

文章编号:1000-582X(2012)06-134-07

二级倒立摆 UD2UU 的仿人智能控制分析

但远宏^{1,2}, 李祖枢^{1,2}, 张小川², 谭智^{1,2}

(1. 重庆大学 智能自动化研究所, 重庆 400044; 2. 重庆理工大学 人工智能研究所, 重庆 400054)

摘要:二级倒立摆的两根摆杆可构成 4 个平衡点(down-down, down-up, up-down, up-up), 4 个平衡点之间可构成 12 个转换动作与 8 个自旋动作。针对平衡点间转换动作中 up-down 到 up-up (UD2UU)的非线性欠驱动控制问题,应用基于动觉智能图式的仿人智能控制方法,设计出具有多控制器和多控制模态结构的控制系统。以开闭环结合及正负反馈结合的方法设计出各控制模态的控制律,以基于特征模型的关联图式实现各控制模态之间的有序切换。详细介绍了仿人智能控制器设计的过程,实时控制的实例证明了控制理论与方法的有效性。

关键词:倒立摆; UD2UU; 仿人智能控制(HSIC); 多模态控制(MMC)

中图分类号:TP273.3

文献标志码:A

Research of UD2UU with human simulated intelligent control for a double inverted pendulum

DAN Yuan-hong^{1,2}, LI Zu-shu^{1,2}, ZHANG Xiao-chuan², TAN Zhi^{1,2}

(1. Institute of Intelligent Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Institute of Artificial Intelligence System, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, P. R. China)

Abstract: Double pendulum has four equilibrium points (down-down, down-up, up-down, and up-up). Twelve transfer actions and eight spin actions can be formed with these equilibrium points. One of the transfer action, up-down to up-up (UD2UU) with human simulated intelligent control (HSIC) theory based on sensor-motor intelligent schema is studied. Control system designed by HSIC has following advantages: hierarchic control architecture with multi controller and multi control mode; hybrid control law combining close loop and open loop control as well as positive feedback and negative feedback control; associating schema based on characteristic model which takes charge of switch between each control mode. The design process of HSIC controller for UD2UU is discussed. The real-time control results demonstrate the validation of the proposed theory and method.

Key words: inverted pendulum; UD2UU; human simulated intelligent control; multi-mode control

倒立摆是一类典型的非线性、多变量、强耦合的欠驱动控制系统,各类控制性能特征(如稳定性、快速性、准确性)都会被及时直观的反映出来,是验证各种控制理论与方法的有效平台。由于其巨大的控

制难度,一直以来都是自动控制领域的研究热点之一。一般而言,对倒立摆的研究主要集中在 2 个方面:1)倒立摆在平衡点附近的稳摆控制;2)倒立摆各个平衡点之间的转换控制。倒立摆的每根摆杆都有

收稿日期:2011-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60574076);重庆市自然科学基金资助项目(2009BB3233)

作者简介:但远宏(1981-),男,重庆大学博士,主要从事智能控制与进化计算方向研究,(Tel)13883541065;
(E-mail)cq.dan3@gmail.com。

垂直向上(up)和垂直向下(down)2个平衡点, N 级倒立摆系统有 N^2 个平衡点。二级倒立摆的4个平衡点分别为(如图1所示): down-down、down-up、up-down、up-up。

1) 稳摆控制: 主要是针对摆杆 Up 平衡点的稳定控制, 如二级倒立摆 Up-Up 平衡点。很多学者对此进行研究, 已经实现了从一级到四级倒立摆的稳定控制, 提出了各种控制方法, 如基于 LQR 的 PD 控制^[1]、滑模变结构控制^[2]、云控制^[3]、变论域模糊自适应控制^[4]、拟人智能控制等^[5]。

2) 平衡点间的转换控制: 目前的绝大多数研究集中在从悬垂点(down)到倒立点(up)的转换控制, 一般称为“摆起倒立控制”, 由于涉及到大范围的非线性欠驱动控制过程, 控制难度很大。对于一级倒立摆, 采用基于能量的控制方法^[6-8]即可实现单摆的摆起倒立控制; 对于二级倒立摆则必须采用智能控制算法或一些综合性的方法才能实现, 如逆系统方法^[9]、能量控制与耗散系统相结合的方法^[10]、仿人智能控制方法^[11]等。而对于三级倒立摆, 目前仅见有仿真摆起倒立控制的成功报道^[12]。

而更为广义的平衡点间的转换控制包含了平衡点之间的任意转换以及平衡点自身的回环控制(如图1所示)。文献[13]较早的提出了平衡点间转换控制的概念, 但未作深入全面的讨论; 文献[14]则较为全面地研究了二级倒立摆平衡点间的任意转换控制, 并以 DU2UD (down-up to up-down) 为例演示了控制器的分析与设计过程。

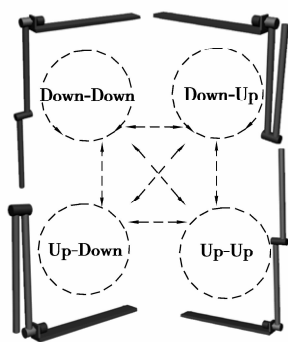


图1 旋转二级倒立摆的4个平衡点及相互转换

运用仿人智能控制理论, 以旋转二级倒立摆 up-down 平衡点向 Up-Up 平衡点的转换动作(简称为 UD2UU)为研究对象, 将 UD2UU 控制任务分解为多个更易实现的子任务并分别设计出运动图式与关联图式, 建立起具有多控制器与多控制模态结构的仿人智能控制器并在实际设备上验证。

1 旋转二级倒立摆的数学模型

典型的旋转二级倒立摆装置如图2所示, 其外杆与内杆之间, 以及内杆与旋臂之间为自由连接。旋臂由伺服电机驱动, 在圆形轨道上作往复运动。因此这是一个典型的单驱动控制多自由度的欠驱动控制问题。摆杆(内杆和外杆)的角度由安装在关节处的编码器测得, 旋臂的角度由电机编码器测量后换算得到。



图2 旋转二级倒立摆装置

旋转二级倒立摆的物理结构及角度定义如图3所示。定义广义坐标向量 $\Theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2]$, 则有 $\dot{\Theta} = [\dot{\theta}_0 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]$, $\ddot{\Theta} = [\ddot{\theta}_0 \ \ddot{\theta}_1 \ \ddot{\theta}_2]$, 根据动力学分析, 运用拉格朗日方法, 可导出旋转二级倒立摆的动力学模型如下

$$M\ddot{\Theta}^T + C\dot{\Theta}^T + G = F. \quad (1)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ -(m_1 g l_1 + m_2 g L_1) \sin \theta_1 - m_0 g L_1 \sin \theta_1 \\ -m_2 g l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}.$$

$$M_{11} = (J_0 + m_1 L_0^2 + m_2 L_0^2) + (J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2) \sin^2 \theta_1 + (J_2 + m_2 l_2^2) \sin^2 \theta_2 + 2m_2 L_1 l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{2} m_b (2L_0^2 + L_1^2 - L_1^2 \cos(2\theta_1));$$

$$\begin{aligned}
M_{12} &= M_{21} = (m_1 L_0 l_1 + m_2 L_0 L_1) \cos \theta_1 + \\
&\quad m_b L_0 L_1 \cos \theta_1; \\
M_{13} &= M_{31} = m_2 L_0 l_2 \cos \theta_2; \\
M_{22} &= J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + m_b L_1^2; \\
M_{23} &= M_{32} = m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2); \\
M_{33} &= J_2 + m_2 l_2^2; \\
C_{11} &= c_0, C_{22} = c_1 + c_2, C_{33} = c_2; \\
C_{12} &= (J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2) \dot{\theta}_0 \sin 2\theta_1 - \\
&\quad (m_1 L_0 l_1 + m_2 L_0 L_1) \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + \\
&\quad 2m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_0 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \\
&\quad m_b L_1^2 \dot{\theta}_0 \sin 2\theta - m_b L_0 L_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1; \\
C_{13} &= (J_2 + m_2 l_2^2) \dot{\theta}_0 \sin 2\theta_2 - \\
&\quad m_2 L_0 l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + 2m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_0 \sin \theta_1 \cos \theta_2; \\
C_{21} &= -\frac{1}{2} (J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2) \dot{\theta}_0 \sin 2\theta_1 - \\
&\quad m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_0 \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \frac{1}{2} m_b L_1^2 \dot{\theta}_0 \sin 2\theta_1; \\
C_{23} &= m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2; \\
C_{31} &= -\frac{1}{2} (J_2 + m_2 l_2^2) \dot{\theta}_0 \sin 2\theta_2 - \\
&\quad m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_0 \sin \theta_1 \cos \theta_2; \\
C_{32} &= -m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2;
\end{aligned}$$

上式中: m_1, m_2, m_b 分别为内杆, 外杆, 及内外杆连接处编码器的质量; L_0, L_1 分别为旋臂和内杆的长度; l_1, l_2 分别表示内杆和外杆质心到转轴的长度; c_0, c_1, c_2 分别为旋臂, 内杆, 外杆转轴的转动摩擦系数; J_0, J_1, J_2 分别为旋臂, 内杆, 外杆的转动惯量; u 为控制输入. 各物理参数的取值如表 1 所示, 其中 m_1, m_2, m_b, L_0, L_1 为实验装置的实测值, $l_1, l_2, c_1, c_2, J_1, J_2$ 是采用文献[15]中改进遗传算法, 搜索得到的等效值.

表 1 旋转二级倒立摆的物理参数

m_1	0.131 kg	l_2	0.1599 m
m_2	0.104 kg	c_1	0.004 563
m_b	0.208 kg	c_2	0.001 846
L_0	0.375 m	J_1	0.001 640 6
L_1	0.4 m	J_2	0.001 437 4
l_1	0.260 7 m		

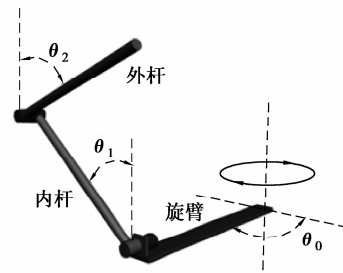


图 3 旋转二级倒立摆物理结构

2 控制任务分解与控制律的确定

旋转二级倒立摆的 UD2UU 控制, 实际上是摆杆从 up-down 平衡态到 up-up 平衡态的转换运动。在这个过程中, 涉及到外杆的大范围非线性旋转运动和两摆杆的动态平衡, 要求实现对摆杆能量与姿态的精确调节. 从能量的角度来看, 倒立摆系统需要在控制的作用下从初始状态 $(\theta_{UD}, \dot{\theta}_{UD}) = (0, 0, \pi, 0, 0, 0)$ 迁移到目标状态 $(\theta_{UU}, \dot{\theta}_{UU}) = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, 其能量状态的变化如式(2)所示.

$$E_{UD} = m_1 g l_1 + m_b g L_1 + m_2 g (L_1 - l_2) \longrightarrow$$

$$E_{UU} = m_1 g l_1 + m_b g L_1 + m_2 g (L_1 + l_2). \quad (2)$$

由于两摆杆之间是自由连接, 在运动过程中仅能依靠关节间的耦合作用和惯性进行摆杆间角度、角速度以及相对姿态的准确控制. 采用传统的单控制器与单控制模态的控制器结构很难完成此类复杂控制任务. 依据基于动觉智能图式的仿人智能控制理论^[16], 首先将 UD2UU 的控制任务分解为若干个可独立执行的、较为简单的子控制任务. 通过整个运动过程的动力学分析, 容易得出以下结论: 首先必须打破 up-down 的平衡态; 然后将外杆从 down 位置摆起到 up 位置, 同时维持内杆的 up 位置; 最后摆杆必须稳定于 up-up 平衡态. 由于 up-up 的稳定控制对摆杆的能量与姿态有着非常严格的要求, 稍有偏差就会稳摆失败, 从而导致整个控制任务失败, 因此有必要在进入 up-up 稳定控制之前增加一个控制阶段, 用于实现对摆杆的姿态整定, 以提高系统的鲁棒性.

综上所述, 可将整个控制任务分解为如下 4 个子控制任务 (见图 4): 1) 初始扰动; 2) 摆起控制; 3) 姿态整定; 4) 稳摆控制. 它们之间分别的准确控制和相互精确转换是控制成功的关键.

2.1 初始扰动

本阶段的目标包括: 1) 维持摆杆在 up-down 平衡位置附近; 2) 打破 up-down 平衡态.

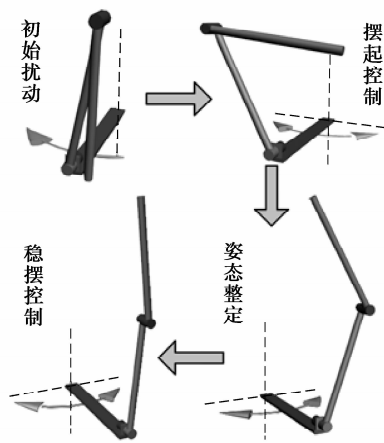


图 4 up-down 向 up-up 转换过程示意图

由于 up-down 为非自然稳定平衡态,为维持其不倒下,需施加如下控制率

$$u_{11} = k_{UD1}e_{\theta_0} + k_{UD2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{UD3}e_{\theta_{U1}} + k_{UD4}\dot{e}_{\theta_{U1}} + k_{UD5}e_{\theta_{D2}} + k_{UD6}\dot{e}_{\theta_{D2}}, \quad (3)$$

式中: $e_{\theta_0}, \dot{e}_{\theta_0}$ 分别为旋臂的角度和角速度误差; $e_{\theta_{U1}}, \dot{e}_{\theta_{U1}}$ 分别为内杆以垂直向上位置(Up)为零点的角度和角速度误差; $e_{\theta_{D2}}, \dot{e}_{\theta_{D2}}$ 为外杆以垂直向下位置(Down)为零点的角度和角速度误差; $k_{UD1}, k_{UD2}, k_{UD3}, k_{UD4}, k_{UD5}, k_{UD6}$ 则分别为旋臂和两摆杆的比例微分系数。

在保证摆杆不倒下的同时,还必须施加如下的 Bang-Bang 扰动,以使摆杆脱离 up-down 平衡状态

$$u_{12} = U_1, \quad (4)$$

式中 U_1 为一常量。

阶段的 2 个目标必须同时兼顾,综合式(3)和式(4)即可得到初始扰动的控制律

$$u_1 = k_{UD1}e_{\theta_0} + k_{UD2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{UD3}e_{\theta_{U1}} + k_{UD4}\dot{e}_{\theta_{U1}} + k_{UD5}e_{\theta_{D2}} + k_{UD6}\dot{e}_{\theta_{D2}} + U_1. \quad (5)$$

本阶段的动力学目标是打破 up-down 平衡,当摆杆状态偏离 up-down 平衡点指定邻域时,即进入摆起控制阶段。由此可得初始扰动阶段的特征状态(即执行条件)为

$$|e_{\theta_{U1}}| < \theta_{c0} \cap \text{step} = 1, \quad (6)$$

式中: $e_{\theta_{U1}}$ 内杆以垂直向上为零点的角度误差; θ_{c0} 为判断倒立摆系统是否基本处于 up-down 动平衡状态的特征阈值,为较小的常数值; step 时序变量,用于保证各子控制任务间顺序执行性。

2.2 摆起控制

在摆起控制过程中,需兼顾子目标:1)维持内杆在垂直向上(up)位置附近不倒下;2)将外杆越摆越高并最终接近垂直向上(up)位置。也即是对旋臂

和内杆实施负反馈控制,使其尽量稳定在零位附近;同时对外杆施加正反馈控制,不断注入能量使其从低势能位迁移到高势能位。

为实现第一个子目标,可将旋臂-内杆考虑为单摆系统,施加如下的 PD 控制率

$$u_{21} = k_{SU1}e_{\theta_0} + k_{SU2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{SU3}e_{\theta_{U1}} + k_{SU4}\dot{e}_{\theta_{U1}}, \quad (7)$$

式中 $k_{SU1}, k_{SU2}, k_{SU3}, k_{SU4}$ 分别为旋臂和内杆的比例微分系数。

而为了对外杆构成正反馈控制,只需在旋臂上施加与外杆旋转速度反向的力矩即可,即

$$u_{22} = -\text{sign}(\dot{\theta}_2)U_2, \quad (8)$$

式中 U_2 为 Bang-Bang 正常量。

综合式(7)和式(8)即得到摆起控制的控制律

$$u_2 = k_{SU1}e_{\theta_0} + k_{SU2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{SU3}e_{\theta_{U1}} + k_{SU4}\dot{e}_{\theta_{U1}} - \text{sign}(\dot{\theta}_2)U_2. \quad (9)$$

式(9)中的两控制律之间是相互制约的控制效果:若增大 U_2 的值可以让外杆更快的摆起,但对旋臂和内杆动平衡的干扰也会更大,严重时会导致摆杆失控;若调整 PD 参数使“旋臂-内杆”单摆系统的刚性增强,这有利于维持旋臂和单摆的动平衡,但会使“旋臂-内杆-外杆”的正反馈通道的传递效果减弱,甚至无法使外杆摆起。因此式(9)的控制参数需合理调节才能实现子控制目标的兼顾。

摆起控制阶段的动力学目标是将外杆摆起到水平线以上,当外杆进入指定区域时,即进入姿态整定阶段。因此摆起控制的特征模态(执行条件)为

$$|e_{\theta_{U2}}| > \theta_{c1} \cap \text{step} = 2, \quad (10)$$

上式中: $e_{\theta_{U2}}$ 为外杆以垂直向上(up)为零点时的角度误差; θ_{c1} 是判断外杆是否进入姿态整定区域的特征阈值,为常数值。

2.3 姿态整定

摆杆进入姿态调整区域后,为使两摆杆以适当能量与相对姿态继续摆起并进入稳摆控制,需要对倒立摆系统的能量进行调节,并使两摆杆相对角度不能太大,最好是以“拟单摆”的姿态进入稳摆控制阶段。为此可对旋臂和两摆杆施加如下的 PD 控制律

$$u_3 = k_{PA1}e_{\theta_0} + k_{PA2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{PA3}e_{\theta_{U1}} + k_{PA4}\dot{e}_{\theta_{U1}} + k_{PA5}e_{\theta_{U2}} + k_{PA6}\dot{e}_{\theta_{U2}}, \quad (11)$$

上式中 $k_{PA1}, k_{PA2}, k_{PA3}, k_{PA4}, k_{PA5}, k_{PA6}$ 分别为旋臂、内杆、外杆的比例微分参数,通过旋转二级倒立摆的数学模型在姿态整定区域内线性化后计算得到。

本阶段的特征末态为

$$\theta_{c2} < |e_{\theta_{U2}}| \leq \theta_{c1} \cap \text{step} = 3, \quad (12)$$

其中, θ_{C2} 是判断外杆是否进入稳摆控制区域的特征阈值。

2.4 稳摆控制

当两摆杆到达 up-up 位置附近时, 即进入稳摆阶段。阶段的动力学控制目标是维持两摆杆在 up-up 动平衡, 可由如下施加在旋臂上的控制律实现

$$u_4 = k_{UU1}e_{\theta_0} + k_{UU2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{UU3}e_{\theta_{U1}} +$$

$$\begin{cases} u_1 = k_{UD1}e_{\theta_0} + k_{UD2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{UD3}e_{\theta_{U1}} + k_{UD4}\dot{e}_{\theta_{U1}} + k_{UD5}e_{\theta_{D2}} + k_{UD6}\dot{e}_{\theta_{D2}} + U_1, \\ |e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C0} \cap \text{step} == 1; \\ u_2 = k_{SU1}e_{\theta_0} + k_{SU2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{SU3}e_{\theta_{U1}} + k_{SU4}\dot{e}_{\theta_{U1}} - \text{sign}(\dot{\theta}_2)U_2, \\ |e_{\theta_{U2}}| > \theta_{C1} \cap \text{step} == 2; \\ u_3 = k_{PA1}e_{\theta_0} + k_{PA2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{PA3}e_{\theta_{U1}} + k_{PA4}\dot{e}_{\theta_{U1}} + k_{PA5}e_{\theta_{U2}} + k_{PA6}\dot{e}_{\theta_{U2}}, \\ \theta_{C2} < |e_{\theta_{U2}}| \leq \theta_{C1} \cap \text{step} == 3; \\ u_4 = k_{UU1}e_{\theta_0} + k_{UU2}\dot{e}_{\theta_0} + k_{UU3}e_{\theta_{U1}} + k_{UU4}\dot{e}_{\theta_{U1}} + k_{UU5}e_{\theta_{U2}} + k_{UU6}\dot{e}_{\theta_{U2}}, \\ |e_{\theta_{U2}}| \leq \theta_{C2} \cap \text{step} == 4. \end{cases} \quad (15)$$

3 实时控制实验

对 UD2UU 进行了任务分解, 实现了对阶段控制目标和控制律的分析与设计, 并得到如式(15)所示的控制律。采用 C 语言编程实现了该控制器, 并在如图 5 所示的拟人形旋转二级倒立摆装置上进行了实时控制实验。实时控制器中的各参数如表 2 所示。图 5 显示了旋转二级倒立摆旋臂和各摆杆的运行状态曲线图, 图 6 为实时控制过程的视频截图。旋转二级倒立摆的各物理参数如表 1 所示。实时控制环境: 摆杆角度编码器精度 600P/R, 交流伺服电机编码器精度 2500P/R, 编程环境 VC6.0, 运行环境 P4 2.66G, Windows XP, 控制周期 0.005 s。

表 2 控制参数与特征参数表

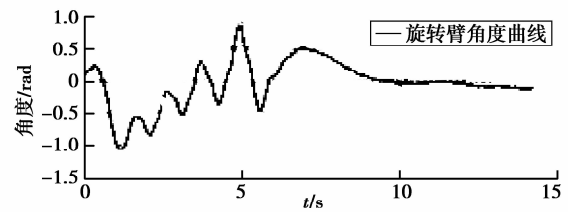
参量	参数	参量	参数	参量	参数
k_{UD1}	1.41	k_{SU2}	2.40	k_{PA5}	332.30
k_{UD2}	3.00	k_{SU3}	76.10	k_{PA6}	47.00
k_{UD3}	95.12	k_{SU4}	12.82	θ_{C2}	0.175
k_{UD4}	16.02	U_2	5.80	k_{UU1}	4.47
k_{UD5}	-16.46	θ_{C1}	0.698	k_{UU2}	6.10
k_{UD6}	-1.10	k_{PA1}	1.00	k_{UU3}	-315.64
U_1	5.00	k_{PA2}	2.43	k_{UU4}	-11.34
θ_{C0}	0.873	k_{PA3}	-294.58	k_{UU5}	398.25
k_{SU1}	1.13	k_{PA4}	-15.30	k_{UU6}	56.81

$$k_{UU4}\dot{e}_{\theta_{U1}} + k_{UU5}e_{\theta_{U2}} + k_{UU6}\dot{e}_{\theta_{U2}}, \quad (13)$$

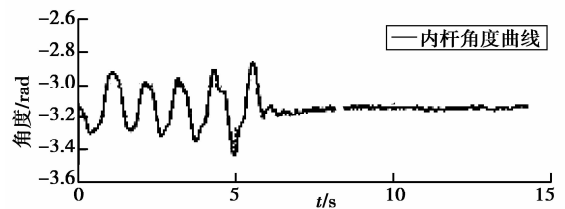
式中: $k_{UU1}, k_{UU2}, k_{UU3}, k_{UU4}, k_{UU5}, k_{UU6}$ 分别表示旋臂、内摆杆和外摆杆稳摆控制的比例微分系数。式(13)运行的条件, 即稳摆阶段的特征状态为

$$|e_{\theta_{U2}}| \leq \theta_{C2} \cap \text{step} == 4. \quad (14)$$

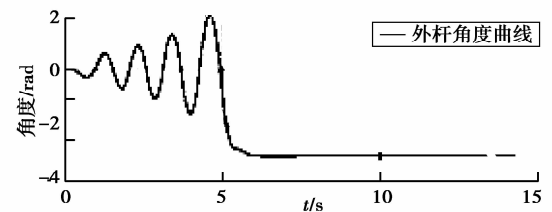
综上所述, 整个 UD2UU 运动过程控制的控制器结构, 即动觉智能图式可归纳如下



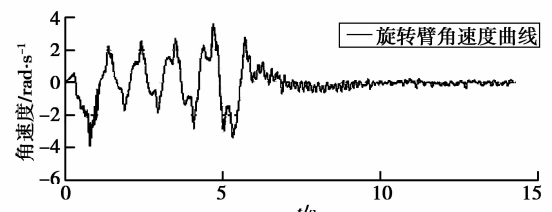
(a) 旋臂角度曲线



(b) 内杆角度曲线



(c) 外杆角度曲线



(d) 旋臂角速度曲线

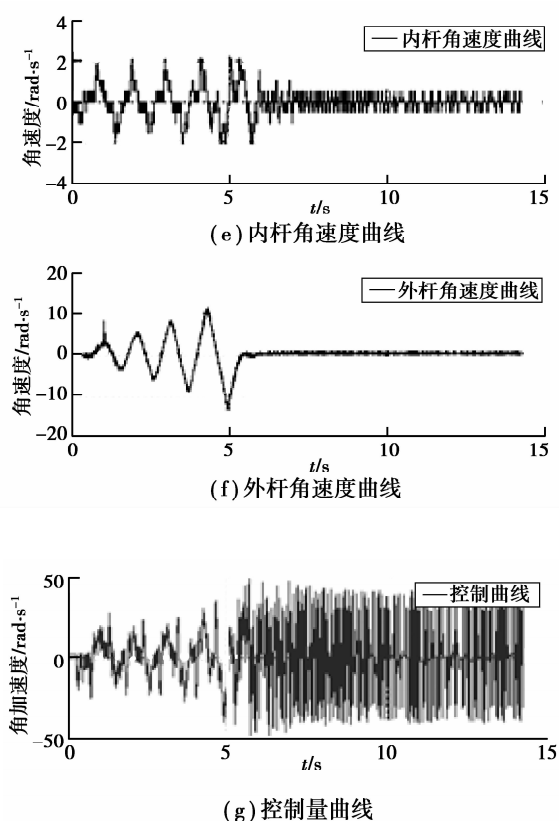


图5 UD2UU 实时控制曲线图

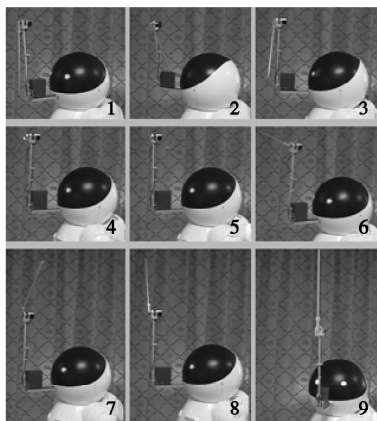


图6 UD2UU 实时控制视频截图

4 结论

采用仿人智能控制方法,进行了控制器的分析与设计,实现了旋转二级倒立摆从 up-down 平衡点向 up-up 平衡点的转换运动控制,实时控制实验表明了这套方法的有效性。

但同时由于仿人智能控制器的多控制器与多控制模式的控制器结构,引入了众多的控制参数与特征模态参数,导致了控制参数的确定与优化非常困难。同时倒立摆对控制的实时性与精确要求很高,

对设备与环境的不确定性非常敏感,导致控制的重复性不是很高(60%左右)。为解决上述问题,还做了以下研究工作:

1)对实验设备的数学模型进行精确辨识,使得仿真控制参数在作最小修改的情况下可以尽快移植到实时控制中。

2)采用遗传算法对仿真控制参数进行优化,此结果同时对实时控制的优化也具有很强的借鉴意义。

3)通过仿真研究获得状态变量的理想参考轨迹,并据此进行控制参数的实时校正,使得实时控制的成功率(可重复性)从之前的60%左右上升到90%以上。

目前,UD2UU 控制动作作为双摆杂技机器人杂技动作的重要组成部分,且其控制技术与方法已获得国家发明专利授权,并作为科普产品在天津科技馆和重庆科技馆展出。

参考文献:

- [1] 王鹏虎, 李小兵, 付国庆, 等. 三级倒立摆系统全程滑模变结构控制[J]. 机械设计与制造, 2009 (7): 127-129.
WANG PENG-HU, LI XIAO-BING, FU GUO-QING, et al. The full process variable structure control of 3-stage system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009 (7): 127-129.
- [2] 李德毅. 三级倒立摆的云控制及动平衡模式[J]. 中国工程科学, 1999, 1(2): 41-46.
LI DE-YI. The cloud control method and balancing patterns of triple link inverted pendulum systems[J]. Engineering Sciences, 1999, 1(2): 41-46.
- [3] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 四级倒立摆的变论域自适应模糊控制[J]. 中国科学: E 辑, 2002, 32(1): 65-75.
LI HONG-XING, MIAO ZHI-HONG, WANG JIA-YIN. The adaptive fuzzy control of fourfold inverted pendulum based on variable universe [J]. Science in China: Series E, 2002, 32(1): 65-75.
- [4] 杨亚炜, 张明廉. 三级倒立摆的数控稳定[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(3): 311-314.
YANG YA-WEI, ZHANG MING-LIAN. Stabilizing triple inverted pendulum using computer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(3): 311-314.
- [5] ASTROM K J, FURUTA K. Swing-up a pendulum by energy control [J]. Automatica, 2000, 36 (2): 287-295.
- [6] MUSKINJA N, TOVORNIK B. Swinging-up and stabilization of a real inverted pendulum [J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 631-639.
- [7] RUBI J, RUBIO A, AVELLO A. Swing-up control problem for a self-erecting double inverted pendulum [J]. IEEE Proceedings of Control Theory and Applications, 2002, 149(2): 169-175.
- [8] DEVASIA S, CHEN D G, PADEN B. Nonlinear inversion-based output tracking[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(7): 930-942.
- [9] ZHONG W, ROCK H. Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart[C]// Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Application. Sept 5-7, 2001. Mexico: IEEE Press, 2001: 896-901.
- [10] 李祖枢, 王育新, 张华, 等. 小车二级摆系统的摆起倒立控制与实践[C]. 杭州: 第 5 届全球智能控制与自动化大会, 2004: 2360-2364.
- [11] LI Z S, DAN Y H, WEN Y L, et al. Swinging-up and handstand control of cart- triple-pendulum system based on human simulated intelligent control theory [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004(S1): 1-6.
- [12] YAMAKITA M, IWASHIRO M, SUGAHARA Y, et al. Robust swing-up control of double pendulum[C]//Proceedings of the American Control Conference. June 21-23, 1995, Seattle, WA, USA. [S. l.]: IEEE Press, 1995, 1: 290-295.
- [13] 李祖枢, 但远宏, 张小川, 等. 双摆机器人摆杆平衡态任意转换运动控制的实现[J]. 自动化学报, 2010, 36(12): 1720-1731.
- LI ZU-SHU, DAN YUAN-HONG, ZHANG XIAO-CHUAN, et al. Fulfillment of arbitrary transfer movement control between equilibrium statuses for a double pendulum robot[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(12): 1720-1731.
- [14] 李祖枢, 张华, 古建功, 等. 3 关节单杠体操机器人的动力学参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 242-246, 252.
- LI ZU-SHU, ZHANG HUA, GU JIAN-GONG, et al. Dynamic parameter identification of three-link acrobot on horizontal bar [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(2): 242-246, 252.
- [15] 涂序彦. 人工智能:回顾与展望[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 174-207.
- (编辑 侯 湘)
-
- (上接第 128 页)
- [13] SONG F X, ZHANG D P, YANG J Y, et al. A multiple maximum scatter difference discriminant criterion for facial feature extraction [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2007, 37(6): 1599-1606.
- [14] 谢志强, 高丽, 杨静. 基于球结构的完全二叉树 SVM 多类分类算法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(11): 3268-3274.
- XIE ZHI-QIANG, GAO LI, YANG JING. SVM multi-class classification algorithm based on full-binary tree of sphere-structured [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(11): 3268-3274.
- [15] TAX D M J, DUIN R P W. Support vector domain description [J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(11/13): 1191-1199.
- [16] 陈荣, 曹永锋, 孙洪. 基于主动学习和半监督学习的多类图像分类[J]. 自动化学报, 2011, 37(8).
- CHEN RONG, CAO YONG-FENG, SUN HONG. Multi-class image classification with active learning and semi-supervised learning [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(8): 954.
- [17] 孙永奎, 陈光祜, 李辉. 支持向量机在模拟电路故障诊断中应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(2): 72-75.
- SUN YONG-KUI, CHEN GUANG-JU, LI HUI. Support vector machine for analog circuit fault diagnosis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(2): 72-75.
- [18] UCI Machine Learning Repository [DB/OL]. <http://archive.ics.uci.edu/ml>.
- (编辑 侯 湘)