

文章编号: 1001-0920(2003)04-0504-03

平行二级倒立摆的稳定控制

易建强

(中国科学院 自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

摘要: 将单一输入规则群动态加权模糊推理模型应用于平行二级倒立摆系统, 设计出具有 6 个输入变量的模糊稳定控制器。该模糊控制器规则总数少, 直观性强。计算机仿真表明, 该模糊控制器能在短时间内同时实现两摆角度及小车位置的控制。

关键词: 倒立摆; 非线性系统; 模糊控制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Stabilization control of parallel-type double inverted pendulum system

YI Jian-qiang

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A stabilization fuzzy controller is designed based on the single input rule modules dynamically connected fuzzy inference model for a parallel-type double inverted pendulum system. The fuzzy controller with an intuitive structure has a small number of fuzzy rules. Computer simulations show that the fuzzy controller can realize both the angular control of the pendulums and the position control of the cart.

Key words: Inverted pendulum; Nonlinear system; Fuzzy control

1 引言

平行二级倒立摆是复杂的非线性系统。张凤登等^[1]和 Kawatani 等^[2]将线性反馈理论应用于平行二级倒立摆的稳定控制, 并进行了初步实验。Chen 等^[3]提出了基于滑模控制理论的平行二级倒立摆的稳定控制器设计方法。这些方法均以精确数学模型为基础, 在线性化后的状态空间中进行设计, 算法十分复杂。另外, 由于二级倒立摆系统有 6 个输入变量, 直接应用传统的模糊推理模型建立 6 个输入变量的模糊控制器难度很大, 因此 Fujita 等^[4]只设计了两个摆的倒立平衡模糊控制器。

单一输入规则群动态加权模糊模型^[5]能处理多变量系统。本文将该模型应用于平行二级倒立摆的稳定控制, 提出一个仅用少量模糊规则就能同时控

制两摆角度及小车位置的模糊控制器。

2 稳定控制器设计

如图 1 所示, 直线轨道式平行二级倒立摆系统

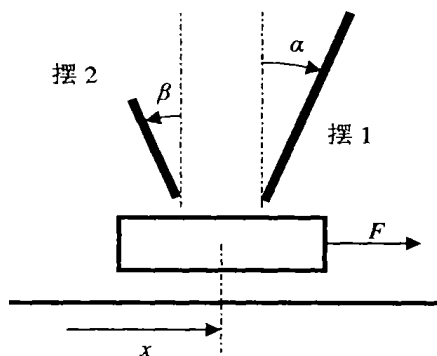


图 1 平行二级倒立摆系统示意

收稿日期: 2002-03-05; 修回日期: 2002-07-26

作者简介: 易建强(1963—), 男, 江西萍乡人, 研究员, 博士生导师, 从事智能控制、机器人等研究。

由直线轨道、小车、摆1、摆2等组成。小车沿轨道左右运动,两摆均绕各自的支撑点转动。两摆的长度必须不同,设摆1为长摆,摆2为短摆。小车的位置为 x ,原点右侧为正。摆1的角度为 α 摆2的角度为 β ,顺时针方向为正。水平作用在小车上的驱动力为 F ,向右为正。

为了设计平行二级倒立摆系统的模糊稳定控制器,依次取摆1的角度 α 及其角速度,摆2的角度 β 及其角速度,小车的位置 x 及其速度,经归一化处理后的变量为模糊控制器的输入变量 $x_i(i=1,2,\dots,6)$,而取驱动力 F 经归一化处理后的变量为模糊控制器的输出变量 f 。

系统有6个输入变量,即使每个变量只定义3个隶属函数,按传统的模糊模型直接设计模糊控制器,最多需要729条模糊规则。如此庞大的模糊规则不仅难以设计,而且造成模糊推理时间加长。另一方面,单一输入规则群动态加权模糊推理模型^[5]可分散处理各个输入变量,并用动态重视度调节各个输入变量的作用,而平行二级倒立摆系统的摆1、摆2及小车的作用各不相同,需要区别对待。因此,在用该模糊推理模型设计平行二级倒立摆系统的模糊稳定控制器时,需要为每个输入变量设定单一输入规则群、动态变量的模糊规则、动态重视度的基本值 and 变化幅度。

在摆1的角度为正且大时,需要施加负的驱动力,向左移动小车。尽管摆1的角度将进一步增大,但摆2将迅速倒向与摆1相同的一侧,并且其角度将超过摆1的角度。在摆2的角度为正且大时,施加正的驱动力,使小车向右移动,结果摆1和摆2都沿逆时针方向转动,两摆的角度逐渐减小。也就是说,摆2的角度必须直接控制,而摆1的角度可以间接控制,需要通过摆2的角度控制才能完成。

对应于摆1和摆2的角度和角速度的单一输入规则群可分别设成表1和表2。同样,对应于小车的位置和速度的单一输入规则群可由表3给出。其中:NB,ZO,PB为各个输入变量在 $[-1.0, 1.0]$ 上等间隔分布的三角形隶属函数;结论部为实数, $f_i(i=1,2,\dots,6)$ 为对应于系统输出变量 f 的中间变量。

表1 摆1的单一输入规则群

条件部	结论部
$x_i(i=1,2)$	$f_i(i=1,2)$
NB	1.0
ZO	0.0
PB	-1.0

表2 摆2的单一输入规则群

条件部	结论部
$x_i(i=3,4)$	$f_i(i=3,4)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

表3 小车的单一输入规则群

条件部	结论部
$x_i(i=5,6)$	$f_i(i=5,6)$
NB	1.0
ZO	0.0
PB	-1.0

摆1只与小车直接关联,摆2也只与小车直接关联,因此可将摆1和摆2看成是相对独立的。在设计对应于摆1的角度和角速度两动态重视度的动态变量模糊规则时,只需考虑摆1自身的角度。当摆1的角度增大时,必须增加摆1的动态重视度,使得系统按摆1的单一输入规则群所规定的方向运行。取摆1角度的绝对值作为条件部变量,设定摆1两动态变量 Δw_1 和 Δw_2 的模糊规则如表4所示。同样,在设计摆2的两动态重视度时,只考虑摆2自身的角度,当摆2的角度增大时,必须增加摆2的动态重视度。摆2的角度和角速度两动态变量 Δw_3 和 Δw_4 的模糊规则如表5所示。当摆1和摆2的角度都比较小时,可以进行小车的位置控制;但只要有一个摆的角度变大,那么小车的位置控制必须暂时搁置起来,而优先进行摆的角度控制。在设定小车的位置和速度两动态变量 Δw_5 和 Δw_6 的模糊规则时,将摆1和摆2角度的绝对值作为条件部变量,模糊规则如表6所示。其中DS,DM,DB为在 $[0, 1.0]$ 上等间隔分布

表4 摆1的动态变量

条件部	结论部
$ x_1 $	$\Delta w_1, \Delta w_2$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表5 摆2的动态变量

条件部	结论部
$ x_3 $	$\Delta w_3, \Delta w_4$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表6 小车的动态变量

$\Delta w_5, \Delta w_6$	$ x_1 $		
	DS	DM	DB
DS	1.0	0.5	0.0
$ x_3 $	DM	0.5	0.0
	DB	0.0	0.0

的三角形隶属函数。

设小车、摆1和摆2的质量分别为1.0 kg, 0.3 kg和0.1 kg, 摆1和摆2的长度分别为1.2 m和0.4 m。根据随机最优探索法, 可求得各个动态重视度的基本值依次为2.369 4, 3.587 4, 1.939 8, 1.401 2, 0.328 1, 0.032 8, 变化幅度依次为0.527 8, 0.057 8, 0.529 8, 1.214 8, 0.000 0, 0.269 0。

该控制器尽管包括6个单一输入规则群和6个动态变量的模糊规则集, 但规则总数仅需48条。

3 稳定控制仿真

为了验证上述模糊控制器的有效性, 本文进行了计算机仿真实验。摆1和摆2的初始角度分别为 5.0° 和 0.0° 时的稳定控制结果如图2所示。设6个状态变量分别收敛于 0.1% , 0.1% , 0.1% , 0.1% , 0.01 m , 0.01 m/s 所需时间为稳定时间, 则稳定时间为 6.23 s 。

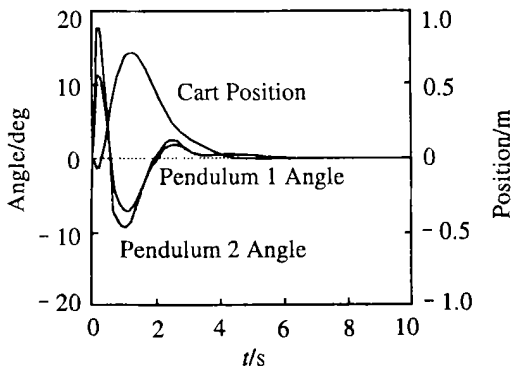


图2 稳定控制结果

模糊控制器的稳定域如图3所示。其中: 横轴和纵轴分别表示摆1和摆2的初始角度; 符号 \square , \circ , \triangle 和 \diamond 分别表示平行二级倒立摆系统的稳定时间小于 4.0 s , 6.0 s , 8.0 s 和 10.0 s 。由图可见, 即使摆1的初始角度为 12.0° 而摆2的初始角度为 18.0° ; 该模糊控制器仍能在 8.0 s 内实现稳定控制。

4 结论

本文将单一输入规则群动态加权模糊推理模型应用于平行二级倒立摆系统, 设计出具有6个输入

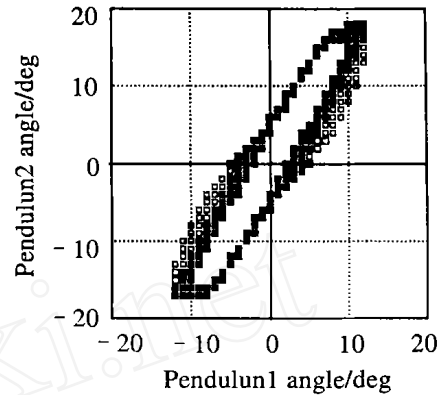


图3 模糊控制器的稳定域

变量的模糊稳定控制器。该控制器所需模糊规则少, 直观性强。通过计算机仿真, 验证了该模糊控制器能在短时间内实现平行二级倒立摆系统的稳定控制。这是利用模糊理论首次完成的包括小车位置控制在内的平行二级倒立摆系统的稳定控制。

参考文献 (References):

- [1] 张凤登, 何介圭, 钱维铁. 平行倒立摆的微型计算机控制[J]. 自动化学报, 1989, 15(5): 458-462
(Zhang F D, He J G, Qian W T. The control of a parallel inverted pendulum by microcomputer [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1989, 15(5): 458-462)
- [2] Kawatani R, Yamaguchi T. Analysis and stabilization of a parallel-type double inverted pendulum system [J]. *Trans Society of Instrument and Control Engineers*, 1993, 29(5): 572-580
- [3] Chen Y, Chang J, Chu S. PC-based sliding-mode control applied to parallel-type double inverted pendulum system [J]. *Mechatronics*, 1999, 9(5): 553-564
- [4] Fujita K, Mizumoto M. Fuzzy controls of parallel inverted pendulum under fuzzy singleton-type reasoning method using genetic algorithm [A]. *Proc Japan 11th Fuzzy System Symposium* [C]. Okinawa, 1995: 379-382
- [5] Yi J, Yubazaki N, Hirota K. A proposal of SRM dynamically connected fuzzy inference model for plural input fuzzy control [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 125(1): 79-92