

基于 AOCA 仿生学习模型的两轮机器人自主平衡学习研究

戴丽珍¹ 杨刚¹ 阮晓钢²

摘要 以两轮机器人的自主平衡学习控制为研究对象, 针对传统控制方法无法实现机器人类似人或动物的渐进学习过程, 依据斯金纳的操作条件反射理论建立了一种自治操作条件反射自动机 (Autonomous operant conditioning automaton, AOCA) 模型, 设计一种基于 AOCA 的仿生学习算法, 并进行机器人姿态平衡学习实验仿真研究. 实验结果表明, 基于 AOCA 的仿生学习方法能有效地实现机器人的自主平衡学习控制, 机器人系统的平衡能力在学习控制过程中自组织地渐进形成, 并得以发展和完善.

关键词 两轮机器人, 自主平衡, 仿生学, 操作条件反射, 自学习

引用格式 戴丽珍, 杨刚, 阮晓钢. 基于 AOCA 仿生学习模型的两轮机器人自主平衡学习研究. 自动化学报, 2014, 40(9): 1951–1957

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01951

Self-balance Learning of Two-wheeled Robot Based on Autonomous Operant Conditioning Automata

DAI Li-Zhen¹ YANG Gang¹ RUAN Xiao-Gang²

Abstract Since the gradual learning process like humans or animals of two-wheeled robot cannot be realized by the traditional control methods, an autonomous operant conditioning automaton (AOCA) is established based on Skinner's theory of operant conditioning for self-balance learning control of robots. A bionic learning algorithm based on AOCA is proposed to balance the two-wheeled robot. The corresponding simulation experiments for self-balance learning control of the two wheeled robot are given, in which the robot effectively realizes autonomous balance. Theoretical analysis and simulation show that the autonomous operant conditioning automata bionic learning model applied to the two-wheeled robot for autonomous balance learning control makes the robot progressive formation of self-organization, development and improvement of its balance.

Key words Two-wheeled robot, autonomous balance, bionics, operant conditioning, self-learning

Citation Dai Li-Zhen, Yang Gang, Ruan Xiao-Gang. Self-balance learning of two-wheeled robot based on autonomous operant conditioning automata. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(9): 1951–1957

机器人是多学科交叉发展的产物, 机器人的发展水平在一定程度上体现了一个国家的科技发展水平. 上世纪 60 年代末 70 年代初, Stanford Research Institute (SRI) 研制出具有逻辑推理能力和行为规划能力的移动式机器人 Shakey^[1], 被认为是第一个具有智能的机器人, 同时也被视为智能机器人学 (Intelligent robotics) 诞生的标志. 智能机器人学是

关于智能机器人设计原理和设计方法的科学, 是人工智能与机器人学紧密结合的产物. 智能机器人是机器人发展的方向和目标. 然而, 从某种意义上说, 缺乏认知能力的机器人不是真正意义上的智能机器人. 基于认知科学的认知机器人^[2–3] 是提高机器人智能的一种有效途径, 其前提是对认知机制的有效认识.

机器人是一个复杂系统, 其运动控制方法研究^[4–7] 有重要的理论研究价值和实际研究意义. 近年来, 机器人如何自主地和渐进地形成和发展自身求解问题的能力, 逐渐地从认知机器人学中凸显出来, 而提高机器人智能的有效途径之一是对认知机制进行有效的研究. 因此, 模拟人和动物的操作条件反射机制, 使机器人像人和动物一样通过自主认知习得运动行为控制技能, 是实现机器人认知学习的一种有效途径.

两轮自平衡系统由于其特定的结构和物理特性, 能够有效地检验自主平衡学习方法的优劣^[8–11]. 因此, 本文以两轮自平衡机器人为研究对象, 基于自治

收稿日期 2013-07-09 录用日期 2013-11-26
Manuscript received July 9, 2013; accepted November 26, 2013
国家自然科学基金项目 (61075110), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20101103110007), 江西省教育厅科技项目 (GJJ14402) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61075110), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20101103110007), and Scientific Technology Project of Jiangxi Provincial Department of Education (GJJ14402)

本文责任编辑 刘德荣

Recommended by Associate Editor LIU De-Rong

1. 华东交通大学电气与电子工程学院 南昌 330013 2. 北京工业大学电子信息与控制工程学院人工智能与机器人研究所 北京 100124

1. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013 2. Institute of Artificial Intelligence and Robots, College of Electronic and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124

操作条件反射自动机 (Autonomous operant conditioning automaton, AOCA)^[12] 研究机器人的自主平衡学习控制问题, 为进一步实现智能机器人的研发提供基础.

1 两轮机器人系统

本文主要研究基于 AOCA 的两轮机器人运动姿态平衡控制, 因此首先需要确定两轮机器人系统并实现其姿态平衡.

1.1 两轮机器人系统介绍

本文选用的两轮机器人系统是由北京工业大学人工智能与机器人研究所研制的一款两轮机器人^[13]: 仅有两个轮子且必须同轴安装并独立驱动, 通过电机驱动轮子实现自身平衡和轨迹运动. 如图 1 所示, 机器人系统采用了典型的层状结构: 底层为两个车轮, 由安装在机器人底部的两个同轴直流电机驱动; 中层用于放置电源、电机驱动器、电路板等电气系统的元器件等; 而上层则是机器人的机身和头部, 用来放置机器人的姿态传感器以及进一步设计中可能出现的其他部分.

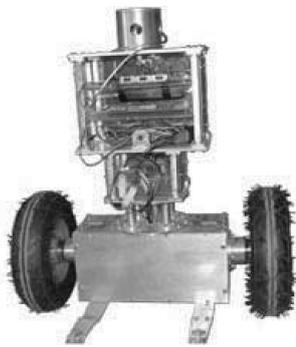


图 1 机器人实物
Fig.1 Robot

两轮机器人的传感系统、控制电机、DSP 处理器及 A/D、D/A 通道可以模拟一个类似于人或动物的感觉运动系统, 使机器人可以像人或动物一样自主地学习各种运动技能. 其中, 机器人的感知系统是由包括倾角仪、陀螺仪、编码器等在内的一系列传感器构成的, 可用来检测机器人的倾角、倾角速度以及左右轮的转动速度等, 并可据此计算得出机器人的位移等信息. 机器人首先经由感知系统采集数据, 并进行相应处理, 为制定有效的控制方案提供基础. 机器人的执行机构根据控制器输出的控制量在有效的时间内执行相应的动作, 实现机器人的有效运动控制. 而电源系统是保证整个电系统顺利运行的重要保障, 因此, 贯穿感知系统对信息的采集、处理过程以及执行机构对操作指令完成的始末.

1.2 两轮机器人的数学模型

研究基于 AOCA 的两轮机器人的自主平衡学

习, 首先需要建立“精确的”机器人模型^[13]. 在建立机器人模型时, 需要对机器人系统进行合理简化, 并作如下假设: 车轮、机器人身体为刚体; 左右两个车轮的几何尺寸完全一致; 左右两个车轮始终与地面保持接触, 运动时车轮不打滑并且只有滚动没有滑动; 不考虑机器人上身与轮子之间的滑动摩擦力; 忽略内部能量损耗, 例如轴承摩擦等.

机器人系统运动学模型如图 2 所示. 根据机器人的受力分析及各个物理参数, 可得机器人的运动学方程如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R \sin \varphi}{2} & \frac{R \sin \varphi}{2} \\ \frac{R \cos \varphi}{2} & \frac{R \cos \varphi}{2} \\ -\frac{R}{d} & \frac{R}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \\ v = \frac{\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l}{2} R \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为轮子半径, $\dot{\varphi}$ 为机器人转弯时的角速度, \dot{x}, \dot{y} 分别为机器人的线速度 v 在 x 轴和 y 轴上的分量, θ_l 和 θ_r 分别表示左右轮的角位移. 由式 (1) 所示的两轮机器人的运动学模型可以看出, 通过控制机器人左右两个车轮的速度, 就可以实现对机器人运行轨迹的控制. 当机器人在行进过程中转弯时, 其

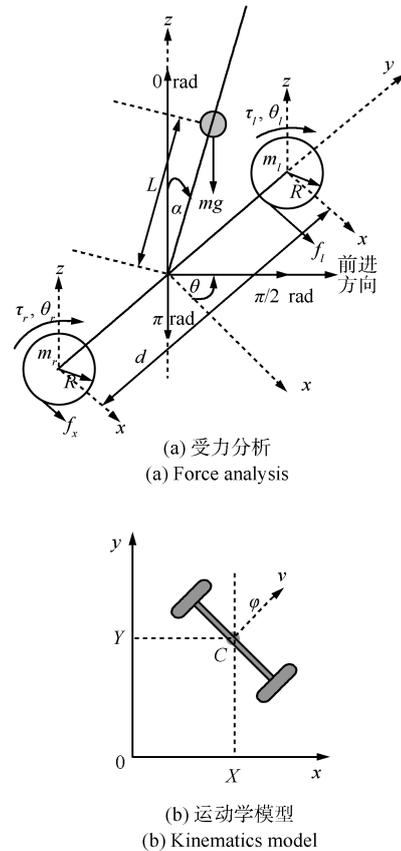


图 2 机器人受力分析及运动学模型示意图
Fig.2 Force analysis and kinematics model of robot

转弯半径为

$$r_s = \frac{v}{\dot{\varphi}} = \frac{d(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l)}{2(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)} \quad (2)$$

2 基于 AOCA 的两轮机器人运动平衡

2.1 两轮机器人的姿态平衡

根据两轮机器人的自身特点, 其平衡模式可以定义为如下几种: 自由平衡 (仅需保持机器人的姿态平衡)、定点平衡 (机器人保持平衡的前提下运动到给定的目标位置并继续保持平衡)、行走平衡 (机器人实现平衡控制后, 按照规定的轨迹实现特定的运动) 等模式. 本文主要挑选平衡模式中的自由平衡研究基于 AOCA 的姿态平衡学习问题.

两轮机器人姿态平衡控制的示意图如图 2(a) 所示. 定义两轮机器人直立向上的方向为 0 rad 方向, 定义机器人前进的方向为 $\pi/2$ rad 方向, 则 0 rad 的反方向为 π rad 方向, α 为机器人的倾角. 所谓姿态平衡控制, 即为当机器人处于平衡状态 ($\alpha = 0$ rad) 时, 给定一个初始倾角 α , 使机器人偏离平衡位置, 一旦传感器系统检测到机器人发生倾斜, 控制器就会根据测得的实际状态生成合适的力矩控制机器人的车轮运动, 使机器人向将要摔倒的方向运动, 从而保持机器人的姿态平衡.

在实际的机器人控制系统中, 机器人的倾角 α 以及倾斜角速度 $\dot{\alpha}$ 分别由倾角仪和陀螺仪测得, 左右轮的运动速度 v_L, v_R 则分别由左轮编码器和右轮编码器测得. 如图 2(a) 所示: 若机器人摔倒, 最终将会接触地面, 因此 $0 \leq \alpha \leq \pi/2$; 而在仿真系统中, 由于没有地面的限制, 机器人在 $\alpha = \pi/2$ 时, 仍会继续向下倾斜, 根据能量守恒最终机器人稳定在 $\alpha = \pi$ 这个平衡点附近.

2.2 自治操作条件反射自动机 (AOCA)

在学习自动机的理论框架中, 基于斯金纳的操作条件反射理论, 设计的具有自组织 (包括自学习和自适应) 功能的自治操作条件反射自动机^[12], 其结构如图 3 所示. 该自动机可表示为九元组的离散计算模型:

$$AOCA = \langle t, \Omega, S, \Gamma, \delta, \varepsilon, \eta, \psi, s_0 \rangle \quad (3)$$

其中

1) AOCA 的离散时间: $t \in \{0, 1, \dots, n_t\}$, $t = 0$ 为 AOCA 的起始时刻.

2) AOCA 的操作符号集合: $\Omega = \{\alpha_k | k = 1, 2, \dots, n_\Omega\}$, α_k 为 AOCA 的第 k 个操作符号.

3) AOCA 的状态集合: $S = \{s_i | i = 0, 1, 2, \dots, n_S\}$, s_i 为 AOCA 的第 i 个状态.

4) AOCA 的状态转移函数: $\delta : s(t) \times \alpha(t) \rightarrow s(t + 1)$.

5) AOCA 的操作规则集合: $\Gamma = \{r_{ik}(p) | p \in P; i \in \{0, 1, 2, \dots, n_S\}; k \in \{1, 2, \dots, n_\Omega\}\}$.

6) AOCA 的状态取向函数: $\varepsilon : S \rightarrow E = \{\varepsilon_i | i = 0, 1, 2, \dots, n_S\}$.

7) AOCA 的操作条件反射学习律: $\eta : \Gamma(t) \mapsto \Gamma(t + 1)$.

学习率用于调节操作规则 $r_{ik}(p) \in \Gamma$ 的实施概率 $p \in P$.

8) AOCA 的操作熵: $\psi : P \times E \rightarrow \mathbf{R}^+$.

9) AOCA 的起始状态: $s_0 = s(0) \in S$.

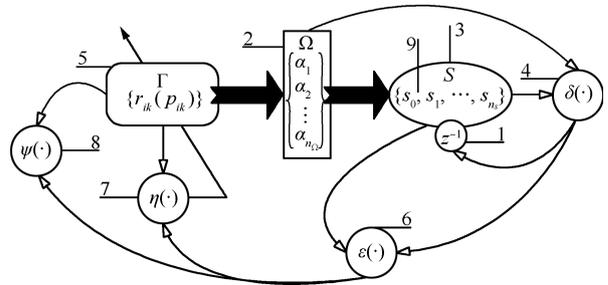


图 3 AOCA 结构示意图

Fig. 3 Structure schematic diagram of AOCA

AOCA 是一种具有认知发育功能的操作条件反射模型, 主要包括操作集合、状态集合、“条件-操作”映射集合、可观测的状态转移、取向单元、操作条件反射单元和操作熵单元. AOCA 的主要特征在于模拟了生物的操作条件反射机制, 具有仿生的自主发育功能, 有效地将仿生学、心理学和生物学应用于控制系统.

2.3 基于 AOCA 的两轮机器人运动平衡系统

两轮机器人的运动平衡首先是要通过控制左右轮电机的电压来维持机器人的姿态平衡, 即保证不摔倒, 同时实现对机器人运动的控制. 基于 AOCA 的两轮机器人的运动平衡结构示意图如图 4 所示, 其运动平衡控制系统如图 5 所示.

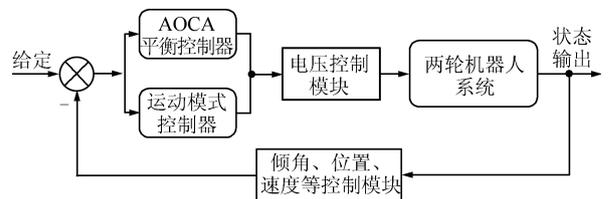


图 4 基于 AOCA 的两轮机器人运动平衡控制系统结构示意图

Fig. 4 Structure schematic diagram of robot's motion balancing control system based on AOCA

本文借助 Matlab-Simulink 搭建如图 6 所示的控制仿真系统, 机器人的一些实际状态是需要通过转换才能对应实际系统的物理意义. 图 6 中, “Robot Sys” 为机器人的数学模型, “Motion controller” 为基于经典控制方法的机器人运动控制器, “Balance

controller”为基于 AOCA 的姿态平衡控制器,均由 S-函数编写实现.两个控制器的控制量分别为 u_{MC} 和 u_{BC} ,实际上控制器的控制量为作用在左右轮驱动电机上的施加电压 u_L 和 u_R .机器人系统“RobotSys”的输出分别为左轮的偏转角速度 AngularRateL、偏转角 AngleL、右轮的偏转角速度 AngularRateR、偏转角 AngleR、机器人倾斜角速度 AlphaDot、机器人倾斜角 Alpha.机器人系统的输出经过“Transform”模块可以计算出机器人当前的位移和速度,如:根据机器人系统的前4个输出以及机器人车轮半径 R 可以计算出机器人左右轮的位移以及前进速度, $\text{AngleL} \times R$ 为左轮的位移, $\text{AngularRateL} \times R$ 为左轮的前进速度.其中, u_{BC} 用于保证机器人的自身平衡,是由基于 AOCA 设计的控制器实现的;而 u_{MC} 则用于实现机器人的特定运动控制,在仿真中采用经典的 PID/LQR 运动控制器.“AOCA balance controller”的输入为“RobotSys”的当前倾斜状态,而控制器的输出则为对机器人应该施加的操作“Operations”以及各种操作发生的概率“Probabilities”.其中,“Operations”最终对应于作用在左右轮电机上的电压,该电压用于保证机器人的姿态平衡;而“Probabilities”则是根据定义的可能操作的个数而定的,若定义有 n_Ω 个可供选择的操作,则“AOCA balance controller”对应输出 n_Ω 个概率.“Motion controller”的输入为经由“Transform”模块转换后得到的机器人当前的速度、位移和倾斜角等信息,而控制器的输出则为作用于左右轮电机的电压,该电压用于控制机器人完成指定的运动模式.“Switch”开关则用于实现自由平衡控制以及运动控制的组合,实现机器人不同运动模式下的平衡控制.

3 基于 AOCA 的两轮机器人运动平衡学习

两轮机器人的自由平衡运动是指在不限定机器

人行走轨迹、任由机器人自由行走的情况下保持机器人的姿态平衡.在姿态平衡控制研究中,初始状态时给定机器人一个倾角 α ,使机器人偏离平衡位置.机器人在自由行走的过程中,姿态平衡控制器根据机器人的当前状态给定一个作用于机器人左右轮电机的控制量(电压),使得机器人在运动的过程中保持自身的平衡.该运动模式下仅需 AOCA 平衡控制器作用于机器人系统,因不限定机器人的行走轨迹,因此控制器产生两个相同的控制信号作用于机器人,即 $u_L = u_R = u_{BC}$.断开图6所示的 Switch 开关,即可实现机器人的自由平衡运动控制.连接图6所示的 Switch 开关,即可实现机器人特定运行情况下的平衡运动控制,此时,作用于左右轮的控制信号分别为 $u_L = u_{BC} + u_{McL}$, $u_R = u_{BC} + u_{McR}$.其中, u_{McL} 和 u_{McR} 分别为运动控制器作用于机器人左右轮的控制信号.

为了验证基于 AOCA 的仿生学习模型在机器人复杂运动模式下的学习平衡能力,仿真实验中设定机器人运行轨迹如图7所示.该仿真研究中给定机器人初始倾角 $\alpha = 0.2 \text{ rad}$,左右轮的转角、角速度以及机器人倾角角速度均为0.在给机器人施加一个外力的情况下,机器人偏离平衡位置后,通过平衡控制器控制左右轮电机的电压,使机器人在运动中保持姿态平衡,即控制机器人使倾斜角 $\alpha = 0$,倾斜角速度 $\dot{\alpha} = 0$.因此,基于 AOCA 的自由平衡运动控制需要首先将机器人的倾斜角 α 和倾斜角速度 $\dot{\alpha}$ 进行离散化并构造状态集合 S .

假定控制系统的期望输出为 y ,若实际输出为 \hat{y} ,则系统的误差为 $e = y - \hat{y}$.AOCA 在离散时间 t 时刻的状态 s_i ,记为 $s_i(t)$,则在选择了操作行为 α_k 之后,系统在 $t + 1$ 时刻的状态转移为 $s_i(t + 1)$.定义 t 和 $t + 1$ 两个相邻时刻系统的误差增量 $\Delta e = e(t + 1) - e(t)$.因此,根据 AOCA 的定义可知,若 $e(t) < 0$,则说明选择“状态 $s_i(t)$ - 操作

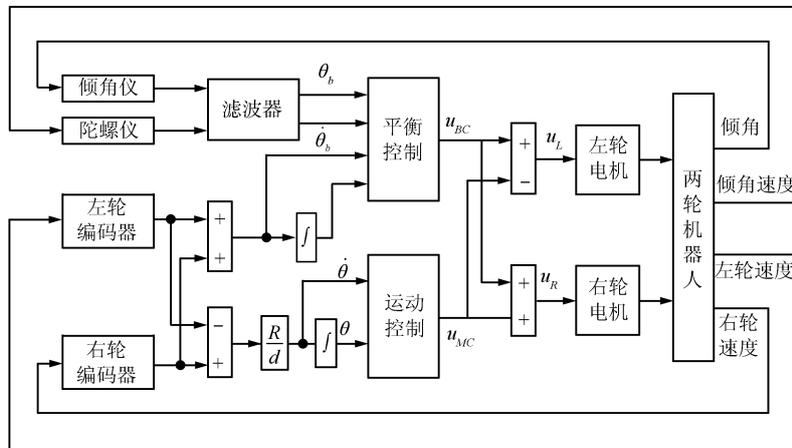


图5 两轮机器人运动平衡控制系统

Fig. 5 Motion balancing control system of robot

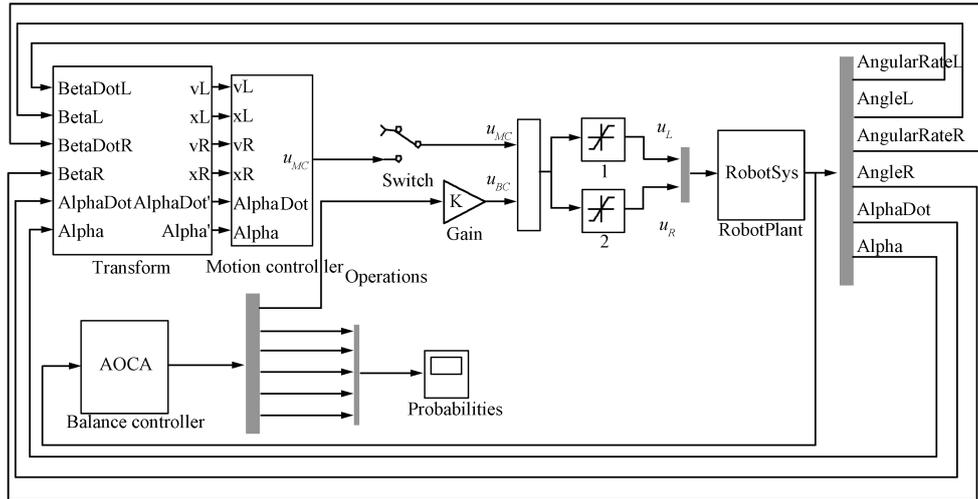


图 6 基于 AOCA 的两轮机器人运动平衡控制仿真结构

Fig. 6 Simulation structure schematic diagram of robot's motion balancing control system based on AOCA

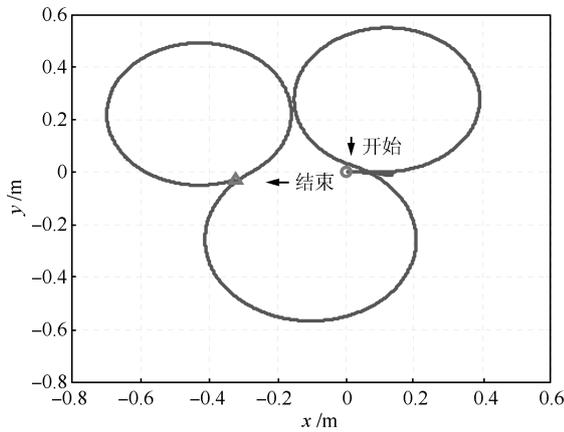


图 7 机器人的运行轨迹

Fig. 7 Running track of robot

α_k ”的取向性较大; 反之, 若 $e(t) \geq 0$, 则说明选择“状态 $s_i(t)$ - 操作 α_k ”的取向性应该降低. 根据控制系统的实际需求, AOCA 的取向函数定义为如下形式:

$$\varepsilon_{ik}(t) = \frac{1 - e^{-J_{ik}(t)}}{1 + e^{-J_{ik}(t)}} \quad (4)$$

其中, $J_{ik}(t) = \sqrt{\mu e_{ik}^2(t) + \eta \dot{e}_{ik}^2(t)}$ 为系统在 t 时刻的性能评价函数. 根据对应的控制要求选取系统的误差 e 和误差的微分 \dot{e} 的加权和构造 AOCA 的取向函数, 取法如下: $e = \sum_{n=1}^N \varphi_n e_n$, $\dot{e} = \sum_{n=1}^N \phi_n \dot{e}_n$. 其中, $n \in [1, N]$, N 为与控制目标相对应的控制变量的个数; φ_n, ϕ_n 为加权系数, 且有 $0 < \varphi_n, \phi_n < 1$, $\sum_{n=1}^N \varphi_n = 1$, $\sum_{n=1}^N \phi_n = 1$, φ_n, ϕ_n 表明第 n 个控制变量的误差 e_n 和误差的微分 \dot{e}_n 对取向函数的贡献比例; μ 和 η 为比例系数, 表明误差 e 和误差的微分 \dot{e} 在性能评价函数中所占

的比重. 当进行两轮机器人的姿态平衡控制时, 控制变量为机器人的倾角, 此时控制目标为 α 和 $\dot{\alpha}$ 均为 0.

3.1 实验参数设置

AOCA 的参数设置如下: 起始时刻为 $t = 0$, $\mu = 0.98$, $\eta = 0.8$, 状态集合由机器人的倾角 α 和倾角速度 $\dot{\alpha}$ 两组状态组成, 并根据其范围定义每组状态有 6 个元素组成, 将机器人的倾角 α 和倾角速度 $\dot{\alpha}$ 离散化为 6 个状态构造状态集合 S , 即 AOCA 中的 $n_S = 5$. 同时, 每个状态可供选择的操作数 $n_\Omega = 8$, 因此, 每个行为的初始概率 $p_{ik}(t) = 1/n_S = 1/8 = 0.125$, 通过操作熵的计算公式 (5) 可计算对应的初始操作熵 $\psi(0) = 3$, 并且根据熵的特性可知初始操作熵最大.

$$\psi(t) = - \sum_{i=0}^{n_S} p(s_i) \sum_{k=1}^{n_\Omega} p(\alpha_k | s_i) \log_2 p(\alpha_k | s_i) \quad (5)$$

3.2 仿真结果与分析

图 8 所示为采用 PID 控制方法实现机器人如图 7 所示的运行轨迹情况下左右轮的实际位移. 实验的目的是要在实现机器人姿态平衡的前提下完成特定运行轨迹, 研究基于 AOCA 的姿态平衡学习控制方法.

图 9 上图所示即为 AOCA 在不同时间点对应的操作概率输出, 图 9 下图所示为 0 ~ 1s 内 AOCA 实施各种操作的概率. 由图 10 上图所示的各个时刻对应的机器人倾角变化曲线可知, 基于 AOCA 的控制方案能够有效实现机器人的姿态平衡. 由图 10 下图所示机器人在 0 ~ 1s 内的运行情况可知, 学习至 0.6s 时机器人的倾斜角度已经可以控制在 2.5° 以内, 说明经过较短时间的学习, 机器人已经学得平

衡运动技能 (倾角误差控制在较小范围内), 充分体现了基于 AOCA 的自平衡学习方法的有效性.

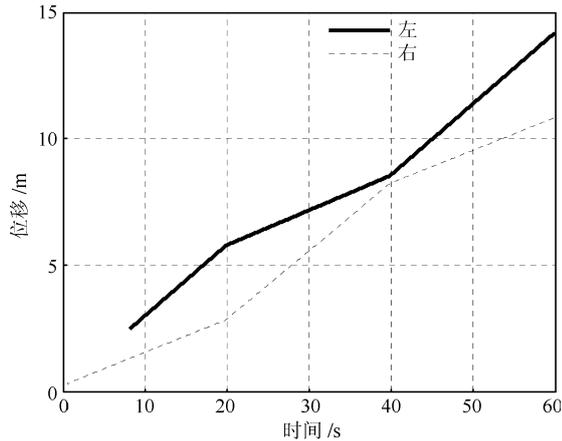


图 8 机器人的左右轮位移

Fig. 8 Displacements of left and right wheels

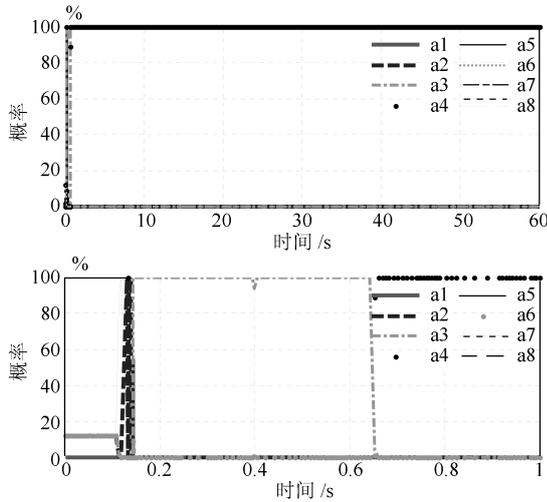


图 9 AOCA 各个操作的概率变化情况

Fig. 9 Change of probabilities of each operations of AOCA

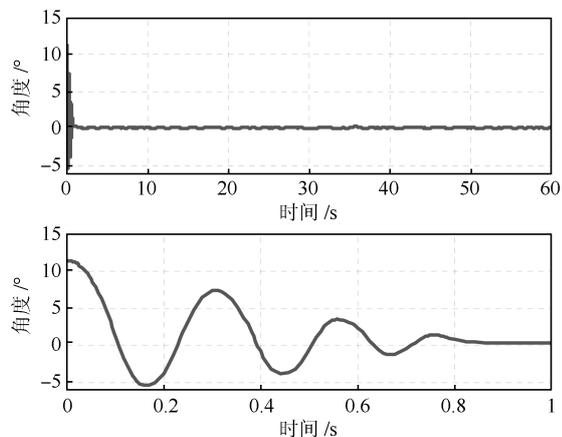


图 10 机器人倾斜角的变化情况

Fig. 10 Change of robot's inclination angle

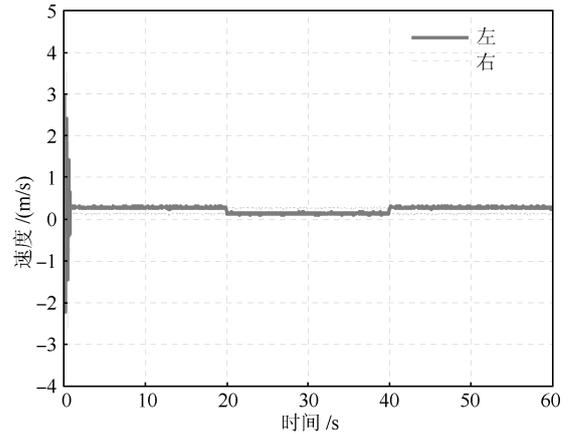


图 11 机器人的移动速度

Fig. 11 The velocity of robot

由图 11 所示的左右轮移动速度和图 12 所示的控制电压可知, 采用 AOCA 实现机器人的姿态平衡控制时, 能够到达稳定的状态. AOCA 实际所选操作电压的最大值和最小值分别为 23.69 V 和 -20.77 V, 与实际机器人系统的供电电压范围 [-24, +24] V 相符. 两轮自平衡机器人实现指定运动控制的前提是保证机身的平衡. 实验研究表明, 基于 AOCA 设计的认知学习方法能够保证两轮机器人自平衡学习能力的形成, 对于机器人的自主平衡控制研究具有重要的意义. 同时, 对于认知机器人行为认知能力的发育和形成, 也有重要的借鉴意义.

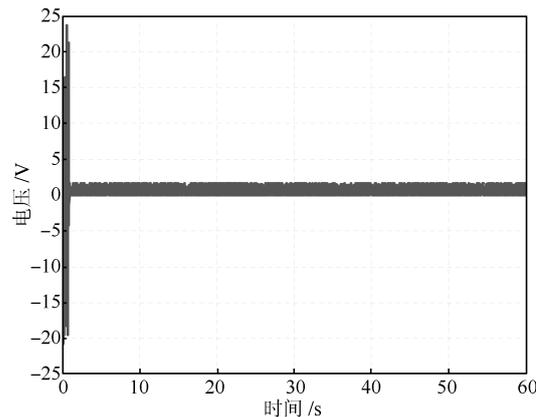


图 12 基于 AOCA 的姿态平衡控制器输出

Fig. 12 The output of attitude balancing controller based on AOCA

4 结论

为了使两轮机器人通过自学习渐进实现其运动姿态平衡, 基于 AOCA 设计了一种自主学习控制方法. 通过 AOCA 选择合适的操作并作用于左右轮电机, 保证机器人的姿态平衡, 并与机器人的运动控制模块一起, 实现机器人的运动平衡. 基于 AOCA 的姿态平衡控制器能够渐进实现两轮机器人的姿态平

衡, 证明了基于 AOCA 的自主学习控制方法的有效性. 基于 AOCA 的两轮机器人姿态平衡控制方案的实验成功, 为进一步研究机器人的自学习运动平衡控制提供了理论指导. 后续研究工作的重心将围绕基于 AOCA 的自主平衡运动学习控制开展, 即: 深入研究在凹凸不平的地面、草地、斜坡或存在障碍物等复杂环境中保证机器人在实现其姿态平衡的同时完成特定的运行任务, 从而进一步检验和改进基于 AOCA 的学习控制方案.

References

- 1 Raphael B. The robot "Shakey" and "His" successors. *Computers and People*, 1976, **25**(10): 7–21
- 2 Asada M, Hosoda K, Kuniyoshi Y, Ishiguro H, Inui T, Yoshikawa Y, Ogino M, Yoshida C. Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 2009, **1**(1): 12–34
- 3 Brooks R A. From earwigs to humans. *Robotics and Autonomous Systems*, 1997, **20**(2–4): 291–304
- 4 Xing Deng-Peng, Liu Xu. Multiple balance strategies for humanoid standing control. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2): 228–233
- 5 Tian Hui-Hui, Su Yu-Xin. Nonlinear decentralized repetitive control for global asymptotic tracking of robot manipulators. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1264–1271 (田慧慧, 苏玉鑫. 机器人系统非线性分散重复学习轨迹跟踪控制. *自动化学报*, 2011, **37**(10): 1264–1271)
- 6 Wang Zhi-Feng, Ma Shu-Gen, Li Bin, Wang Yue-Chao. Simulation and experimental study of an energy-based control method for the serpentine locomotion of a snake-like robot. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(5): 604–614 (王智锋, 马书根, 李斌, 王越超. 基于能量的蛇形机器人蜿蜒运动控制方法的仿真与实验研究. *自动化学报*, 2011, **37**(5): 604–614)
- 7 Xu Wen-Fu, Wang Xue-Qian, Xue Qiang, Liang Bin. Study on trajectory planning of dual-arm space robot keeping the base stabilized. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **38**(1): 69–80 (徐文福, 王学谦, 薛强, 梁斌. 保持基座稳定的双臂空间机器人轨迹规划研究. *自动化学报*, 2013, **38**(1): 69–80)
- 8 Zhao Jie, Wang Xiao-Yu, Qin Yong, Cai He-Hao. UKF-based optimal attitude estimation of two-wheeled self-balanced robots. *Robot*, 2006, **28**(6): 605–609 (赵杰, 王晓宇, 秦勇, 蔡鹤皋. 基于 UKF 的两轮自平衡机器人姿态最优估计研究. *机器人*, 2006, **28**(6): 605–609)
- 9 Li Z, Luo J. Adaptive robust dynamic balance and motion controls of mobile wheeled inverted pendulums. *IEEE*

Transactions on Control Systems Technology, 2009, **17**(1): 233–241

- 10 Li Z J, Zhang Y N. Robust adaptive motion/force control for wheeled inverted pendulums. *Automatica*, 2010, **46**(8): 1346–1353
- 11 Li Z J, Yang C G. Neural-adaptive output feedback control of a class of transportation vehicles based on wheeled inverted pendulum models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(6): 1583–1591
- 12 Ruan Xiao-Gang, Dai Li-Zhen, Yu Nai-Gong, Yu Jian-Jun. An autonomous operant conditioning automaton. *Control Theory and Applications*, 2012, **29**(11): 1452–1457 (阮晓钢, 戴丽珍, 于乃功, 于建均. 一种自治操作条件反射自动机控制理论与应用, 2012, **29**(11): 1452–1457)
- 13 Ruan Xiao-Gang, Cai Jian-Xian, Li Xin-Yuan, Zhao Jian-Wei. *Research and Design of Two-Wheeled Balancing Robot*. Beijing: Science Press Ltd., 2012. 80–120 (阮晓钢, 蔡建羨, 李欣源, 赵建伟. 两轮自平衡机器人的研究与设计. 北京: 科学出版社, 2012. 80–120)



戴丽珍 博士, 华东交通大学电气与电子工程学院讲师. 主要研究方向为人工智能与机器人技术.

E-mail: dr.alicedai@gmail.com

(**DAI Li-Zhen** Ph.D., lecturer at East China Jiaotong University. Her research interest covers artificial intelligence and intelligent robotics.)



杨刚 博士, 华东交通大学电气与电子工程学院讲师. 主要研究方向为复杂系统建模与控制, 神经网络技术. 本文通信作者.

E-mail: dr.hankyang@gmail.com

(**YANG Gang** Ph.D., lecturer at East China Jiaotong University. His research interest covers modelling and control of complex systems, artificial neural networks and applications. Corresponding author of this paper.)



阮晓钢 博士, 北京工业大学电子信息与控制工程学院人工智能与机器人研究所教授. 主要研究方向为人工智能与机器人. E-mail: adrxg@bjut.edu.cn

(**RUAN Xiao-Gang** Ph.D., professor at Beijing University of Technology. His research interest covers artificial intelligence and robots.)