

模糊 PID 控制在轮式机器人直立系统中的应用

李贤喆, 江 兵, 王 强, 李轩恺

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 轮式直立机器人具有结构简单、可控性强、行进速度快、控制灵活、低成本等特点, 广泛运用于需要按预定路径进行移动的机器人中。依据对轮式机器人建模得出直立状态下车轮加速度的控制算法, 设计模糊 PID 自整定控制器的隶属度关系及模糊规则表, 用 Simulink 仿真比较, 表明模糊后的 PID 自整定算法明显优于常规的 PID 算法。将两种算法实际运用于机器人直立控制过程, 测量直立状态下的 z 轴角加速度放大 1 000 倍后的输出曲线, 计算出经过模糊化后的方差缩小了 73.4%, 极差缩小了 67.5%, 综合性能提高了 3 倍。结果表明, 模糊自整定后的直立控制效果明显优于常规 PID。

关键词: 模糊控制; 轮式机器人; 直立控制; Simulink 仿真; PID

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2016)09-0171-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2016.09.038

Application of Fuzzy PID Control in Upright Wheeled Robot System

LI Xian-zhe, JIANG Bing, WANG Qiang, LI Xuan-kai

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210023, China)

Abstract: Erect wheeled robot which has simple structure, strong controllability, low cost, fast speed, flexible control and other characteristics, is widely used in mobile robot needing a predetermined path. According to wheeled robot modeling, the control algorithm of robot's wheel acceleration in upright condition is obtained, and the membership relations of the fuzzy self-tuning PID controller and fuzzy rule table is designed. Comparison with Simulink simulation indicates that the fuzzy PID self-tuning algorithm is superior to the conventional PID algorithm. The two algorithms are used in the process of the robot vertical control, measuring the output curve of z axis under condition of vertical angular acceleration magnified 1 000 times, calculated that the variance shrinks by 73.4%, range shrinks by 67.5%, and comprehensive performance improves three times after a blurring. It verifies that upright control effect is better than conventional PID after the fuzzy self-tuning.

Key words: fuzzy control; wheeled robot; vertical control; Simulink simulation; PID

0 引 言

机器人通常依靠运行预先编排的程序或者制定以人工智能为核心的行动规则来实现其自动检测、工作的需求。而在机器人中, 又以轮式机器人的应用最为广泛^[1]。轮式机器人的直立过程是一个典型的非线性、多变量、强耦合、自然不稳定的复杂动态系统, 具有极大的非线性、大滞后特征。

常规 PID 线性控制器针对不同的控制对象, 调整相应的比例、积分、微分参数, 便可以获得良好的控制效果。但是常规 PID 控制器要在工作点附近才能实现良好的控制, 当出现较大扰动或者控制对象出现难以

调和的非线性因素时, 控制性会变弱, 甚至失去控制。模糊控制无需对被控对象进行数学建模, 并且对噪声等非线性因素有较强的抑制能力, 鲁棒性较好, 但对精度较高的控制明显逊色于传统 PID 控制^[2]。

模糊 PID 被广泛应用于风力发电机组变桨距控制、智能车调速系统、智能车路况识别转向系统、锅炉温度控制等结构复杂的非线性系统中^[3]。文中针对轮式机器人的直立过程进行研究, 将模糊控制与 PID 控制相结合, 对 PID 的比例、积分、微分参数实现模糊自整定, 实现实时跟随控制。消除模糊控制的非线性、低精度, 又有 PID 控制器的动态跟踪品质和稳态精度^[4]。

收稿日期: 2015-04-29

修回日期: 2015-08-12

网络出版时间: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11202107); 国家创新训练计划(SZDC2014013)

作者简介: 李贤喆(1994-), 男, 研究方向为嵌入式系统与智能仪器; 江 兵, 硕导, 副教授, 研究方向为智能仪器与测控系统; 王 强, 硕导, 副教授, 研究方向为嵌入式系统与智能仪器。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.tp.20160823.1112.008.html>

1 轮式机器人直立建模

轮式机器人为两个轮子着地,机器人只会在轮子滚动的维度上发生倾斜,在感知倾斜度的情况下,只要控制机器人做反倾斜趋势方向的加速运动,便可实现机器人两轮直立平衡^[5]。将机器人看作是一个可以在平台上自由移动的倒立摆模型,对控制系统进行建模,以建立常规 PID 控制参数关系,如图 1 所示。

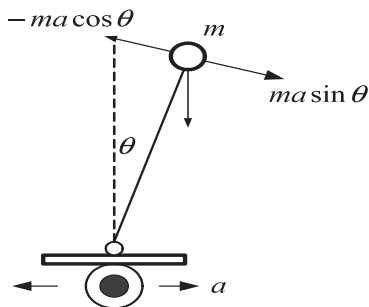


图 1 机器人倒立摆受力分析图

通过时刻对机器人姿态进行检测,观察计算机器人的倾斜状态,然后对机器人本身做出修正,即对整体的直立自平衡过程形成一个负反馈控制^[6]。当机器人偏离平衡位置时,所受到的回复力与位移方向相反,通过控制倒立摆底部车轮对其作加速运动,产生一个与加速度相反并且成正比的反向惯性力,即倒立摆保持直立所需要的回复力为:

$$F = masin\theta - macos\theta \approx mg\theta - mk_1\theta \quad (1)$$

其中, k_1 为比例系数,当比例系数大于重力加速度 ($k_1 > g$),就产生与运动方向相反的回复力。

通过增加阻尼力,使机器人直立稳定。阻尼力的大小正比于偏角加速度,但是方向相反。得到公式:

$$F = mg\theta - mk_1\theta - mk_2\theta' \quad (2)$$

将式(2)带入式(1),求得使机器人能够稳定在垂直位置的车轮加速度的控制算法为:

$$a = k_1\theta + k_2\theta' \quad (3)$$

其中, θ 为机器人直立时的倾斜角度; θ' 为以两轮轴心为圆心的角速度。

设 k_1 (决定能否稳定到垂直位置)、 k_2 (决定回到垂直位置的阻尼系数) 为比例系数,将两比例系数之和作为控制机器人直立的加速度大小,当且仅当 $k_1 > g, k_2 > 0$, 实现轮式机器人直立。过阻尼会使直立发生振荡,当机器人直立行进过程中遇到较大干扰时(如过陡坡),便会丢失直立姿态控制摔倒;欠阻尼会使直立时间过长,以至于无法实现直立;合适的阻尼系数是保证机器人直立稳定的前提。

轮式机器人姿态传感器拟组合使用加速度计和陀螺仪^[7]。利用陀螺仪不受抖动影响来抵消加速度计因抖动产生的高频噪声。陀螺仪测量的角速度信号会存在微小的偏差和漂移,经积分运算出的角度信息将

产生累积误差,随时间推移机器人将失去直立控制,利用加速度计测量的姿态信息与陀螺仪积分后的直立倾角相比较计算消除误差^[8]。

2 参数自整定模糊 PID 控制器设计

2.1 理论基础

PID 偏差控制适用性强,稳态性能好。通过对偏差量设定合适的比例、积分、微分参数,便能对控制对象实现无差控制^[9]。PID 控制器输出公式为:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (4)$$

式中, K_p 为比例增益; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; $u(t)$ 为控制量; $e(t)$ 为被控量与设定值的偏差。

模糊控制是一种经验规则控制策略,由语言变量和模糊集合组成,鲁棒性好^[10]。类似于“黑箱”,不需要掌握受控对象数学模型,即不需要知道“黑箱”里面的原理,只需要将“黑箱”的输入输出数据总结成较完善的语言控制规则便能实现控制。具有不确定性、噪声、非线性、时变性、时滞特征的不易确定物理数学模型的控制对象常考虑模糊控制。

目前,工业控制大量采用 PID,并取得了良好效果^[11]。但常规的 PID 调节器不具有实时整定参数的功能,对于时变、非线性明显的系统控制效果不佳。当系统环境发生变化时,控制性能会产生较大变化,控制特性可能变坏,严重时可能导致系统的不稳定,不能满足不同环境下系统的控制要求,广泛适用性受到制约。模糊 PID 控制器通过对不同环境下的偏差和偏差变化率制定相应的模糊规则,实现 PID 的实时自整定,随环境的变化采用当下最合适的 PID 参数^[12]。如图 2 所示,将偏差 E 和偏差变化率 E_c 模糊化,由模糊规则进行参数修正,得出对应的模糊输出,再对模糊输出进行清晰化处理,输出精确的 K_p 、 K_d 、 K_i 。

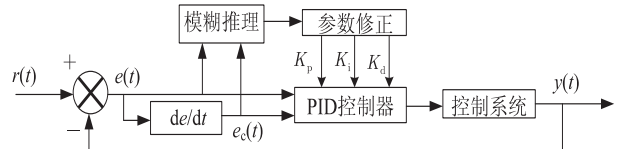


图 2 模糊自整定 PID 控制

模糊 PID 参数自整定是建立 E 、 E_c 与 K_p 、 K_d 、 K_i 的模糊规则。以下给出在不同环境下参数 K_p 、 K_d 、 K_i 在 E 和 E_c 下的自整定规则的基本原则:

当偏差大时,系统需要快速恢复到平衡状态,避免因瞬间大偏差引起的微分溢出,导致控制超出范围而失控。取大 K_p 和小 K_d ,若要加入 K_i ,取小 K_i ,避免因积分作用太强加大系统超调量;当偏差中等时,此时提高系统性能的主要手段是减少超调量,提高系统响应

速度。 K_p 、 K_d 、 K_i 的取值大小要适中。注意对 K_d 值的大小选择,其对系统的响应速度影响较大。当偏差小时,要从提高系统稳定性的角度入手,主要通过减小系统在稳定后的振荡和提高系统稳定后的抗干扰能力两方面入手,取较大 K_p 与 K_i 对应。当偏差变化率小时, K_d 较大,通常取中等大小,反之取小^[13]。

- 模糊控制器的设计主要涉及三方面:
- (1)精确量模糊化;
 - (2)模糊规则算法设计,总结的规律通过条件语句的形式构成模糊控制规则;
 - (3)输出信息的模糊判决,完成一个模糊量到精确量的转换,计算出精确控制量输送给执行器^[14]。

2.2 设计方法

隶属度函数的建立:

设计控制系统的输入为单位阶跃信号 $r(1)$,输出为 y ,误差为 E ,误差变化为 E_c ,PD控制器的输入为 K_p 、 K_d 。设置 E 、 E_c 所取的论域分别为 $\{0,3,6,10\}$ 和 $\{0,2,4,6\}$,其模糊子集为 $\{B,M,S,Z\}$,分别表示“大”、“中”、“小”、“零”。 K_p 、 K_d 所取的论域为 $\{0,13,26,40\}$ 、 $\{0,3,6,9\}$,其模糊子集为 $\{VB,B,M,S\}$,分别表示“很大”、“大”、“中”、“小”。按照调整原则规定总共有16条模糊控制规则。选用三角形隶属度函数,以 E 、 E_c 为输入,经过模糊规则输出经验 K_p 、 K_d ,如图3所示。

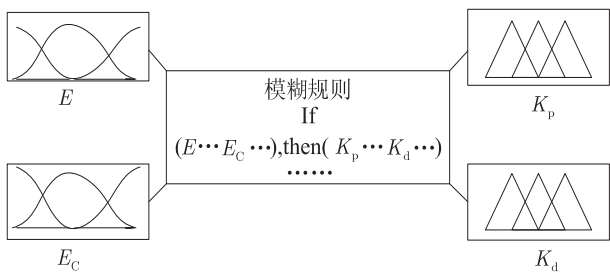


图3 模糊控制输入输出关系

分别对输入 E 、 E_c 建立三角隶属度函数,按照隶属度(大(B)、中(M)、小(S)、零(Z))的不同,隶属度越大越接近“1”,反之越接近“0”^[15]。对各个隶属程度进行模糊运算,将计算出的结果带入模糊规则中,求得对应 K_p 、 K_d 的模糊输出(很大(VB)、大(B)、中(M)、小(S))。

- 模糊控制规则及决策方法:
- 参考以上自整定原则,建立合适的关于 E 、 E_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 的模糊规则:
- 1. If (E is B) and (E_c is B) then (K_p is B) (K_d is S)
 - 2. If (E is B) and (E_c is M) then (K_p is B) (K_d is S)
 -万方数据

16. If (E is Z) and (E_c is Z) then (K_p is B) (K_d is S)

以上16条模糊规则共同构成模糊规则表,见表1和表2。

表1 E_c 、 E 与 K_p 关系规则表

隶属度	B	M	S	Z
B	B	VB	VB	VB
M	M	B	B	B
S	B	VB	VB	B
Z	B	VB	B	S

表2 E_c 、 E 与 K_d 关系规则表

隶属度	VB	B	M	S
B	S	M	M	VB
M	S	M	M	VB
S	S	M	M	VB
Z	S	M	M	VB

模糊控制系统最终输送给执行机构的将是一个精确量而非模糊量,因此需要采用加权平均等方法将模糊的解清晰化^[16]。获得精确的 K_p 和 K_d ,带入PD控制器,便可实现实时的PD参数自整定,从而对不同的倾斜角度以及机器人运动时产生的角加速度,进行参数自整定的PD控制,实时控制机器人直立。

3 仿真及直立状态下角加速度控制结果分析

选取常规的PID控制和PID模糊控制进行仿真分析,对比常规的PID控制系统响应曲线。根据轮式机器人的直立控制需求,采用常规PD控制和模糊自整定PD控制,并用Simulink进行仿真分析。

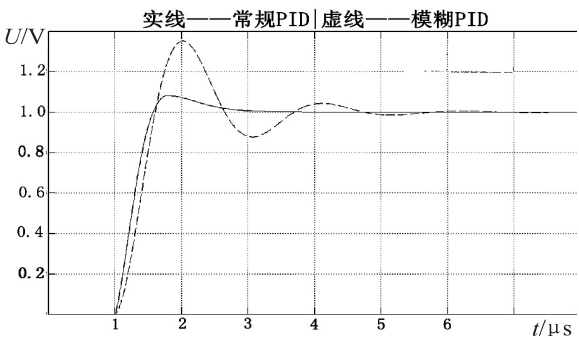


图4 常规PID与模糊自整定PID控制曲线输出

如图4所示,采用模糊控制方法整定PID参数比常规PID控制有更小的超调量、更快的响应速度。将模糊控制与PID控制相结合的参数自整定控制方法,提高了系统的精度、增加了系统的在线自适应能力,振荡小,能更快达到稳定直立的状态。在机器人的直立过程中使用模糊PID参数自整定,能有效提高系统的

鲁棒性,加强直立系统的抗干扰能力,使轮式机器人能够在更复杂的环境下保持直立工作。

将常规 PD 与模糊控制自整定 PD 加入到轮式机器人直立过程中,在保持机器人直立的状态下,对加速度计 z 轴的角加速度放大 1 000 倍后进行测量比较,得到图 5 所示的角加速度变化曲线。

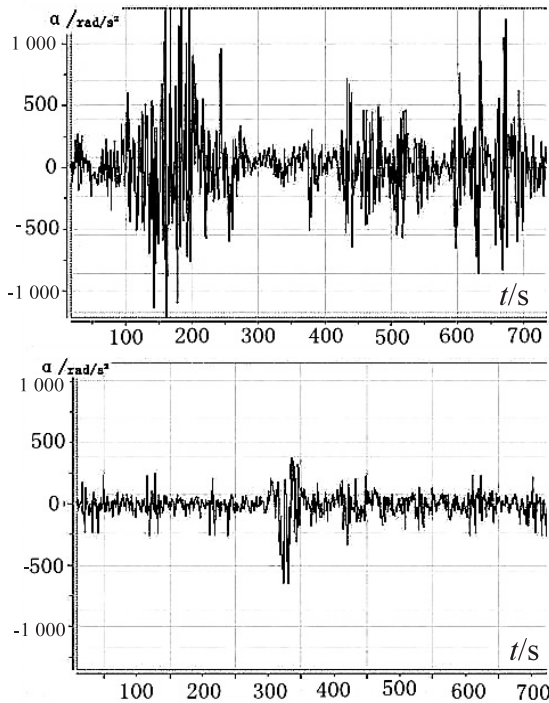


图 5 常规 PID 和模糊自整定 PID 的 z 轴角加速度曲线

图 5(上)为常规 PD 输出的 z 轴加速度曲线。通过计算得到:

极差 = 3 350

标准差 = 424.421

图 5(下)为经过模糊自整定后的 PD 曲线。通过计算得到:

极差 = 1 090

标准差 = 112.926

可知,轮式机器人在直立状态下,经过模糊 PD 自整定的 z 轴角加速度曲线的离散程度较小,缩小了 73.4%,表明机器人在直立状态下抗干扰振荡的效果提升了 3.75 倍。且极差也远小于常规 PD 控制的 z 轴角加速度曲线,缩小了 67.5%,表明机器人在直立状态下产生较小的超调量,控制精度提高了 3.07 倍。

4 结束语

模糊 PID 算法在对非线性、大滞后、强耦合等不稳定动态系统的控制效果明显优于常规 PID 控制,能明显减少系统振荡和系统超调量,并且能更快地达到平衡稳定状态。在轮式机器人的自立过程中,经过模糊

PID 自整定后,抗扰动能力加强,平衡速度更快,控制精度明显提高,能满足更复杂的环境对直立的需求。

参考文献:

- [1] 赖文峰,赵兴龙.机器人在单元化生产中的应用设想[J].金属加工:冷加工,2013(20):24-26.
- [2] 张友鹏,范子荣.基于自适应模糊 PID 控制器的非线性系统仿真[J].计算机仿真,2007,24(6):150-152.
- [3] 宋科科.针对自平衡机器人姿态检测问题的研究[D].北京:北京工业大学,2011.
- [4] 慕足鑫.基于 MEMS 陀螺仪和加速度计的机器人定位系统研究[D].大连:大连交通大学,2015.
- [5] 赵伟.基于混合遗传算法的船舶减横摇模糊神经网络控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [6] 权震华.基于 FPGA 数字 PID 控制器的实现[J].中国科技信息,2014(13):120-123.
- [7] 张永浩.模糊 PID 自整定控制器的仿真研究[J].船海工程,2005(5):1-4.
- [8] 刘宁萍,刘随军,孙勇,等.工业环境高精度空调的模糊 pid 控制方法及装置:CN,CN 102032640 A[P].2011.
- [9] 沈启坤.具有执行机构非线性的稳定自适应模糊控制研究[D].扬州:扬州大学,2007.
- [10] Ma F. An improved fuzzy PID control algorithm applied in liquid mixing system[C]//Proc of IEEE international conference on information and automation. [s. l.]: IEEE, 2014: 587-591.
- [11] Araujo H, Xiao B, Liu C, et al. Design of type-1 and interval type-2 fuzzy PID control for anesthesia using genetic algorithms[J]. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 2014, 6: 70-93.
- [12] Chang W J, Ku C C, Huang P H. Robust fuzzy control via observer feedback for passive stochastic fuzzy systems with time-delay and multiplicative noise[J]. International Journal of Innovative Computing Information & Control, 2011, 7(1): 345-364.
- [13] Sheng W, Bao Z. Fruit fly optimization algorithm based fractional order fuzzy-PID controller for electronic throttle[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(1): 611-619.
- [14] Khooban M H, Alfi A, Abadi D N M. Teaching-learning-based optimal interval type-2 fuzzy PID controller design: a nonholonomic wheeled mobile robots[J]. Robotica, 2013, 31(7): 1059-1071.
- [15] Das S, Pan I, Das S, et al. A novel fractional order fuzzy PID controller and its optimal time domain tuning based on integral performance indices[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(2): 430-442.
- [16] Kim H W, An J W, Zoo H D, et al. Balancing control of bicycle robot using PID control[C]//Proc of international conference on digital object identifier: control, automation and systems. Gwangju, South Korea: [s. n.], 2013: 20-23.