

文章编号: 1001-0920(2002) 01-0053-04

拟人控制二维单倒立摆

张明廉, 孙昌龄, 杨亚伟
(北京航空航天大学 自动化学院, 北京 100083)

摘要: 以二维单级倒立摆为被控对象, 利用拟人控制的思想形成非线性控制律, 并确定出反馈系数间的相对关系。通过在线调试实现定性控制律的量化, 从而成功地控制了二维单级倒立摆的稳定。与传统的控制系统设计相比, 不依赖于数学模型, 不受线性约束; 与模糊控制相比, 不需要人类直接控制被控对象的经验。拟人控制方法设计简单易行, 且得到的控制系统具有较强的鲁棒性。

关键词: 拟人控制; 广义归约; 二维倒立摆

中图分类号: TP 273. 5

文献标识码: A

Human-imitating control for 2-D inverted pendulum

ZHANG Ming-lian, SUN Chang-ling, YANG Ya-wei

(Faculty of Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking a 2-D inverted pendulum as an object to be controlled, a nonlinear qualitative control law is formed and relations among feedback gains are defined according to human-imitating control. The qualitative control law is then quantified through on-line adjustment. The 2-D inverted pendulum is stabilized vertically showing very strong robustness. Compare with traditional design, human-imitating control does not depends on mathematical model and is not restricted to linear assumption. Compare with fuzzy control system design, it does not require human direct experience of controlling an object to be controlled as well. Moreover, human-imitating design is simple and easy, and systems obtained in such way are very robust.

Key words: human-imitating; generalized reduction; 2-D inverted pendulum

1 引言

应用传统控制理论(包括经典的和现代的), 固然可为线性被控对象设计出完美的控制系统, 但其设计必须依据被控对象的线性数学模型, 没有这个依据, 传统控制理论则将无能为力。利用模糊控制设计控制系统不再依赖线性数学模型, 结果也能令人满意, 但一般说, 其设计必须依据人类直接控制被控

对象的成功经验, 没有这类经验, 模糊控制也将无能为力。我们的研究旨在寻求一种全新的设计思路, 使控制系统设计摆脱传统控制理论和模糊控制之类的智能控制所必须的依据。1993 年, 我们提出拟人控制理论框架(为简便起见, 这里将“拟人智能控制”简称“拟人控制”)。据此, 控制律是利用拟人方法根据被控对象的物理模型直接得出的。

收稿日期: 2000-05-26; 修回日期: 2000-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(69575003); 教育部博士点基金项目(9722)

作者简介: 张明廉(1934—), 男, 湖北汉口人, 教授, 博士生导师, 从事飞行自动控制、智能控制等研究; 孙昌龄(1935—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 从事自动控制、智能控制等研究。

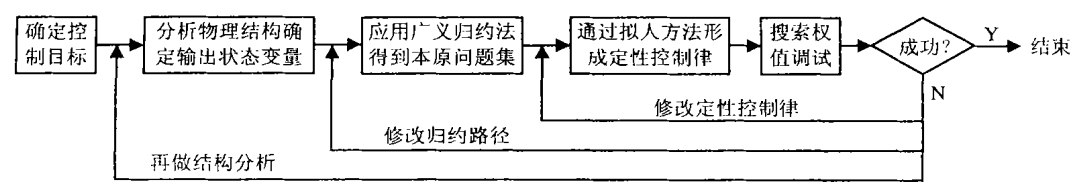


图 1 拟人设计流程

倒立摆系统是控制理论研究的典型被控对象,研究拟人控制也从控制倒立摆入手。我们用不同类型的倒立摆作为被控对象,施行拟人控制,先后在 1994 年和 1998 年成功地稳定了模拟式和数字式两种单电机控制的三级倒立摆^[1~3]; 2000 年初,又成功地稳定了旋臂式二维单级倒立摆。

2 拟人控制简介

拟人控制的核心是广义归约和拟人设计控制律。广义归约是人工智能理论中归约方法的引伸。所谓归约就是化简,即将待解决的复杂问题逐层分解成复杂程度较低的子问题,直至得到可以直接解决的本原问题。本原问题一经解决,各层子问题以致初始的复杂问题均可逐一迎刃而解。人工智能归约中的本原问题定义为可直接解决的简单问题,本原问题之间除次序有关,别无关联^[4]。拟人控制的广义归约中,本原问题定义为已能解决的问题而不论其复杂程度如何,本原问题之间存在不容忽视的耦合。

拟人设计是根据被控对象的物理模型,参照人在一般控制中的直觉和经验直接形成控制律,其流程如图 1 所示。

3 拟人控制二维单倒摆

迄今,二维倒立摆的研究远不及一维倒立摆广泛,仅日本和德国有所报道。日本 Furuta 教授研究组于 1997 年成功地稳定了二维单倒立摆^[5],其中二维倒立摆被看作转臂和摆杆两部分,前者的精确线性化模型和后者的近似线性化模型相结合,构成二维倒立摆总的线性化模型。利用标准线性二次型状态反馈设计线性控制器,采用 CCD 摄像机获取摆杆偏角状态变量,继而用类似方法成功地稳定了二维二级和三级倒立摆。他们设计的前提是建立被控对象的线性化数学模型,而拟人控制则不受此前提的约束。

3.1 广义归约

二维单倒摆结构示于图 2(a),其中安装在①~④处的 4 个电位计分别测出角度信号 θ , θ , α 和

β (见图 2(b))。以前臂中心线为 x 轴, y 轴与其垂直。 θ 为摆杆绕 x 轴的转角, θ 为摆杆绕 y 轴的转角, α 为前臂的转角, β 为后臂的转角。两臂分别由电机 M_A 和 M_B 驱动,电机的控制作用分别为 u_A 和 u_B 。

依据广义归约原则,二维倒立摆这一复杂问题可简化为两个单倒摆的问题。图 3 给出了二维倒立摆一种可能的广义归约路径。必须注意的是,由于前臂与后臂在运动中紧密关联,这两个本原问题之间存在极强的耦合,必须计入控制律中才能最终实现控制目标。这些问题可通过拟人进行力学分析获得解决。

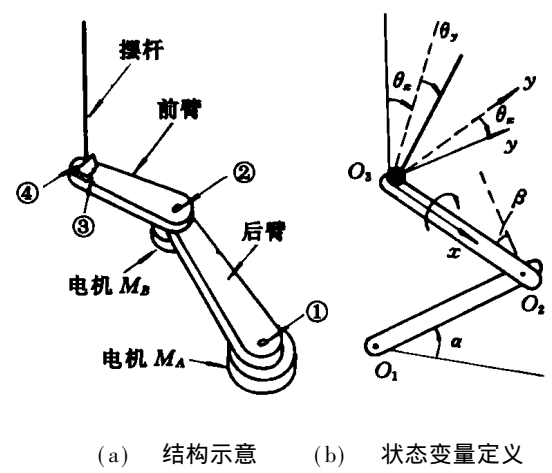


图 2 2-D 单级倒立摆

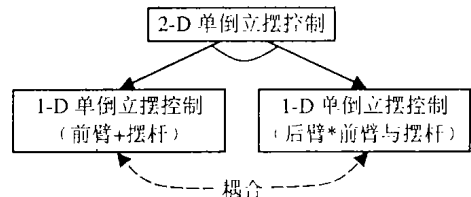


图 3 一种可能的归约路径

3.2 拟人设计控制律

3.2.1 定性控制律设计

为便于分析,首先考虑前臂与后臂垂直的无耦合情况。此时, θ 和支点 O_3 沿 x 轴的位移由 u_A 控制, θ 和支点 O_3 沿 y 轴的位移由 u_B 控制。整个结构可看成两个独立的一维单倒摆(见图 4(a), (b)),相当于在一个单倒摆系统的小车上安装了垂直于其轨道的另一轨道,在这个轨道上由另一电机带动另一小车

和车上链接的单倒摆来回移动。单倒摆一种可能的广义归约路径如图 5 所示。这两个独立单倒摆的控制律分别为

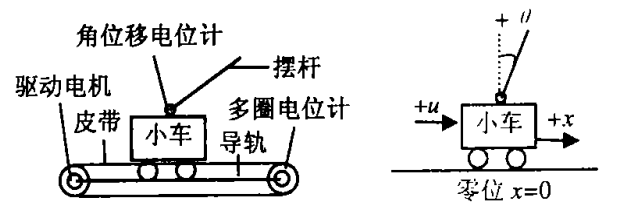
$$u_A = k_{\theta_y} \theta_y + k_{\dot{\theta}_y} \dot{\theta}_y + k_{\alpha} \alpha + k_{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} \quad (1)$$

$$u_B = k_{\theta_x} \theta_x + k_{\dot{\theta}_x} \dot{\theta}_x + k_{\beta} \beta + k_{\dot{\beta}} \dot{\beta} \quad (2)$$

式中 α 和 β 等效于单个单倒摆系统中小车位移 x 。
在式 (1), (2) 的基础上, 考虑两个本原问题之间的耦合, 得出如下控制律

$$u_A = k(\beta) \left[\frac{k_{\theta_y} \theta_y + k_{\dot{\theta}_y} \dot{\theta}_y}{\cos \beta} + k_{\alpha} \alpha + k_{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + k_{u_B} u_B \right] \quad (3)$$

$$u_B = k_{\theta_x} \theta_x + k_{\dot{\theta}_x} \dot{\theta}_x + k_{\beta} \beta + k_{\dot{\beta}} \dot{\beta} + k_{u_A} u_A \sin \beta + k_{\alpha} \dot{\alpha} \quad (4)$$



(a) 结构示意图 (b) 状态变量定义
图 4 一维单级倒立摆

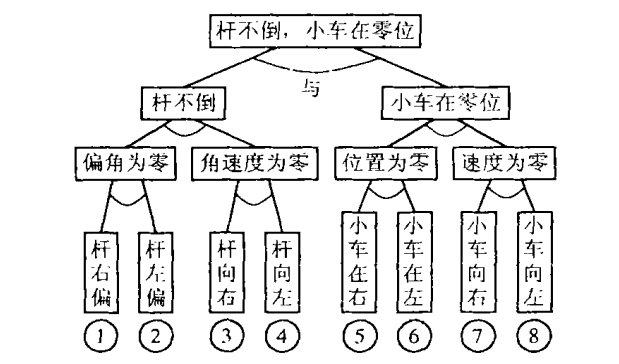


图 5 一种可能的归约路径

分别比较式 (3) 与 (1) 和式 (4) 与 (2) 看出, 考虑耦合后的控制律中做了相应处理, 它体现了人的智能, 是一个拟人的过程。当人用手托着立杆倒向某一方时, 要使杆复位, 手必须沿杆的水平投影向杆顶方向移动, 这是求解二维倒立摆控制律的出发点和关键。二维倒立摆系统中的支点 O_3 应能在控制中像人手那样动作, 这个动作是由电机 M_A 和 M_B 同时分别带动前臂和后臂来实现的。根据力学知识分析出存在耦合情况下两台电机控制作用的所有分量,

将其中有效分量引入控制律, 无效分量加以补偿, 即可达到满意的控制效果。

对式 (3) 分析如下:

1) 前两项除以 $\cos \beta$ 的原因是: 当 $\beta \neq 0$ 时, u_A 通过电机 M_A 产生的控制作用 F_{M_A} 中, 只有沿 x 轴向的分量 $F_{M_A}(\theta_y)$ 作用于 θ_y , 分量 $F_{M_A}(\theta_y)$ 应等效于独立单倒摆的控制作用。根据二维倒立摆的耦合效应, 有

$$F_{M_A} = F_{M_A}(\theta_y) / \cos \beta \quad (5)$$

于是考虑耦合后的控制电压为

$$\frac{u_A(\theta_y)}{\cos \beta} = \frac{(k_{\theta_y} \theta_y + k_{\dot{\theta}_y} \dot{\theta}_y)}{\cos \beta} \quad (6)$$

2) $k_{u_B} u_B$ 是为了补偿前臂由于其上安装的电机 M_B 带动后臂旋转时所承受的反作用力矩。

3) 权值变系数 $k(\beta)$ 是考虑了前臂带动后臂和摆杆相对于 O_1 的转动惯量随 β 而变化, 即

$$k(\beta) = \begin{cases} k_0 + k'|\beta|, & \beta > 0 \\ k_0, & \beta = 0 \\ k_0 - k'|\beta|, & \beta < 0 \end{cases} \quad (7)$$

转动惯量增大时, 电机应给出更大的功率, 以拖动增大的负荷。

对式 (4) 分析如下:

1) 引入 $k_{u_A} u_A \sin \beta$ 近似抵消使支点 O_3 向左下方移动的干扰力 $F_{M_A}(\theta_x)$ 。

2) $k_{\alpha} \alpha$ 是为了补偿 β 零位的改变 (约定前臂与后臂垂直时 β 为零, 后臂转动时 β 的零位随转角 α 而变化)。

3.2.2 状态变量权值的考虑

1) 权值的极性: 由单倒摆拟人控制律设计知 $k_{\theta_y}, k_{\dot{\theta}_y}, k_{\alpha}, k_{\dot{\alpha}}$ 和 $k_{\theta_x}, k_{\dot{\theta}_x}, k_{\beta}, k_{\dot{\beta}}$ 均为正值; 由耦合效应的分析得出 $k(\beta), k_{u_B}, k_{u_A}, k_{\alpha}$ 也均为正值。

2) 权值的相对关系与初步值域: 由单倒立摆拟人控制律设计推知

$$k_{\theta_y} > k_{\alpha}, \quad k_{\dot{\theta}_y} > k_{\alpha}, \quad k_{\theta_x} > k_{\beta}, \quad k_{\dot{\theta}_x} > k_{\beta}$$

3) 在多级运动体之间紧密链接的结构中, 位置和速度信号的权值变得复杂起来。应详细分析各种耦合效应的影响, 并通过调试确定其间关系, 而不能盲目套用“位置信号权值大于速度信号权值”的一般经验。

此外, 二维倒立摆中两台电机的负荷不同, 电机 M_B 只驱动前臂和摆杆, 而电机 M_A 除此之外还要驱动后臂, 其功率显然要大, 即相应控制信号的权值应大。因此要求

表 1 二维倒立摆系统物理参数

物 理 量	数值和单位	物 理 量	数值和单位
摆杆质量	0.4 kg	前臂长度	0.25 m
摆杆长度	0.36 m	A/D 位数	12 bit
后臂质量	1.4 kg	A/D 转换时间	10 μs
后臂长度	0.25 m	D/A 位数	12 bit
前臂质量	1.2 kg	采样周期	30 ms

$k_{\theta_x} > k_{\theta_y}, \quad k_{\dot{\theta}_x} > k_{\dot{\theta}_y}, \quad k_{\alpha} > k_{\beta}, \quad k_{\dot{\alpha}} > k_{\dot{\beta}}$
并且 k_{u_B} 和 k_{u_A} 的上限均为 1, k_{α} 应接近 k_{β} 。
根据定性控制律(3)和(4)以及对权值的讨论,通过物理系统试验调试,成功地控制了旋臂式二维

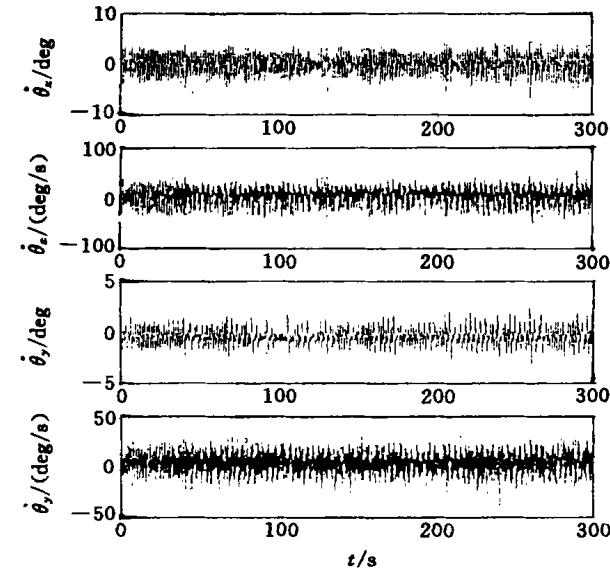


图 6 摆杆偏角

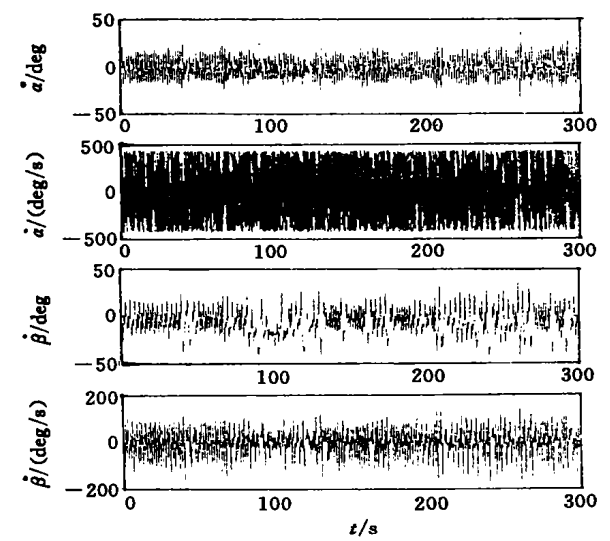


图 7 转臂转角

倒立摆系统。实际系统物理参数参见表 1^[6], 控制计转臂的角运动实测曲线分别如图 6 和图 7 所示。

4 讨 论

应用传统控制理论设计的二维倒立摆控制器局限于可线性化被控对象。文献[5]提出的转臂精确线性化模型, 转臂只能在小范围内运动, 否则不能控制二维倒立摆。拟人控制则不受线性约束, 定性控制律简洁明确, 可控制二维倒立摆在较大空间范围移动, 显示出很大的优越性。而且, 应用传统控制理论也无法得出式(7)和(8)那样的非线性控制律。

拟人控制的研究目标不限于倒立摆系统本身, 而是要探索一种理论或方法, 解决被控制对象难以建模或建模后难以线性化的控制系统设计问题。拟人控制选用 Pentium 133。系统受控稳定状态下摆杆和人控制是值得重视的发展方向。我们应用拟人控制的思想, 先后成功地控制了一维三级倒立摆和二维单级倒立摆, 结果表明, 拟人控制是一种有效的智能控制。与传统方式相比, 应用拟人控制解决复杂控制问题, 方法简单, 性能良好, 只要求设计者具有一般经验和基本力学知识。

拟人控制理论体系尚待进一步发展。控制律从定性到定量的转化还需要一定程度的实验调试, 搜索方法和调试策略仍需改进。实现完整的程序化搜索将使拟人控制更加实用。

参考文献(References):

[1] 张明廉, 郝健康, 何卫东. 拟人智能控制与三级倒立摆[J]. 航空学报(J of Aeron), 1995, 16(6): 654-661.
[2] Zhang Minglian, Sun Changling, Fu Shaoyun. Personified intelligent control[A]. Proc of the Third Asian/Pacific Int Symp on IMAC[C]. Beijing, 1996. 206-210.
[3] 杨亚伟, 张明廉. 三级倒立摆的数控稳定[J]. 北京航空航天大学学报(J of Beijing Univ of Aeron & Astron), 2000, 26(3): 311-314.
[4] 傅京孙, 蔡自兴, 徐光祐. 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
[5] Tasuku Hoshino, Katsubusa Furuta. Stabilization of 2-D inverted pendulum via partial exact linearization[A]. Proc of the 2nd Asian Control Conf[C]. Seoul, 1977. 495-498.
[6] 龙雨. 基于拟人控制的平面运动倒立摆研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.