输出波形,直至出现等幅振荡(图8)。

根据试验仿真,当 $K_p = 2.18$ 时,系统输出的波形出

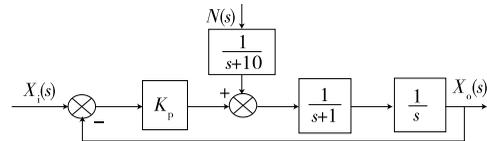


图4 系统传递函数方框图

Figure 4 Block diagram of system transfer function

表1 Routh判据列表

Table 1 Routh criteria list

阶数	最高项系数	次高项系数	末项系数
s^3	1	$K_p + 10$	0
s^2	11	$10K_p$	0
s^1	$11 \times (K_p + 10) - 10K_p$	0	0
s^0	$10K_p$	0	0

现等幅振荡,此时振荡周期 $T_k = 4.8$ s,采用经验公式 $1/\delta_k = K_p$,得临界比例度 $\delta_k = 0.459$,计算 PID 控制器各个参数(见表 2)。

由表 2 可知,PID 控制的比例度 $\delta = 1.7\delta_k = 0.78$,计算 PID 比例、积分和微分环节的相应参数,整定后的参数 $K = G_c(s) = 1/\delta = 1.28, T_i = 0.50T_k = 2.4$ s, $\tau = 0.125T_k = 0.6$ s。

由于工程整定方法依据的是经验公式,并不是所有情况下都适用,因此,按经验公式整定的 PID 参数 $K = 1.28, 1/T_i = 0.416, \tau = 0.6$ 可能不是最好的,还需进行一些细微调整。

4 系统校正

根据经验公式计算 PID 各参数值,将 $K = 1.28, 1/T_i = 0.416, \tau = 0.6$ 输入至 PID 中的比例、积分和微分环节中,连上积分和微分环节,如图 9 所示,其仿真结果见图 10。

通过串联 PID 校正后的系统,超调量 $\sigma = 75\%$,调节时间 $T_s = 17$ s,超调量一般与调节时间相矛盾,若超调量较大,系统受到扰动后能很快重新达到平衡;若要超调量较小,系统动作较慢,调节时间过长^[9-10]。比较校正前后的系统可知,在受到菜肴惯性冲击和麦克纳姆轮与地面摩擦的干扰冲击后,出现一定的超调量,情况合理。

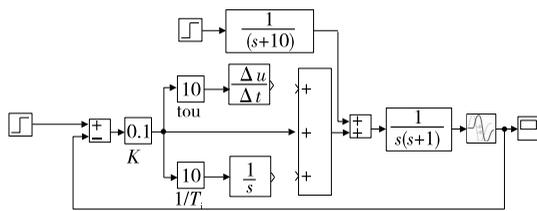


图 5 系统数学模型

Figure 5 System mathematical model

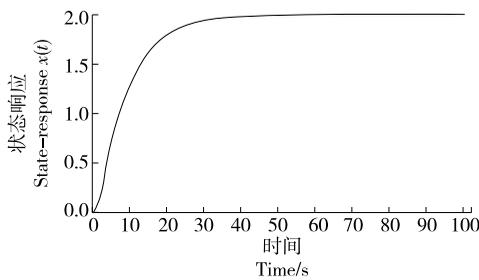


图 6 $K_p = 0.1$ 时系统的输出波形

Figure 6 $K_p = 0.1$ System output waveform

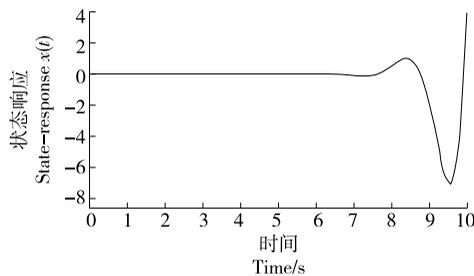


图 7 $K_p = 30$ 时系统的输出波形

Figure 7 $K_p = 30$ System output waveform

经手动微调参数 $K = 1.08, 1/T_i = 0.245, \tau = 1.1$,使系统获得最佳振荡和调节时间^[11],优化后的波形如图 11 所示。

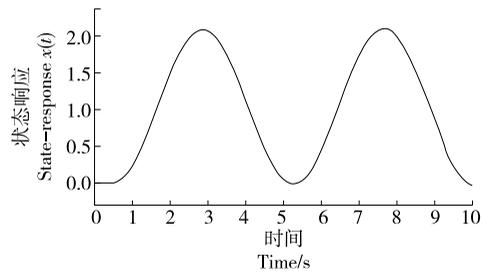


图 8 $K_p = 2.18$ 系统输出的等幅振荡波形

Figure 8 $K_p = 2.18$ The system outputs equal amplitude oscillation waveform

表 2 临界比例度法整定控制器参数

Table 2 Tuning controller parameters by critical proportion method

控制器类型	比例度 $\delta/\%$	积分时间 T_i/s	微分时间 τ/s
P	$2.0\delta_k$	∞	0
PI	$2.2\delta_k$	$0.833T_k$	0
PID	$1.7\delta_k$	$0.500T_k$	$0.125T_k$

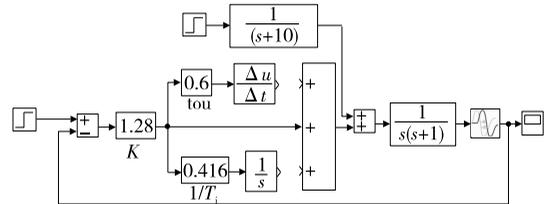


图 9 串联 PID 校正后的系统模型

Figure 9 System model after series PID correction

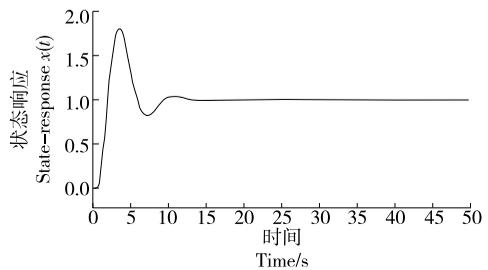


图 10 串联 PID 校正后的波形

Figure 10 Waveform after series PID correction

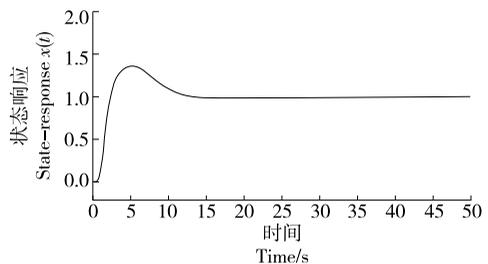


图 11 优化后的波形

Figure 11 Waveform after optimized

(下转第 111 页)

图像进行区域分割,并结合 LUT 将香菇图像分割成菌盖、菌褶以及背景区域。结果表明:香菇自动分级系统的分级速度快、效率高、分级结果准确,可以有效替代人工分级并满足食品工业企业的生产需要。但是目前的分级准确率和分级速度还有提升的空间,后续可以通过提高震料盘上料速度和皮带线的运行速度,改进算法,有望将准确率提高至 99% 以上、分级速度达 5 个/s 以上。此外,试验仅测试了香菇中的冬菇,后续将增加对其他香菇品种的研究。

参考文献

- [1] 罗印斌,蔡艳丽,兰茵,等.农产品无损检测方法应用现状[J].食品工业科技,2018,39(15):340-344.
- [2] PAULY L, SANKAR D. A new method for sorting and grading of mangos based on computer vision system[C]//2015 IEEE International Advance Computing Conference (IACC). [S.l.]: IEEE, 2015: 1 191-1 195.
- [3] 杨涛,张云伟,苟爽.基于机器视觉的草莓自动分级方法研究[J].食品与机械,2018,34(3):146-150.
- [4] 王阳阳,黄勋,陈浩,等.基于同态滤波和改进 K-means 的苹果分级算法研究[J].食品与机械,2019,35(12):47-51,112.
- [5] 钟小华,曹玉华,张永清,等.基于机器视觉技术的红枣全表面信息无损分拣系统研究与实现[J].食品与机械,2017,33(5):114-118.
- [6] NYALALA I, OKINDA C, NYALALA L, et al. Tomato volume and mass estimation using computer vision and machine learning algorithms: Cherry tomato model[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 263: 288-298.
- [7] 夏青.基于图像处理的干香菇分级方法研究[D].武汉:华中农业大学,2014:61-64.
- [8] WANG Feng-yun, ZHENG Ji-ye, TIAN Xin-cheng, et al. An automatic sorting system for fresh white button mushrooms based on image processing[J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 151: 416-425.
- [9] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.香菇:GB/T 38581—2020[S].北京:中国标准出版社,2020:1-3.
- [10] 张鹏飞,董敏周,端军红.基于集成 GMM 聚类的少标记样本图像分类[J].西北工业大学学报,2019,37(3):465-470.
- [11] 孔小丽.基于 HSI 彩色模型的车牌边缘定位法[J].电子测试,2020(16):46-47,25.
- [12] 廖晓锋,范修斌,姜青山.基于协方差的高斯混合模型参数学习算法[J].计算机科学,2013,40(增刊2):77-81.
- [13] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIN D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1977, 39(1): 1-22.
- (上接第 104 页)
- 仿真试验显示,系统受到冲击干扰后,超调量 $\sigma=32\%$,在 $T_s=12\text{ s}$ 时,系统再次趋于稳定,该调节时间小于校正前发调节时间($T_{s1}=50\text{ s}$),且系统只经过了一次振荡后就趋于稳定,说明校正后的系统性能优于校正前的系统。
- ## 5 结论
- 文章通过构建全向移动机器人与菜肴运输托盘以硬性连接方式的系统数学模型,分析被执行对象受惯性力和摩擦力作用对系统性能的冲击干扰,并提出采用串联 PID 控制器进行校正。通过理论和经验公式推算,根据 Matlab/Simulink 仿真验证,微调 PID 参数 $K=1.08$ 、 $1/T_i=0.245$ 、 $\tau=1.1$,可获得最优系统波形,使系统调整时间比未采用 PID 调节的时间缩短 38 s,大大提高了菜肴运输效率。说明在架空轨道上全向移动机器人与托盘之间用硬性连接的方式通过串联 PID 控制器矫正的效果较好。但对于机器人上下坡运动的稳定未尽详细分析,针对上下坡机器人重心移位导致机器人不稳定的问题,还需以后继续研究。
- ### 参考文献
- [1] 徐凯,林显新,易巧,等.基于架空轨道的全向移动机器人运动稳定性研究与应用[J].食品与机械,2020,36(3):105-109.
- [2] 魏泽国,路世瑞,孟宪家.自动控制原理[M].西安:煤炭工业出版社,1983:52-58.
- [3] 侯强,徐颖,韩腾,等.基于模糊 PID 的豆粉喷雾干燥塔监控系统设计[J].食品与机械,2019,35(12):108-112.
- [4] 徐佳雄,张明,王阳,等.基于 BP 神经 PID 的储能电容恒流充电控制系统[J].控制工程,2019(16):228-230.
- [5] 陈敏,黎展滔,陈庆新,等.考虑有限物流运输能力的智能车间 AGV 调度算法研究[J].工业工程,2019,22(4):49-57.
- [6] 王艳,陈静,王志山,等.基于模糊神经网络 PID 控制的粉体包装计量控制系统[J].食品与机械,2020,36(1):136-139.
- [7] 何国荣,纪娜.基于临界比例度法的 PID 控制器参数整定方法研究[J].杨凌职业技术学院学报,2020(2):11-14.
- [8] ROSY P, SANTOSH K M, JATIN K P, et al. Optimal fractional order PID controller design using ant lion optimizer[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2019(10): 281-291.
- [9] SHI Qian, LAM H K, XUAN Cheng-bin, et al. Adaptive neuro-fuzzy PID controller based on twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm [J]. Neurocomputing, 2020, 402(3): 183-194.
- [10] 林显新,李国进,周世凯.基于 Matlab 的制芯机器人夹持器稳定性研究与分析[J].制造技术与机床,2020(3):109-113.
- [11] 陈海轮.基于模糊 PID 算法的带式输送机控制系统设计[J].煤矿机械,2019(12):15-17.