

双摆机器人摆杆平衡态任意转换运动控制的实现

李祖枢^{1,2} 但远宏^{1,2} 张小川¹ 肖琳² 谭智^{1,2}

摘要 双摆机器人两摆杆具有一个自稳定 (Down-down) 和三个自不稳定 (Down-up, up-down, up-up) 的平衡状态, 4 个平衡状态之间可以构成 12 个相互转换的运动动作和 8 个自旋动作. 本文运用基于动觉智能图式的仿人智能控制理论, 设计具有基于特征辨识多控制模态结构的控制器; 采用“类等效”的系统建模方法和改进型遗传算法, 实现双摆机器人模型的精确辨识和其多模态控制器多参数的整定与优化, 并解决了多控制模态之间的平滑切换, 以及从仿真研究到实时控制成功的快速过渡等关键问题. 以 (Down-up) 向 (Up-down) 状态的转换为例, 说明了如何实现四个平衡状态之间的任意相互转换的运动控制, 并介绍了仿人智能控制器设计的详细过程. 仿真与实时控制的实例证明了设计理论与方法的有效性.

关键词 双摆机器人, 平衡态转换, 多模态控制, “类等效”建模, 改进型遗传算法

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.01720

Fulfillment of Arbitrary Movement Transfer Control between Equilibrium States for a Double Pendulum Robot

LI Zu-Shu^{1,2} DAN Yuan-Hong^{1,2} ZHANG Xiao-Chuan¹ XIAO Lin² TAN Zhi^{1,2}

Abstract In a double pendulum robot, there are four equilibrium states, namely one natural stable position (down-down) and three unnatural stable positions (down-up, up-down, up-up). With transfers between these states, 20 acrobatic actions can be formed (12 states transfer actions and 8 circumgyration actions). Using the human simulated intelligent control (HSIC) theory based on sensor-motor intelligent schema, an intelligent control system for the double pendulum robot which has the structure of multi controllers and multi control modes is designed. A quasi-equivalent modeling method and an improved genetic algorithm are adopted for the accurate parameters identification of the double pendulum model and the optimization of numerous characteristic and control parameters in controller. By this way, not only the design and parameter optimization of complex HSIC controller are changed easily, but also a very difficult problem which is to transfer quickly from computer simulation of model to real-time control of physical system is solved successfully. Finally, we take the state transfer (swinging up) control from down-up to up-down as an example to explain the arbitrary transfer control between the four equilibrium states of the double pendulum, and show how to design controller with HSIC theory. The successful simulation and real-time control testified the validation of proposed theory and method.

Key words Double pendulum robot (DPR), transfer of equilibrium states, multi-mode control (MMC), quasi-equivalent modeling, improved genetic algorithm (IGA)

多级倒立摆系统具有非线性、多变量、强耦合、欠驱动、自不稳定等复杂系统的特征, 其控制难度无止境. 因此, 在控制领域中, 该系统一直被视为典型的控制研究范例, 是一个经典而富有挑战性研究问题, 也是一个检验控制理论是否有效的实验平台. 一般而言, 对倒立摆的研究主要集中在三个方面, 即: 1) 在倒立平衡点的稳定控制; 2) 从悬垂平衡点到倒立平衡点的摆起倒立稳定控制; 3) 多级倒立摆摆杆

所有平衡状态之间任意相互转换的运动控制.

1) 早期的研究集中在摆倒立点的稳定控制问题上, 又称为多级倒立摆的稳定控制问题. 迄今为止, 已经成功实现了二级、三级甚至四级倒立摆系统在倒立点的稳定控制^[1-9]. 对于一级或者二级倒立摆, 通过在倒立点的线性化, 然后采用传统的 PD 控制, 就可以实现稳定控制; 然而要实现三级, 甚至四级倒立摆的稳定控制, 特别是实时稳定控制, 则必须采用相应的智能控制算法, 如自适应拟人智能控制^[6], 云控制^[7], 变论域模糊控制^[8], 滑模变结构控制^[9] 等.

2) 近期的研究热点集中在倒立摆系统摆杆自动摆起倒立并稳定的控制方面. 由于摆杆之间, 摆杆与控制载体 (机器人本体) 之间都是完全自由的连接, 因此这是一个典型的单驱动控制多个自由度的欠驱动控制问题. 并且整个运动是一个全非线性运动过程, 其控制难度很大. 对于一级倒立摆, 文献 [10-13] 运用基于能量控制的方法实现了小车单

收稿日期 2010-01-05 录用日期 2010-07-12
Manuscript received January 5, 2010; accepted July 12, 2010
国家自然科学基金 (60574076), 重庆市自然科学基金 (2009BB3233, 2009BB3386) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60574076), Natural Science Foundation of Chongqing (2009BB3233, 2009BB3386)
1. 重庆理工大学人工智能系统研究所 重庆 400054 2. 重庆大学智能自动化研究所 重庆 400044
1. Institute of Artificial Intelligence System, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054 2. Institute of Intelligent Automation, Chongqing University, Chongqing 400044

摆的摆起倒立稳定, 而文献 [14–17] 则研究了在力矩和轨道受限情况下单摆的摆起倒立控制. 在二级摆的情况下, 由于同一能量状态可能对应多个运动姿态, 单纯依靠能量控制难以获得良好的控制效果, 文献 [18–21] 应用仿人智能控制方法实现了二级倒立摆的摆起倒立控制; 而 Graichen 等^[22] 则将二级摆的摆起倒立过程视为微分方程的两点边值问题 (Boundary value problem, BVP), 并采用逆系统方法^[23] 求得理想轨迹和开环控制, 再沿理想轨迹逐点线性化进行闭环控制, 实现了二级倒立摆的摆起倒立实时控制. 美中不足的是此方法运算量较大且对模型的精确度要求较高. Zhong 等^[24] 则将能量控制与耗散系统^[25] 相结合, 在仿真系统中进行了有意义的探讨. 值得关注的是 Li 等^[26] 运用仿人智能控制的方法还成功地进行了小车三级摆系统自动摆起倒立控制的仿真研究.

3) 对于图 1 所示的双摆机器人系统而言, 两个自由连接摆杆之间可以组成四种不同的平衡状态 (图 2): 即两摆杆同时向下 (Down-Down) 的自稳定平衡状态和内杆向下 – 外杆向上 (Down-Up)、内杆向上 – 外杆向下 (Up-Down) 以及内杆向上 – 外杆向上 (Up-Up) 这三个自不稳定的、需要控制才能实现平衡的状态. 进而, 4 个平衡状态可以构成 12 个相互转换的运动动作和 8 个自旋绕转动动作 (参见图 2 与表 1). 如果控制的目标是准确控制这些平衡状态及其之间相互转换的运动过程, 并将这些平衡状态与相互转换的运动过程按照一定的先后顺序连接, 构成成套的杂技动作 (图 3), 显然, 仅靠控制机器人本体 (可移动小车或旋臂) 的运动, 要自主实现控制这两个自由连接摆杆完成上述成套杂技动作的难度可想而知. 文献 [27] 曾经对部分平衡态之间的转换进行了探讨, 但距离所有平衡态之间的任意转换, 特别是类似 (Down-Up) 至 (Up-Down) 这样的高难度

转换运动, 以及将这些转换运动连接起来构成成套的自主杂技动作, 还未见有报道.

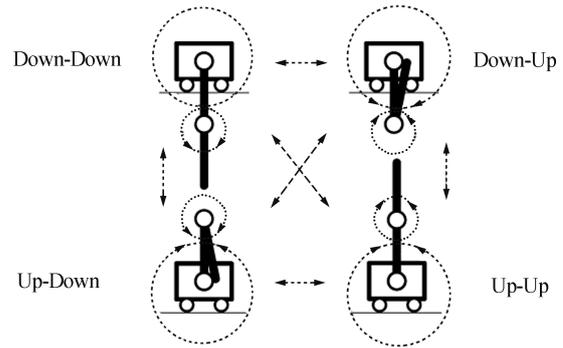


图 2 两摆杆的 4 种平衡状态及其相互转换

Fig. 2 The four equilibrium of double pendulum and their arbitrary transfer

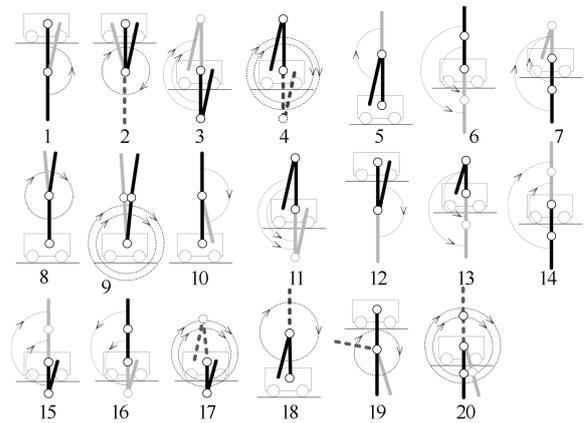


图 3 双摆机器人两摆杆构成的各种杂技动作例

Fig. 3 A all transfer movement of double pendulum

表 1 双摆机器人 4 个平衡状态的相互转换运动动作

Table 1 A all transfer movement of double pendulum

初态	Down-Down	Down-Up	Up-Down	Up-Up
未态				
Down-Down	DD2DD	DU2DD	UD2DD	UU2DD
Down-Up	DD2DU	DU2DU	UD2DU	UU2DU
Up-Down	DD2UD	DU2UD	UD2UD	UU2UD
Up-Up	DD2UU	DU2UU	UD2UU	UU2UU

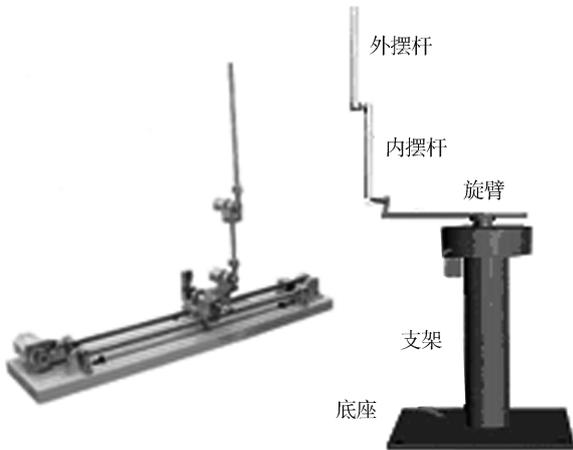


图 1 双摆机器人实验装置

Fig. 1 The device of double pendulum

1 双摆杂技机器人的物理结构与数学模型

一个典型的双摆杂技机器人由如图 1 所示的直线或环形二级摆装置构成. 对直线摆而言, 图中小车作为机器人的本体 (对环形摆而言, 图中旋转臂作为机器人本体), 由伺服电机驱动可在长度受限的轨道上来回运动; 两摆杆 (内杆与外杆) 之间, 摆杆与小车 (旋臂) 之间的关节自由连接无驱动; 关节的转动

角度,由安装在关节上的光电编码器测量,其物理结构示意如图 4 所示.

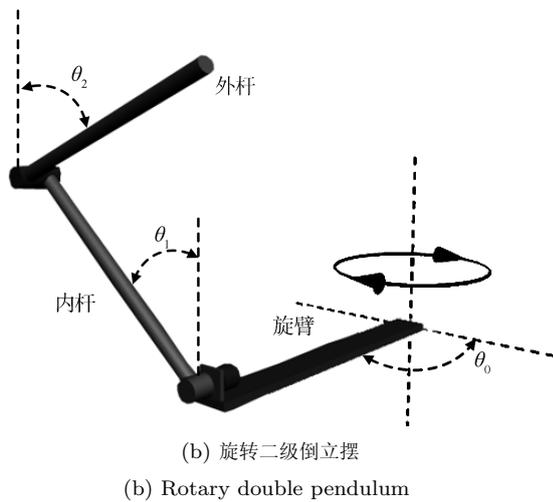
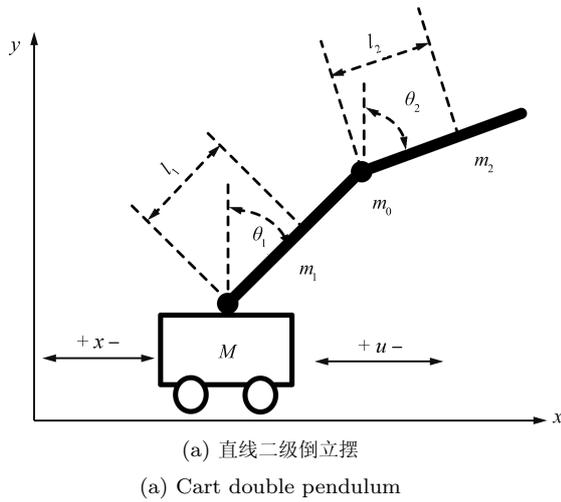


图 4 双摆机器人的物理结构

Fig. 4 The physical structure of double pendulum

对环形摆而言,伺服电机驱动的是旋臂,与直线摆不同的是没有轨道长度的限制.设广义变量 $q = (x, \theta_1, \theta_2)$, 有 $\dot{q} = (\dot{x}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)$, 根据动力学分析,运用拉格朗日方法,可导出双摆杂技机器人的动力学模型如下:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = F \quad (1)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -u \\ -(m_1 l_1 + m_2 L + m_0 L)g \sin \theta_1 \\ -m_2 g l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = M + m_1 + m_2 + m_0$$

$$A_{12} = A_{21} = (m_1 l_1 + m_2 L + m_0 L) \cos \theta_1$$

$$A_{13} = A_{31} = m_2 l_2 \cos \theta_2$$

$$A_{22} = m_1 l_1^2 + J_1 + m_2 L^2 + m_0 L^2$$

$$A_{33} = m_2 l_2^2 + J_2$$

$$C_{11} = f, \quad C_{21} = C_{31} = 0$$

$$C_{12} = -(m_1 l_1 + m_2 L + m_0 L) \dot{\theta}_1 \sin \theta_1$$

$$C_{13} = -m_2 l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2$$

$$C_{22} = c_1 + c_2, \quad C_{33} = c_2$$

$$C_{23} = m_2 L l_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2$$

$$C_{32} = -m_2 L l_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2$$

式中,参数 m_1, m_2 分别表示内、外摆杆的质量; M, m_0 分别表示小车及光电编码器传感器的质量; L 为内摆杆的长度, l_1, l_2 分别表示内摆杆和外摆杆质心到转轴的长度; θ_1, θ_2 为内、外摆杆的转角; c_0, c_1, c_2 表示小车及内、外摆杆转轴的滑动摩擦系数; J_1, J_2 表示内、外摆杆的转动惯量; u 表示控制输入量.显然这是一个非线性方程组,从结构上精确描述了双摆杂技机器人的动力学特性.

2 平衡状态间相互转换运动对控制的要求

双摆机器人的杂技动作实际上就是控制两摆杆平衡状态之间的相互转换.在转换的过程中,都要涉及到摆杆的自动摆起、倒下和旋转.摆杆的运动是大范围的非线性运动.在非线性运动之后,仍然要求要保持内摆杆、外摆杆或两摆杆的倒立稳定平衡.从重力场中能量的角度来看,摆杆之间平衡态的转换,就是两摆杆各自拥有势能的增减变化.在机器人本体控制摆杆运动的过程中,只能利用两摆杆的惯性作用,间接地控制两摆杆的运动做功使其能量精确地增减.由于两摆杆之间是自由连接,在运动过程中还必须协调控制摆杆与机器人本体之间,以及摆杆之间相对运动的角度、角速度,即始终需要准确控制两摆杆的运动姿态,才能保证平衡态之间成功的转换.

以图 5 所示的动作 DU2UD 为例,机器人的初始状态是内杆向下、外杆向上 (Down-Up) 的动平衡状态.在驱动小车或者旋臂来回运动的过程中,在惯性的作用下,控制两摆杆来回摆动并逐渐摆起,最终达到内杆向上、外杆向下 (Up-Down) 的目标动平衡

状态.

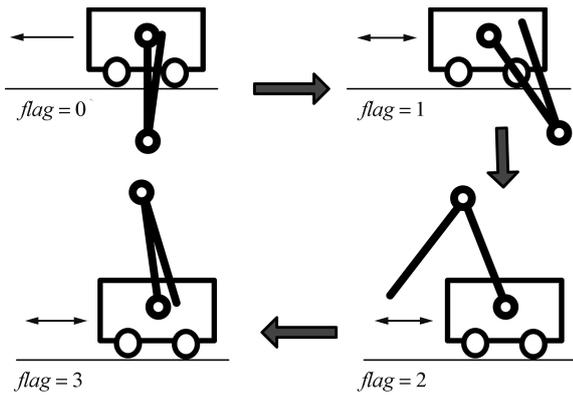


图 5 从 Down-Up 状态向 Up-Down 状态的转换

Fig. 5 Transfer from Down-Up to Up-Down

设两摆杆初始状态为 $(q_{du}, \dot{q}_{du}) = (0, \pi, 0, 0, 0, 0)$, 目标状态为 $(q_{ud}, \dot{q}_{ud}) = (0, 0, \pi, 0, 0, 0)$, 则两摆杆系统的能量在控制作用下的迁移可表示为

$$E_{du} = -m_1gl_1 - m_0gL - m_2g(L-l_2) \rightarrow E_{ud} = m_1gl_1 + m_0gL + m_2g(L-l_2) \quad (2)$$

但在内杆起摆的过程中, 由于惯性、重力以及作用力与反作用力的作用, 内外摆杆之间始终存在着一定的相对运动. 因此, 两摆杆之间在整个平衡状态转移过程中, 在忽略摆杆间转动摩擦的情况下, 除应保持角动量守恒之外, 其相对位置角度和相对运动角速度将受到两摆杆同时摆起和保证最后能进入新目标动平衡状态的限制, 即必须满足以下条件:

$$(m_0 + m_1)\dot{\theta}_1 + m_2\dot{\theta}_2 = 0 \quad (3)$$

$$|\theta_1 - \theta_2| \leq \vartheta_k, \quad |\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2| \leq \omega_k \quad (4)$$

3 控制任务分解和阶段控制目标及其控制律的确定

控制双摆机器人完成成套的杂技动作, 是针对一个复杂对象完成多个复杂的控制任务. 依据基于动觉智能图式的仿人智能控制理论^[28-29], 首先将完成成套杂技动作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, 即

$$G(g_i, E_N, T_N) = F(g_1(x_1, x_2, \dots, x_n, t), \dots, g_N(x_1, x_2, \dots, x_n, t), E_N, T_N) \quad (5)$$

式中, $G \in \Sigma^N$ 表示总的控制任务, $x_j \in \Sigma^n$ 表示系统的第 j 个变量 (自由度), $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \in \Sigma^N$ 为第 i 个子控制任务, $E_N \in \Sigma^{n \times N}$ 为子控制任务的空间特征集, $T_N \in \Sigma^N$ 为子控制任务的时间特

征集, $F(\cdot)$ 表示关联各子控制任务之间的分层递阶结构.

例如, 设图 3 所规划的成套杂技动作为总的控制任务 $G(g_i, E_{12}, T_{12}) \in \Sigma^N$, 则图 5 所示的 DU2UD 动作相应的子任务为 $g_4(x, \theta_1, \theta_2, t)$, 其对控制的目标和限制由式 (2)~(4) 所决定. 从 DU 状态到 UD 状态的转换, 是一个复杂的欠驱动动力学过程. 动力学分析表明, 一个成功的 DU2UD 的运动过程需要经历图 5 所示的 4 个目标运动阶段, 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:

1) 启动控制阶段 $flag_0$: 初始状态 Down-Up 是一种自不稳定的动平衡状态, 它的平衡由如下施加在双摆机器人本体 (小车或旋臂) 上的控制律维持:

$$u_0 = k_{1du}e_x + k_{2du}\dot{e}_x + k_{3du}e_{\theta_{D1}} + k_{4du}\dot{e}_{\theta_{D1}} + k_{5du}e_{\theta_{U2}} + k_{6du}\dot{e}_{\theta_{U2}} + U_1 \quad (6)$$

式中, $e_x, e_{\theta_{D1}}, e_{\theta_{U2}}$ 分别表示双摆机器人本体的位移, 内摆杆与垂直向下为零点的角度误差, 外摆杆与以垂直向上为零点的角度误差; $k_{1du}, k_{2du}, k_{3du}, k_{4du}, k_{5du}, k_{6du}$ 分别表示位移、内摆杆和外摆杆稳摆控制的比例微分数.

要自主实现从 DU 状态到 UD 状态的转换, 首先需要在式 (6) 所示的控制律上叠加一个单方向的控制作用 U_1 , 打破原有的平衡. 因此本阶段的动力学控制目标就是打破平衡, 启动后面的摇起控制. 一旦满足切换条件 $|e_{\theta_{U2}}| < \theta_{C1}$, 就转入下一个控制阶段, 即 $flag = flag_1$, 其中 $e_{\theta_{U2}}$ 为外摆杆与垂直向上为零点的角度误差, θ_{C1} 为特征值. 启动控制的条件, 即两摆杆所处的特征状态为

$$|e_{\theta_{D1}}| < \delta_{D1} \cap |\dot{e}_{\theta_{D1}}| < \omega_{D1} \cap |e_{\theta_{U2}}| < \delta_{U2} \cap |\dot{e}_{\theta_{U2}}| < \omega_{U2} \cap |e_x| < \delta_x \cap |\dot{e}_x| < v_x \quad (7)$$

式中, $\delta_{D1}, \omega_{D1}, \delta_{U2}, \omega_{U2}, \delta_x, v_x$ 为判断双摆机器人及其两摆杆是否基本处于动平衡 (Down-Up) 状态的特征阈值, 它们均是一个很小的常数值.

2) 两摆同时摇起控制阶段 $flag_1$: 本阶段的任务是控制机器人本体, 通过摆杆的惯性运动, 间接驱动摆杆的摇起运动, 摆杆摇起是能量逐渐增加的过程, 需要施加如下正反馈的控制律:

$$u_1 = k_{3SU}e_{\theta_{D1}} + k_{4SU}\dot{e}_{\theta_{D1}} + k_{5SU}e_{\theta_{U2}} + k_{6SU}\dot{e}_{\theta_{U2}} \quad (8)$$

式中, $k_{3SU}, k_{4SU}, k_{5SU}, k_{6SU}$ 分别表示内摆杆和外摆杆摇起控制的比例系数和微分系数.

一旦满足切换条件 $|e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C2}$ 就结束当前的控制阶段, 转入下一个控制阶段, 即 $flag = flag_2$,

式中, $e_{\theta_{U1}}$ 为内摆杆与垂直向上为零点的角度误差, θ_{C2} 为特征值. 为确保后期稳摆目标的顺利实现, 两摆杆摇起过程的正反馈控制应受到式 (3) 和式 (4) 的约束. 摇起阶段的动力学控制目标是内摆杆摆起到达水平以上位置, 式 (8) 运行的条件, 即此时两摆杆运动处于特征状态:

$$|e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C2} \quad (9)$$

式中, $e_{\theta_{U1}}$ 为内摆杆与垂直向上为零点的角度误差, θ_{C2} 为角度误差特征阈值.

3) 内摆稳摆外摆运动受限控制阶段 $flag_2$: 当内摆杆摆起到达水平以上位置之后, 为使内摆杆继续向着倒立位置摆起, 并且到达时动能趋于零, 同时还要控制内外摆杆之间的夹角不要过大, 并且机器人本体的运动也不要偏离目标位置太大, 因此需要施加如下控制律:

$$u_2 = k_{1ud1}(e_x + \text{sgn}(\dot{e}_{\theta_{U2}})U_2) + k_{2ud1}\dot{e}_x + k_{3ud1}e_{\theta_{U1}} + k_{4ud1}\dot{e}_{\theta_{U1}} \quad (10)$$

式中, $k_{1ud1}, k_{2ud1}, k_{3ud1}, k_{4ud1}$ 分别为机器人本体位移和内摆杆垂直向上稳摆控制的比例和微分系数, U_2 为抑制内外摆杆之间的夹角过大的控制输入. 一旦满足切换条件 $|e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C2} \cap (|e_{\theta_{D2}}| < \theta_{C3} \cup |\dot{e}_{\theta_{D2}}| < \omega_{C1})$, 就结束当前的控制阶段, 转入下一个控制阶段, 即 $flag = flag_3$, 本阶段的控制目标是内摆杆接近倒立点, 同时外摆杆与内摆杆之间相对运动较小, 以便两摆杆同时进入稳摆阶段, 即式 (10) 运行的条件, 此时两摆杆运动处于特征状态:

$$|e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C2} \cap (|e_{\theta_{D2}}| > \theta_{C3} \cup |\dot{e}_{\theta_{D2}}| > \omega_{C1}) \quad (11)$$

式中, $e_{\theta_{D2}}$ 为外摆杆与垂直向下为零点的角度误差, θ_{C3}, ω_{C1} 分别为角度误差和角速度误差特征阈值.

4) 双摆 (Up-Down) 稳摆控制阶段 $flag_3$: 当两摆杆经历前三个阶段的控制, 到达 Up-Down 位置附近时, 将进入稳摆阶段. 本阶段的动力学控制目标是

Up-Down 这个新的自不稳定的动平衡状态, 它的平衡由如下施加在双摆机器人本体上的控制律实现:

$$u_3 = k_{1ud}e_x + k_{2ud}\dot{e}_x + k_{3ud}e_{\theta_{D1}} + k_{4ud}\dot{e}_{\theta_{D1}} + k_{5ud}e_{\theta_{U2}} + k_{6ud}\dot{e}_{\theta_{U2}} \quad (12)$$

式中, $k_{1ud}, k_{2ud}, k_{3ud}, k_{4ud}, k_{5ud}, k_{6ud}$ 分别表示位移、内摆杆和外摆杆稳摆控制的比例微分系数. 式 (12) 运行的条件, 即此时两摆杆运动进入稳摆阶段的特征状态为

$$|e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C2} \cap (|e_{\theta_{D2}}| < \theta_{C3} \cup |\dot{e}_{\theta_{D2}}| < \omega_{C1}) \quad (13)$$

综上所述, 整个 DU2UD 运动过程控制的控制结构, 即动觉智能图式可归纳为式 (14) (见本页下方).

4 模型参数的精确辨识与控制器参数的整定与优化

为确保以上设计的控制器能有效完成整个杂技运动过程的实时控制, 需要十分准确辨识式 (1) 中双摆机器人模型中的多个等效物理参数, 并由此整定并优化式 (14) 中, 特征模型的多个特征参数, 以及多模态控制器的多个控制参数. 显然, 若按照传统控制理论设计该控制器, 根本无法达到这样的要求. 基于动觉智能图式的仿人智能控制理论从“演化论”观点出发, 采用改进的遗传进化计算的方法^[31] 实现了对模型的参数的准确辨识, 并据此获得了精确模型. 进而, 运用改进的遗传进化算法实现了对式 (14) 中控制器多个参数的整定与优化, 很好地解决了从系统的仿真设计研究到实时控制的快速过渡问题.

由于传统遗传进化算法存在近亲繁殖、早熟以及收敛速度慢等缺陷, 难以有效实现上述准确辨识与参数优化的目标. 基于动觉智能图式的仿人智能控制理论融合动态混合编码, 从海明距离、可变精度交叉及混合变异操作、正交试验设计以及反馈式突变等方面对传统的遗传算法进行了改进.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_0 = k_{idu}e_x + k_{2du}\dot{e}_x + k_{3du}e_{\theta_{D1}} + k_{4du}\dot{e}_{\theta_{D1}} + k_{5du}e_{\theta_{U2}} + k_{6du}\dot{e}_{\theta_{U2}} + U_1, \\ |e_{\theta_{D1}}| < \delta_{D1} \cap |\dot{e}_{\theta_{D1}}| < \omega_{D1} \cap |e_{\theta_{U2}}| < \delta_{U2} \cap |\dot{e}_{\theta_{U2}}| < \omega_{U2} \cap |e_x| < \delta_x \cap |\dot{e}_x| < v_x \cap flag == flag_0 \\ u_1 = k_{3SU}e_{\theta_{D1}} + k_{4SU}\dot{e}_{\theta_{D1}} + k_{5SU}e_{\theta_{U2}} + k_{6SU}\dot{e}_{\theta_{U2}}, \\ |e_{\theta_{U2}}| < \theta_{C1} \cap |e_{\theta_{U1}}| > \theta_{C2} \cap flag == flag_1 \\ u_2 = k_{1ud1}(e_x + \text{sgn}(\dot{e}_{\theta_{U2}})U_2) + k_{2ud1}\dot{e}_x + k_{3ud1}e_{\theta_{U1}} + k_{4ud1}\dot{e}_{\theta_{U1}}, \\ |e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C2} \cap (|e_{\theta_{D2}}| > \theta_{C3} \cup |\dot{e}_{\theta_{D2}}| > \omega_{C1}) \cap flag == flag_2 \\ u_3 = k_{1ud}e_x + k_{2ud}\dot{e}_x + k_{3ud}e_{\theta_{D1}} + k_{4ud}\dot{e}_{\theta_{D1}} + k_{5ud}e_{\theta_{U2}} + k_{6ud}\dot{e}_{\theta_{U2}}, \\ |e_{\theta_{U1}}| < \theta_{C2} \cap (|e_{\theta_{D2}}| < \theta_{C3} \cup |\dot{e}_{\theta_{D2}}| < \omega_{C1}) \cap flag == flag_3 \end{array} \right. \quad (14)$$

4.1 改进的遗传进化算法

1) 混合编码产生初始种群

算法中染色体基因对应于解向量的参数, 种群由一定数量的染色体构成. 为提高编码精度, 保证初始种群的均衡分散性, 采用如下混合编码方式^[30]:

$$\begin{aligned} x &= \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \\ x_i &= l_i + \beta(u_i - l_i), \\ \beta &\in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, x 表示染色体, x_i 为染色体的第 i 个基因, u_i 和 l_i 分别表示第 i 个基因解空间的上限和下限, β 为一随机数且 $\beta \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$.

2) 可变精度交叉操作

为拓展解空间的精度, 算法中染色体实行单点切入的可变精度的交叉操作, 即父辈染色体 x 和 y 在第 i 个基因上进行交叉运算:

$$\begin{aligned} x' &= \{x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x'_i, y_{i+1}, \dots, y_N\} \\ y' &= \{y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, y'_i, x_{i+1}, \dots, x_N\} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $x'_i = x_i + \beta(y_i - x_i)$, $y'_i = l_i + \beta(u_i - l_i)$, 在不同的代中, 新基因 x'_i, y'_i 的值不同. 如果解向量中第 i 个基因经常被选择, 在搜索过程中第 i 个基因的精度就会被扩展.

3) 海明距离与交叉操作选择

两个染色体 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 和 $y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 的海明距离定义为

$$D_{\text{Haiming}}(x, y) = \sum_{i=1}^N d_i \quad (17)$$

其中, $d = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, $d_i = \begin{cases} 1, & x_i \neq y_i \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$.

依据上述定义, 若两个染色体的海明距离小于 2, 则在它们之间进行交叉操作将不会产生新的染色体. 因此, 为提高交叉操作的效率, 算法在操作时总是选择两个海明距离不小于 2 的染色体. 当两个染色体之间的海明距离小于 2 时, 则按下述方法产生一个新的染色体代替其中的一个染色体, 即: 若 $D_{\text{Haiming}}(x, y) = 1$, 且 $x_i \neq y_i$, 则随机选择一个交叉点 $j \neq i$, 有

$$\begin{aligned} x'_j &= l_j + \beta_1(u_j - l_j) \\ y'_j &= l_j + \beta_2(u_j - l_j) \end{aligned} \quad (18)$$

这里 u_i 和 l_i 分别表示第 i 个基因解空间的上限和下限, $\beta_1, \beta_2 \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$ 且 $\beta_1 \neq \beta_2$.

交叉操作时, 引入对海明距离的判断能够减少正交矩阵试验进行的次数. 随着种群的进化, 染色体

之间的海明距离会变得越来越小, 染色体之间的差异也变得越来越小. 由于正交矩阵试验只在两个染色体之间不同的部分中进行, 因此在某种程度上, 引入对海明距离的判断, 可大大减少正交矩阵试验进行的次数, 大大提高了遗传算法的效率, 尤其是在种群进化的后期更为明显.

4) 交叉操作的正交试验设计^[32]

为加快进化的进程, 对算法的交叉变异操作还采用了正交试验设计的方法. 该方法应用规格化的正交表, 处理多因素、多水平的试验, 并用普通的统计分析方法分析试验结果. 这是一种多因素、多水平、高效、经济的试验方法. 使用正交试验设计, 通过较少的试验可得到两先辈染色体的最优子孙, 即通过较少的试验次数可找到个体中参数的最优组合.

算法中使用了两水平的正交试验. 在安排正交表试验时, 如果正交表的列数 (列对应的因素即变量) 大于总的变量数, 则将多余变量数的列去掉. 列中每个因素有两个水平 (即变量的取值), 分别对应染色体中该变量的两个取值. 正交表的行则表示试验的次数. 按照正交表安排试验, 可用较少的试验次数对大量确定变量之间的组合关系进行研究, 找到这些确定变量之间的最优组合方式, 亦即通过较少的试验可得到两先辈染色体的最优子孙.

改进遗传算法进行交叉操作后, 每次运行有两个染色体被随机选择进行正交试验. 目的是找出每种因素中的最优或最好的水平 (即参数的取值). 一旦每一种因素的最优水平都被选择之后, 由这些最优水平就可组成一个最优染色体. 这样一来, 新一代子子孙中就有了最好或者接近最好函数值.

5) 混合变异

为避免算法早熟收敛, 算法中采用了两点变异和多点变异相结合的混合变异操作. 两种变异操作的执行以概率的方式进行选择. 其中, 多点变异操作源于管理学中的凸集理论, 操作中单个染色体的多个基因被随机地选择进行凸组合变异. 多点变异操作增强了变异的精细调节能力, 其与单点变异不同的是, 单个染色体的多个基因被选择进行凸组合的变异. 如果染色体 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k, \dots, x_N\}$ 的第 i 个基因和第 k 个基因被选择进行变异, 变异生成新的染色体 $x = \{x_1, x_2, \dots, x'_i, \dots, x'_k, \dots, x_N\}$, 其中两个基因 x'_i 和 x'_k 分别为

$$\begin{aligned} x'_i &= \beta x_i + (1 - \beta)x_k \\ x'_k &= (1 - \beta)x_i + \beta x_k \end{aligned} \quad (19)$$

式中, β 为随机数, $\beta \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$.

混合变异操作的结果增强了种群中基因的多样性, 有效避免了早熟收敛, 能保证算法搜索到最优的解空间.

6) 动态编码与反馈式突变相结合^[31]

动态编码是指动态地改变变量的解空间, 逐步明晰搜索范围, 在适当的时候, 动态地变化变量解空间的搜索范围, 可增强遗传算法的局部搜索能力. 但是简单的动态编码有可能导致种群的过早收敛, 使解陷入到局部最优. 反馈式突变操作采用随机生成的新个体代替在突变中被消灭的个体, 可以在大大提高种群多样性的同时保持种群大小的稳定. 因此, 将动态编码与反馈式突变相结合可从根本上克服种群的“早熟收敛”, 使解的范围更加接近全局最优点. 算法根据整个种群的适应度和最优个体的适应度之间的关系, 决定是否进行动态编码和反馈式突变. 这时整个种群的适应度由下式进行计算:

$$f_{\text{population}} = \frac{\sum_{i=0}^n f_i}{M \times f_{\text{optimal}}} \quad (20)$$

式中, f_{optimal} 表示种群中最优个体的适应度, f_i 表示种群中第 i 个个体的适应度, M 表示种群的大小.

动态编码生成染色体的具体算法如下:

$$y_i = \mu x_i + \nu x_i \quad (21)$$

式中, y_i 是动态编码产生染色体的第 i 个基因, x_i 为种群中最优个体的第 i 个基因, μ 和 ν 均为小于 1 的常数.

7) 适应度函数的选取

适应度函数的选取在遗传算法中很重要, 它决定了遗传算法优化搜索的性能. 因此在确定适应度函数之前, 研究给定问题 $E(Z)$ 的变化规律非常必要. “适者生存”是自然选择的基本规律, 算法中表现为适应度高的个体生存概率大. 但对群体而言, 却有些复杂的情况, 例如, 算法初期, 异常的个体可能引起早熟收敛, 算法中后期, 个体间差距不大, 可能使搜索成为随机漫游. 为解决上述问题, 算法对适应度函数值作适当的调整. 假设求取最小值 $E(Z)$, 借鉴信号处理中信噪比的概念, 将适应度函数修改为

$$\begin{cases} H(Z) = E(Z), & \text{若 } E(Z) \leq M \\ H(Z) = M, & \text{若 } E(Z) > M \end{cases} \quad (22)$$

$$f(Z) = \delta - 10 \lg H(Z) \quad (23)$$

式中, M 是一个比较大的正实常数, δ 也是一个正的实常数. 因此, 给 $H(Z)$ 值赋予一个较大的值, 也就是给它们一个限幅的“生存”机会. 在此, 常数 δ 实际上是一个调控因子, 它既保证适应度函数的值总为正; 又可调控较差染色体被选择的概率. 因此, 整个优化问题由:

$$\max f(Z), \quad Z \in [L, U] \quad (24)$$

所定义, 式中 U 和 L 是变量 Z 取值范围的上下限.

8) 算法描述

归纳上述综合的改进, 则改进后的遗传算法可描述如下^[31]:

步骤 1. 采用混合编码的方法产生初始的可行解.

步骤 2. 计算种群中个体的适应度, 并按适应度降序排列种群.

步骤 3. 计算种群的适应度 $fit_{\text{population}}$. 如果 $f_{\text{population}} > \alpha$ 且 $f_{\text{optimal}} > \sigma$, 则进行动态编码与反馈式突变相结合的突变; 否则进行普通的反馈式变异.

步骤 4. 选择操作. 使用轮盘赌的方法, 选择 2 个不同的染色体.

步骤 5. 可变精度的交叉操作.

步骤 6. 对交叉过后的两个染色体进行正交矩阵试验, 产生一个最优的子孙.

步骤 7. 混合变异. 由变异率 P_m 决定变异的可能性.

步骤 8. 重复步骤 5~7, 产生 $M \times P_c/2$ 个新的子孙.

步骤 9. 将先辈种群和后代种群混合到一起, 按照适应度降序排列整个种群.

步骤 10. 选择 M 个较好个体作为下一代的先辈种群.

步骤 11. 满足终止条件算法终止, 否则重复步骤 3~10.

4.2 模型参数辨识的进化计算^[33]

双摆杂技机器人的动力学模型如式 (1) 所示, 其参数辨识就是在已知双摆机器人模型动力学参数取值范围的基础上, 寻找到一组动力学参数, 使得仿真模型的动力学特性能够较好地与实际对象的动力学特性一致. 如果考虑机器人本体 (小车或旋臂) 不参与运动时, 以模型仿真计算与真实自由响应曲线之间误差的平方和作为评价标准, 参数的优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \min E(Z), \quad Z \in [L, U] \\ E(Z) = \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^n (\theta_i(m) - \hat{\theta}_i(m))^2 \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $Z = (m_1, m_2, m_3, l_1, l_2, J_1, J_2, c_1, c_2)$ 表示待辨识的动力学参数, $\theta_i(m)$, $\hat{\theta}_i(m)$ 分别表示真实系统与仿真系统第 i 摆杆在时刻 m 的角度和角速度, $[L, U]$ 定义了参数 Z 的可行解空间.

在数值仿真试验中, 我们选择种群大小为 200, 交叉率 P_c 为 0.1, 变异率 P_m 为 0.02, 进化代数 1000, $\alpha = 0.95$, $\sigma = 5$, $\mu = 0.95$, $\nu = 0.10$, $M =$

1 000, $\delta = 32$; 仿真时间为 10 s, 步长为 0.005 s, 采用的算法是四阶龙格-库塔法.

双摆机器人动力学参数的取值范围为: m_1, m_2, m_0 为 $[0.5Z_1, 1.2Z_2]$, l_1 为 $[0.18, 0.36]$, l_2 为 $[0.12, 0.22]$, J_1, J_2 为 $[0.5Z_2, 2.0Z_2]$, c_1, c_2 为 $[0.2Z_3, 5Z_3]$, 其中, $Z_1 = [0.108, 0.108, 0.208]$, $Z_2 = [0.00233, 0.00133]$, $Z_3 = [0.007056, 0.003056]$.

表 2 是采用改进遗传算法进行动力学参数辨识获得的一些试验结果, 最优个体的进化曲线如图 6 所示. 用表 2 中最后一组动力学参数进行两摆杆自由运动数值仿真实验, 仿真结果与实物运动相应的对比曲线如图 7 和图 8 所示, 由图可知两条曲线基本重合.

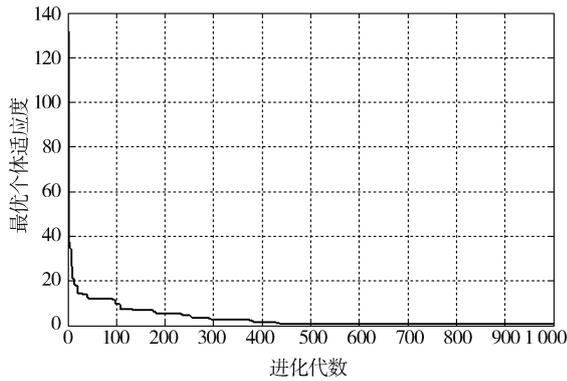


图 6 最优个体 $H(Z)$ 的进化曲线
Fig. 6 The evolutionary curve of optimal individual $H(Z)$

图 6 中进化曲线收敛较慢的原因有两个: 1) 每次交叉、变异操作产生的新子孙较少; 2) 其中较差个体有更多“生存机会”. 但是在某种程度上说, 这两种改进都能增强种群中基因的多样性, 能够使进化向更深层次的方向进行. 采用混合编码, 生成的初始种群质量高, 变精度的交叉操作又能够在更高精度的解空间中搜索可行解, 加之, 适应度函数的适当

选取可更客观合理地评价染色体的优劣, 因此能够找到精度更高、误差更小的可行解.

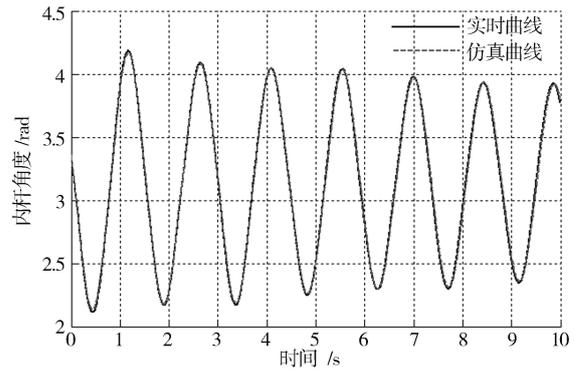


图 7 内杆的仿真结果与实物对比曲线
Fig. 7 The contrast curves of inner rod between simulation and realtime

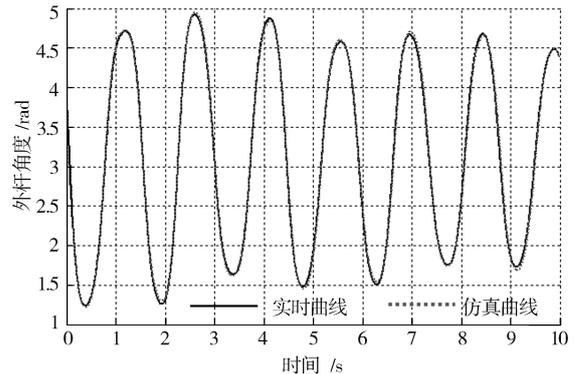


图 8 外杆的仿真结果与实物对比曲线
Fig. 8 The contrast curves of outer rod between simulation and realtime

4.3 控制器参数整定与优化的进化计算

就 DU2UD 动作而言, 动作整个运动过程的仿人智能控制器结构如式 (14) 所示, 其中包含了众多的控制模态切换特征参数以及控制模态参数, 这些特

表 2 通过改进遗传算法进行动力学参数辨识的一些试验结果

Table 2 The results of kinetics parameters identification through improved genetic algorithm

	m_1	m_2	m_0	l_1	l_2	J_1	J_2	c_1	c_2	$H(Z)$
1	0.08424	0.09180	0.19136	0.28800	0.19000	0.000665	0.000665	0.0014112	0.00501	131.88
2	0.12204	0.09180	0.23504	0.36000	0.19000	0.000665	0.000665	0.0014112	0.00354	37.46
3	0.06156	0.07668	0.23504	0.22320	0.19000	0.000665	0.000798	0.0014112	0.00352	20.87
4	0.12960	0.103896	0.24960	0.28800	0.19000	0.000665	0.0011305	0.0014112	0.00352	11.69
5	0.117504	0.103896	0.24960	0.25560	0.19000	0.000665	0.0011305	0.003782	0.00208	6.69
6	0.1208818	0.1007578	0.24960	0.19800	0.19000	0.0008485	0.0010640	0.0041546	0.00061	3.028
7	0.1212061	0.1020816	0.24781	0.21600	0.19000	0.0008086	0.0011305	0.0041546	0.00109	2.56
8	0.1212061	0.1020816	0.24781	0.21600	0.19000	0.0008609	0.0011305	0.0047981	0.00074	1.47
9	0.12960	0.1006565	0.24960	0.19800	0.197657	0.0008039	0.0010278	0.0051779	0.00062	0.75
10	0.12960	0.1001231	0.24065	0.198515	0.19625	0.000665	0.001064	0.0051383	0.00061	0.68

4.4 实时控制实验

根据第 3 节对二级摆从 Down-Up 到 Up-Down 平衡状态转换控制的任务分解, 以及对阶段控制目标和控制律的分析与设计, 确定了如式 (14) 所示的控制规律. 本文采用 C++ 语言编程实现了该控制器, 并在如图 11 所示的拟人形双摆杂机器人装置上进行了成功的实时控制. 实时控制器中的各参数, 直接采用在仿真系统中使用改进遗传算法整定优化后的取值 (如表 3 所示). 图 12 显示了拟人形双摆杂机器人旋臂和各摆杆的运行状态曲线图, 图 11 为其实时控制过程的分时视频截图. 该拟人形双摆杂机器人的控制环境为: 摆杆角度编码器精度 600 P/R, 交流伺服电机编码器精度 2 500 P/R, 编程环境 VC 6.0, 运行环境 P4 2.66 G, Windows XP, 控制周期 0.005 秒.

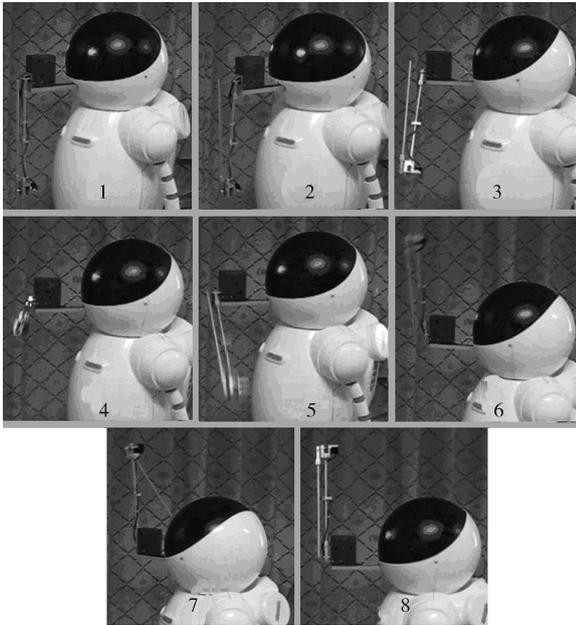
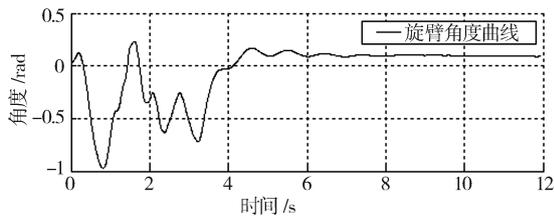


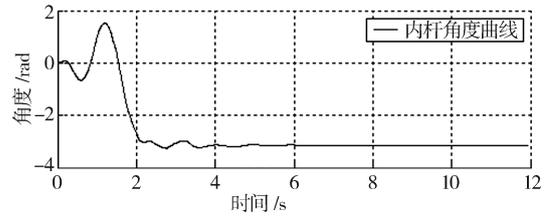
图 11 DU2UD 实时控制视频截图

Fig. 11 The pictures from realtime control video of DU2UD



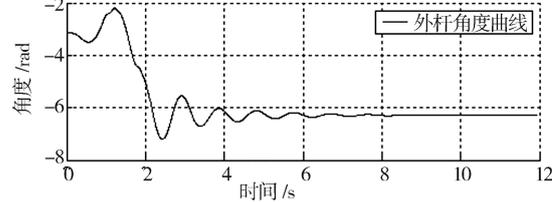
(a) 旋臂角度曲线

(a) Angle of rotary arm



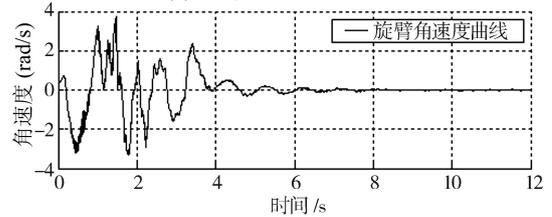
(b) 内杆角度曲线

(b) Angle of inner rod



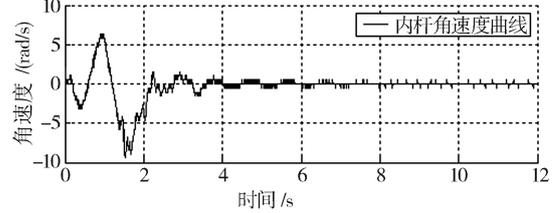
(c) 外杆角度曲线

(c) Angle of outer rod



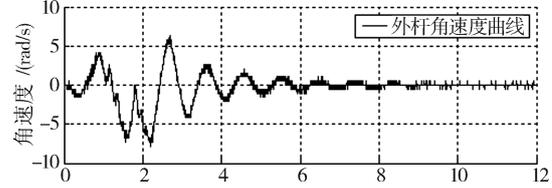
(d) 旋臂角速度曲线

(d) Angular velocity of rotary arm



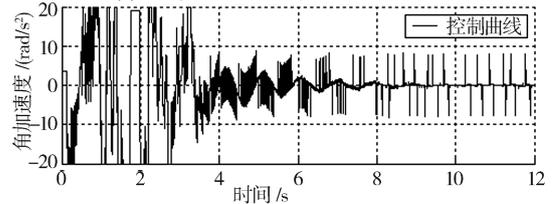
(e) 内杆角速度曲线

(e) Angular velocity of inner rod



(f) 外杆角速度曲线

(f) Angular velocity of outer rod



(g) 控制量曲线

(g) The curve of control value

图 12 DU2UD 实时控制曲线图

Fig. 12 The realtime control curves of DU2UD

5 结论

采用仿人智能控制方法, 完全实现了双摆杂技机器人(包括直线二级倒立摆和旋转二级倒立摆)两摆杆四个平衡状态之间的任意转换运动控制以及平衡态自身的回环控制. 先后运用改进的遗传算法完成了倒立摆系统的“类等效”仿真模型的建立, 以及对控制器中众多特征与控制参数的整定与优化. 本文以 Down-Up 平衡态到 Up-Down 平衡态的转换控制为例, 说明了仿人智能控制器的分析、设计与优化的过程, 仿真与实时控制实验表明了这套方法的有效性. 由于“类等效”模型精确模拟了双摆机器人的动力学特性, 在仿真设计平台中设计的结果, 基本可以直接用于实时控制, 从而大大缩短了从仿真研究到工程实现的进程. 运用同样的流程, 作者在较短的时间内成功完成了其他状态之间的转换运动控制, 并由这些运动组成了各种系列的成套顶双杆杂技动作, 实现了图 11 所示拟人形双摆杂技机器人的产品开发, 且其控制技术与方法已正式获得国家发明专利授权.

References

- Hung T H, Yeh M F, Lu H C. A PI-like fuzzy controller implementation for the inverted pendulum system. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Processing System. Beijing, China: IEEE, 1997. 218–222
- Watts J W. Control of an inverted pendulum. In: Proceedings of the ASEE Annual Conference. Salt Lake City, USA: ASEE, 1984. 706–710
- Mori S, Nishihara H, Furuta K. Control of unstable mechanical system: control of pendulum. *International Journal of Control*, 1976, **23**(5): 673–692
- Furuta K, Kajiwara H, Kosuge K. Digital control of a double inverted pendulum on an inclined rail. *International Journal of Control*, 1980, **32**(5): 907–924
- Furuta K, Ochia T, Ono N. Attitude control of a triple inverted inverted pendulum. *International Journal of Control*, 1984, **39**(6): 1351–1365
- Yang Ya-Wei, Zhang Ming-Lian. The stability of numerical control of triple inverted pendulum. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2000, **26**(3): 311–314
(杨亚伟, 张明廉. 三级倒立摆的数控稳定. 北京航空航天大学学报, 2000, **26**(3): 311–314)
- Li De-Yi. The cloud control of triple inverted pendulum and its dynamic balance mode. *Engineering Sciences*, 1999, **1**(2): 41–46
(李德毅. 三级倒立摆的云控制方法及动平衡模式. 中国工程科学, 1999, **1**(2): 41–46)
- Li Hong-Xing, Miao Zhi-Hong, Wang Jia-Yin. The adaptive fuzzy control of fourfold inverted pendulum based on variable universe. *Science in China (Series E)*, 2002, **32**(1): 65–75
(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. 中国科学 (E 辑), 2002, **32**(1): 65–75)
- Wang Peng-Hu, Li Xiao-Bing, Fu Guo-Qing, Wang Qiang. The full process variable structure control of 3-stage system. *Machinery Design and Manufacture*, 2009, (7): 127–129
(王鹏虎, 李小兵, 付国庆, 王强. 三级倒立摆系统全程滑模变结构控制. 机械设计与制造, 2009, (7): 127–129)
- Astrom K J, Furuta K. Swinging up a pendulum by energy control. In: Proceedings of the 13th World Congress. San Francisco, USA: IFAC, 1996. 715–720
- Muskinja N, Tovornik B. Swinging up and stabilization of a real inverted pendulum. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, **53**(2): 631–639
- Rubi J, Rubio A, Avello A. Swing-up control problem for a self-erecting double inverted pendulum. *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2002, **149**(2): 169–175
- Chug C C, Hauser J. Nonlinear control of a swinging pendulum. *Automatica*, 1995, **31**(6): 851–862
- Li Z S, Chen Q C, Li X M, Inooka H. Human simulating intelligent control and its application to swinging-up of cart-pendulum. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. Sendai, Japan: IEEE, 1997. 218–223
- Li Zu-Shu. Swing-up a pendulum with limited torque: the application of human simulating intelligent control on nonlinear system. *Control Theory and Applications*, 1999, **16**(2): 225–229
(李祖枢. 力矩受限单摆的摆起倒立控制 — 仿人智能控制在非线性系统的应用. 控制理论与应用, 1999, **16**(2): 225–229)
- Yang J H, Shim S Y, Seo J H, Lee Y S. Swing-up control for an inverted pendulum with restricted cart rail length. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, **7**(4): 674–680
- Park M S, Chwa D Y. Swing-up and stabilization control of inverted-pendulum systems via coupled sliding-mode control method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(9): 3541–3555
- Li Zu-Shu, Wang Yu-Xin, Tan Zhi, Zhang Hua, Wen Yong-Lin. Swing-up and handstand control of cart double pendulum system and experiment analysis. In: Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, China: IEEE, 2004. 2360–2364
(李祖枢, 王育新, 谭智, 张华, 温永玲. 小车二级摆的摆起倒立控制与实践. 第 5 届全球智能控制与自动化大会. 杭州, 中国, 2004. 2360–2364)
- Li Zhu-Shu, Tan Zhi, Wang Yu-Xin, Zhang Hua. The real-time swing-up and handstand control of cart double pendulum on inclined rail. In: Proceedings of the 23rd Chinese Control Conference. Wuxi, China: IEEE, 2004. 1645–1649
(李祖枢, 谭智, 王育新, 张华. 斜轨道上小车二级摆摆起倒立实时控制. 第 23 届中国控制会议. 无锡, 中国: IEEE, 2004. 1645–1649)
- Li Z S, Liang D W. Human simulated intelligent controller with fuzzy online self-tuning of parameters and its application to a cart-double pendulum. *Journal of Computers*, 2008, **3**(9): 67–76
- Liu T K, Chen C H, Li Z S, Chou J H. Method of inequalities-based multiobjective genetic algorithm for optimizing a cart-double-pendulum system. *International Journal of Automation and Computing*, 2009, **6**(1): 29–37

- 22 Graichen K, Treuer M, Zeitz M. Swing-up of the double pendulum on a cart by feedforward and feedback control with experimental validation. *Automatica*, 2007, **43**(1): 63–71
- 23 Devasia S, Chen D G, Paden B. Nonlinear inversion-based output tracking. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, **41**(7): 930–942
- 24 Zhong W, Rock H. Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications. Mecico City, Mecico: IEEE, 2001. 896–901
- 25 Byrnes C I, Isidori A, Willems J C. Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, **36**(11): 1228–1240
- 26 Li Z S, Dan Y H, Wen Y L, Zhang H, Zhang X C. Swinging-up and handstand control of cart triple-pendulum system based on HSIC. In: Proceedings of the 8th IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control. Cambridge, USA: ACTA Press, 2005. 497-015
- 27 Yamakita M, Iwashiro M, Sugahara Y, Furuta K. Robust swing up control of double pendulum. In: Proceedings of the American Control Conference. Washington D. C., USA: IEEE, 1995. 290–295
- 28 Li Zu-Shu. *Human Simulated Intelligent Control and Swing-up and Handstand Control of Multi Pendulum – Artificial Intelligence: Retrospection and Expectation*. Beijing: Science Press, 2006. 174–207
(李祖枢. 仿人智能控制与多级摆的摆起控制 — 人工智能: 回顾与展望. 北京: 科学出版社, 2006. 174–207)
- 29 Zhang Hua. Human Simulated Intelligent Movement Control of Multi Pendulum System Based on Senso-Motor Intelligent Schema [Ph. D. dissertation], Chongqing University, China, 2006
(张华. 基于动觉智能图式的多级摆系统仿人智能运动控制 [博士学位论文], 重庆大学, 中国, 2006)
- 30 Tsai J T, Liu T K, Chou J H. Hybrid taguchi-genetic algorithm for global numerical optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, **8**(4): 365–377
- 31 Li Zu-Shu, Zhang Hua, Gu Jian-Gong, Chen Gui-Qiang. Dynamic parameter identification of three-link acrobot on horizontal bar. *Control Theory and Applications*, 2008, **25**(2): 242–246, 252
(李祖枢, 张华, 古建功, 陈桂强. 3 关节单杠体操机器人的动力学参数辨识. 控制理论与应用, 2008, **25**(2): 242–246, 252)
- 32 Leung Y W, Wang Y P. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2001, **5**(1): 41–53
- 33 Chen Gui-Qiang. Parameter Optimization and Automatically Structural Design of Human Simulated Intelligent Controller [Master dissertation], Chongqing University, China, 2008
(陈桂强. 仿人智能控制器的参数优化与结构自动设计 [硕士学位论文], 重庆大学, 中国, 2008)



李祖枢 教授. 主要研究方向为计算智能、智能控制和机器人控制. 本文通信作者. E-mail: zushuli@vip.sina.com
(**LI Zu-Shu** Professor. His research interest covers computing intelligent, intelligent control, and robot control. Corresponding author of this paper.)



但远宏 重庆理工大学计算机科学与工程学院讲师, 重庆大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为智能控制. E-mail: cq.dan3@gmail.com

(**DAN Yuan-Hong** Lecturer at the College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Ph.D. candidate at College of Automation, Chongqing University. His main research interest is intelligent control.)



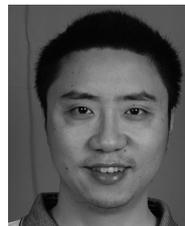
张小川 重庆理工大学计算机科学与工程学院教授. 主要研究方向为人工智能、智能机器人. E-mail: cqpczxc@163.com
(**ZHANG Xiao-Chuan** Professor at the College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology. His research interest covers artificial intelligence and intelligent

robot.)



肖琳 重庆大学自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为智能控制. E-mail: seareen@gmail.com

(**XIAO Lin** Master student at the College of Automation, Chongqing University. His main research interest is intelligent control.)



谭智 重庆理工大学计算机科学与工程学院讲师, 重庆大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为智能控制. E-mail: tanzhi@cqut.edu.cn

(**TAN Zhi** Lecturer at the College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Ph.D. candidate at the College of Automation, Chongqing University. His main research interest is intelligent control.)