

文章编号: 1001-0920(2011)03-0464-05

自行车机器人系统的稳定滑模控制

于秀丽, 魏世民, 郭 磊

(北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876)

摘 要: 基于拉格朗日方法建立自行车机器人动力学模型, 针对自行车机器人这一非线性欠驱动系统, 利用稳定滑模控制算法实现系统的稳定. 该方法首先从各个子系统中取出一个变量组合成一个中间变量; 然后从该中间变量出发构造滑模函数, 从滑模控制器设计的角度求取控制量, 保证中间变量在有限时间内收敛到平衡点, 从而保证系统状态收敛到收敛域内. 该方法能够保证自行车机器人系统的稳定性, 并在仿真实验中得到了验证.

关键词: 滑模控制; 欠驱动系统; 自行车机器人; 稳定性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Stable sliding mode control of bicycle robot system

YU Xiu-li, WEI Shi-min, GUO Lei

(School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China. Correspondent: YU Xiu-li, E-mail: alicexiuli@163.com)

Abstract: Dynamic model of the bicycle robot is made by using method based on Lagrangian, which can realize non-linear under-actuated system of bicycle robot stable by using stable sliding-mode method control. In this method, each variable which is gotten from every subsystem's state variables combines an interim variable. Then one sliding mode function is constructed according to the interim variable. By using the sliding mode control method, the total control law can be obtained, which guarantees that the equilibrium point is reachable in finite time. Then the system's state variables converge to equilibrium field. The stability of bicycle robot can be guaranteed by using this method and is verified in the simulation experiment.

Key words: sliding mode control; under-actuated systems; bicycle robot; stability

1 引 言

近年来, 各国研究人员对于自行车机器人的研究兴趣越来越浓厚, 其中大部分研究工作都是围绕自行车机器人动力学建模、提出新的控制算法两方面内容展开的. 文献[1]提出一种在高速运行状态下的自行车机器人动力学模型, 并使用经典控制理论进行了分析与综合, 显然这是由于高速运行时自行车机器人的非线性动力学模型很接近线性系统的缘故. Karl 等人^[2]提出了一些自行车机器人的动力学模型, 并对每个模型都设计了相应的控制律. Yasuhito Tanaka 等人^[3]用角动量平衡定理推导出了自行车机器人的一种非线性动力学模型, 并对该非线性系统进行了局部线性化, 使用经典控制理论分析、设计了控制系统. 然而, 自行车机器人被控对象动态特性往往表现出非线性、时变、大延迟和大惯性等特点, 线性化

处理后的系统误差偏大. 目前, 非线性控制理论的研究受到了控制理论界的空前关注. 其中滑模变结构控制(SMC)理论是上世纪 50 年代发展起来的一种控制方案, 并得到了充分、细致的研究^[4]. 孙德滨等人^[5,6]研究了一般非线性系统的变结构控制问题, 利用非线性变换将非线性系统化为可控正则型, 并提出了“趋近率”的概念. 此外, 变结构控制理论在机器人控制、飞行控制等领域已经取得了较为成功的应用^[7,8].

本文利用拉格朗日方法建立系统的动力学模型, 针对自行车机器人这一非线性欠驱动系统, 利用稳定滑模控制算法实现系统的稳定^[9]. 滑模控制方法从各个子系统中取出一个变量组合成一个中间变量, 然后从这个中间变量出发构造滑模函数, 从滑模控制器设计的角度求取控制量, 保证中间变量在有限时间内收

收稿日期: 2009-12-10; 修回日期: 2010-03-18.

基金项目: 北京邮电大学青年科研创新计划专项课题(2009RC0602); 中央高校基本科研业务费专项资金项目.

作者简介: 于秀丽(1975-), 女, 讲师, 博士生, 从事智能控制、机器人学等研究; 魏世民(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器人机构学、机器人虚拟设计等研究.

敛到平衡点, 从而保证系统状态收敛到收敛域内, 使自行车机器人这一非线性欠驱动系统得到有效控制.

2 自行车机器人系统的动力学模型

2.1 自行车机器人的理想化假设

本文中的自行车机器人是SISO模型, 只需考虑用前轮摆角产生的扭转力矩来维持受到微小扰动后自行车车体的平衡. 因此, 假设自行车平衡时以匀速率 V_0 前进, 在此过程中受到微小的扰动, 使车体偏离平衡位置. 将自行车各部分看作理想化模型: 前后2个车轮看作质心在车轮圆心的圆环, 连接前后轮的车架看作质量集中在其质心的质点^[10-11].

假设具体参数如下: 自行车前轮质量为 m_q , 半径为 r_q ; 后轮质量为 m_h , 半径为 r_h ; 车架质量(不包括电池)为 m_o , 其重心高度为 h_1 ; 车架质量(包括电池)为 m_j ; 前轮质心到车把转动轴的距离为 s ; 车体受到扰动后偏离铅直方向的角度为 β ; 电池质量为 m_d , 其重心高度为 h_2 . 为保持平衡, 需施加力矩 M 使车把向车体倾倒的方向转动角度 α . 具体示意图分别见图1和图2.

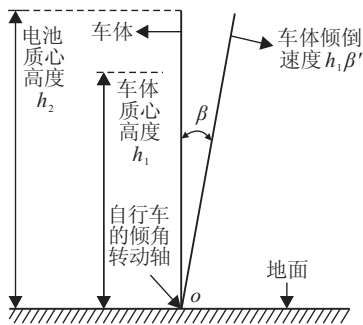


图1 车体后视等效图

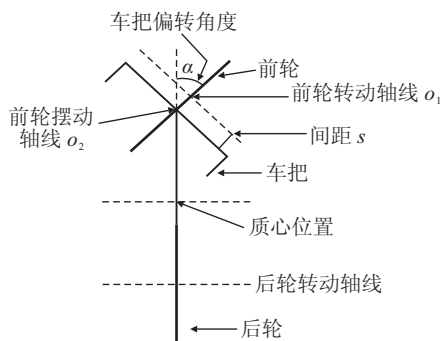


图2 车体俯视等效图

2.2 自行车机器人的运动分析

1) 前轮. 设前轮的质心速度为 V_q . 前轮的运动可看作: 质心以速度 $s\dot{\alpha}$ 绕前轮的转动轴转动, 转动惯量为 J_1 ; 以速度 $r_q\dot{\beta}$ 绕前轮着地点的前进方向转动, 转动惯量为 J_2 ; 以前进速度 V_0 绕前轮着地点与前进速度垂直方向的轴转动, 转动惯量为 J_3 . 由几何关系可知, 速度 $s\dot{\alpha}$ 与速度 $r_q\dot{\beta}$ 的夹角为 β , 且速度 V_0 的方向

垂直于速度 $s\dot{\alpha}$ 与速度 $r_q\dot{\beta}$ 所组成的平面. 则根据矢量合成定理, 可得

$$V_q^2 = V_0^2 + [(s\dot{\alpha})^2 + (r_q\dot{\beta})^2 + 2s\dot{\alpha}r_q\dot{\beta} \cos \beta],$$

前轮的动能表达式为

$$T_q = \frac{1}{2}m_qV_q^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\beta}^2 + \frac{1}{2}J_3\left(\frac{V_0}{r_q}\right)^2.$$

其中

$$J_1 = \frac{1}{2}m_qr_q^2, J_2 = \frac{1}{2}m_qr_q^2, J_3 = m_qr_q^2.$$

2) 后轮. 设后轮的质心速度为 V_h . 后轮的动作可看作: 质心以速度 $r_h\dot{\beta}$ 绕前轮着地点的前进方向转动, 转动惯量为 J_4 ; 以前进速度 V_0 绕后轮着地点与前进速度垂直方向的轴转动, 转动惯量为 J_5 . 由几何关系可知, 速度 V_0 的方向与速度 $r_h\dot{\beta}$ 的方向垂直. 则根据矢量合成定理, 可得

$$V_h^2 = V_0^2 + (r_h\dot{\beta})^2,$$

后轮的动能表达式为

$$T_h = \frac{1}{2}m_hV_h^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\beta}^2 + \frac{1}{2}J_5\left(\frac{V_0}{r_h}\right)^2.$$

其中

$$J_4 = \frac{1}{2}m_hr_h^2, J_5 = m_hr_h^2.$$

3) 车架. 设车架的质心速度为 V_j . 车架的运动可看作: 以前进速度 V_0 平动; 以速度 $h_1\dot{\beta}$ 绕前轮着地点的前进方向转动, 转动惯量为 J_6 , 且速度 V_0 的方向垂直于速度 $h_1\dot{\beta}$ 的方向. 则根据矢量合成定理, 可得

$$V_j^2 = V_0^2 + (h_1\dot{\beta})^2 + (s\dot{\alpha}p)^2 + 2h_1\dot{\beta}s\dot{\alpha}p \cos \beta,$$

车架的动能表达式为

$$T_j = \frac{1}{2}m_jV_j^2 + \frac{1}{2}J_6\dot{\beta}^2,$$

其中 $J_6 = m_jh_1^2$.

综上所述, 可得整个自行车机器人系统的总动能

$$T = T_q + T_h + T_j.$$

取地面为参考面, 则系统势能为

$$V = (m_qr_q + m_hr_h + m_o h_1 + m_d h_2)g \cos \beta.$$

2.3 自行车机器人的动力学方程

对于系统输入和输出的广义, 将由扰动引起的自行车车体倾倒的力看作重力在水平方向上的分力, 而维持车体平衡的力显然是扭转力矩. 因此

$$Q_\alpha = M = u,$$

$$Q_\beta = (m_qr_q + m_hr_h + m_o h_1 + m_d h_2)g \sin \beta.$$

根据拉格朗日方程, 有

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = M, \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} = \\ (m_qr_q + m_hr_h + m_o h_1 + m_d h_2)g \sin \beta. \end{cases} \quad (1)$$

将各参数代入, 可得系统的运动微分方程如下:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{2}m_q r_q^2 + m_q s^2 + m_j s^2 p^2 \right) \ddot{\alpha} + \\ (m_q r_q s + m_j h_1 s p) \ddot{\beta} \cos \beta - \\ (m_q r_q s + m_j h_1 s p) \dot{\beta}^2 \sin \beta = M, \\ \left(\frac{3}{2}m_q r_q^2 + \frac{3}{2}m_h r_h^2 + 2m_j h_1^2 \right) \ddot{\beta} + \\ (m_q s r_q + m_j h_1 s p) \ddot{\alpha} \cos \beta = \\ (m_q r_q + m_h r_h + m_o h_1 + m_d h_2) g \sin \beta. \end{cases} \quad (2)$$

输入量和输出量是 α 和 β , 因此系统状态变量是 $\{\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}\}$. 令 $x_1 = \alpha, x_2 = \dot{\alpha}, x_3 = \beta, x_4 = \dot{\beta}$, 则系统运动微分方程可写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \\ - \frac{m_q r_q s + m_j h_1 s p}{\frac{1}{2}m_q r_q^2 + m_q s^2 + m_j s^2 p^2} x_4 \cos x_3 + \\ \frac{m_q r_q s + m_j h_1 s p}{\frac{1}{2}m_q r_q^2 + m_q s^2 + m_j s^2 p^2} x_4^2 \sin x_3 + \\ \frac{1}{\frac{1}{2}m_q r_q^2 + m_q s^2 + m_j s^2 p^2} M, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \\ - \frac{2(m_q s r_q + m_j h_1 s p)}{3m_q r_q^2 + 3m_h r_h^2 + 4m_j h_1^2} x_2 \cos x_3 + \\ \frac{2(m_q r_q + m_h r_h + m_o h_1 + m_d h_2) g}{3m_q r_q^2 + 3m_h r_h^2 + 4m_j h_1^2} \sin x_3. \end{cases} \quad (3)$$

输出方程为 $y = \beta = x_3$.

为了简便, 设

$$\begin{aligned} a_1 &= - \frac{m_q r_q s + m_j h_1 s p}{\frac{1}{2}m_q r_q^2 + m_q s^2 + m_j s^2 p^2}, \\ a_2 &= \frac{m_q r_q s + m_j h_1 s p}{\frac{1}{2}m_q r_q^2 + m_q s^2 + m_j s^2 p^2}, \\ a_3 &= \frac{1}{\frac{1}{2}m_q r_q^2 + m_q s^2 + m_j s^2 p^2}, \\ b_1 &= - \frac{2(m_q s r_q + m_j h_1 s p)}{3m_q r_q^2 + 3m_h r_h^2 + 4m_j h_1^2}, \\ b_2 &= \frac{2(m_q r_q + m_h r_h + m_o h_1 + m_d h_2) g}{3m_q r_q^2 + 3m_h r_h^2 + 4m_j h_1^2}. \end{aligned}$$

将 \dot{x}_2 代入 \dot{x}_4 , 并将 \dot{x}_4 代入 \dot{x}_2 , 可得到非线性系统方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{\frac{1}{2}a_1 b_2 \sin(2x_3) + a_2 x_4^2 \sin x_3 + a_3 u}{1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3}, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \\ \frac{\frac{1}{2}a_2 b_1 x_4^2 \sin(2x_3) + b_2 \sin x_3 + a_3 b_1 \cos x_3 u}{1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3}. \end{cases} \quad (4)$$

输出方程为 $y = \beta = x_3$.

实际测得自行车机器人的具体参数如下: 自行车前轮质量为 0.75 kg, 半径为 0.14 m; 后轮质量为 1.05 kg, 半径为 0.17 m; 车架质量(不包括电池)为 10.7 kg, 其重心高度为 0.36 m; 车架质量(包括电池)为 12.1 kg; 前轮质心到车把转动轴的距离为 0.02 m; 电池质量为 1.4 kg, 电池重心高度为 0.66 m; 前轮着地点到车架质心的距离为 0.36 m, 前轮着地点到后轮着地点的距离为 0.81 m.

将上述参数代入状态方程和输出方程. 设式(4)的分母为 $C(x_3)$, 即

$$C(x_3) = 1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3,$$

则对于给定的车体参数 a_1 和 b_1 , 对任何 x_3 都有 $C(x_3) \neq 0$ 成立.

式(4)的数学模型可转化为如下标准形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = f_1(X) + g_1(X)u, \\ \dot{x}_3 = x_4, \dot{x}_4 = f_2(X) + g_2(X)u. \end{cases} \quad (5)$$

令

$$\begin{aligned} f_1(X) &= \frac{\frac{1}{2} \cdot a_1 b_2 \sin(2x_3) + a_2 x_4^2 \sin x_3}{1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3}, \\ f_2(X) &= \frac{\frac{1}{2} \cdot a_2 b_1 x_4^2 \sin(2x_3) + b_2 \sin x_3}{1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3}, \\ g_1(X) &= \frac{a_3}{1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3}, \\ g_2(X) &= \frac{a_3 b_1 \cos x_3}{1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3}. \end{aligned}$$

这里: $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ 为系统的状态变量; $f_1(X), f_2(X)$ 为非线性函数; $g_1(X), g_2(X)$ 为已知的控制项非线性函数; u 为系统的控制输入; 输出 $y = x_3$.

令 $h(x) = x_3$, 在平衡点 $x_0 = (0, 0, 0, 0)$ 附近的领域内 ($x_3 \in (-\pi/2, \pi/2)$) 计算该系统的相对阶, 即

$$\begin{aligned} L_g h(x) &= 0, L_f h(x) = x_4 = 0, \\ L_g L_f h(x) &= \frac{b_1 a_3 \cos x_3}{1 - a_1 b_1 \cos^2 x_3} \neq 0. \end{aligned}$$

显然, 系统的相对阶 $\gamma = 2$. 若系统维数 $n = 4$, 则有 $\gamma < n$. 因此, 自行车机器人系统属于欠驱动非线性系统.

3 稳定滑模控制器设计

考虑式(5)所示的自行车机器人系统模型, 作如下假设:

假设 1 假设式(5)所示系统的非线性部分满足条件 $f_1(X) = f_2(X) = 0$, 当且仅当 $X = 0$ 时才成立.

针对式(5)所示欠驱动系统标准模型, 按子系统可分为两组状态变量 (x_1, x_2) 和 (x_3, x_4) . 定义一个中间变量, 其形式为 $z = x_1 + a x_3$, 其中 a 为大于零的常数. 因此, 可进一步定义滑模函数为 $s = cz + \dot{z}$, 其中 c 为大于零的常数. 这样采用一个滑模函数便可以实现

对多变量欠驱动系统的描述, 从而避免了多层结构中的多个滑模函数的设计. 采用等效控制法求取滑动平面的等效控制量

$$u_{eq} = -\frac{(af_2 + f_1 + ca \cdot x_4 + cx_2)}{ab_2 + b_1}. \quad (6)$$

设总的控制量为 $u = u_{eq} + u_{sw}$, 这里 u_{sw} 为系统在趋近阶段的切换控制分量. 下面按 Lyapunov 稳定定理构造切换控制量 u_{sw} . Lyapunov 能量函数取为 $V = \frac{1}{2}S^2$, 故有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} = S(c\dot{z} + \ddot{z}) = \\ &S[c\dot{x}_1 + ca\dot{x}_3 + \ddot{x}_1 + a\ddot{x}_3] = \\ &S[cx_2 + ca x_4 + f_1 + af_2 + (g_1 + ag_2)u] = \\ &S[(g_1 + ag_2)u_{sw}], \end{aligned} \quad (7)$$

这里将 $g_1(X), g_2(X)$ 简化为 g_1, g_2 . 令

$$u_{sw}(g_1 + ag_2) = -\eta \operatorname{sgn}(S) - kS,$$

η, k 为大于零的常数, 所以可求得

$$u_{sw} = -(g_1 + ag_2)^{-1}[\eta \operatorname{sgn}(S) + kS]. \quad (8)$$

从而可得到系统的切换控制量 u_{sw} 和总控制量 u , 所以 $\dot{V} = -\eta|S| - kS^2 \leq 0$.

综上所述, 系统总的控制律 u 能够保证滑动平面 s 存在并在有限时间内收敛到平衡点.

4 稳定滑模控制器的稳定性分析

在进行滑模控制器设计过程中, 采用 Lyapunov 方法求取了系统的总控制量, 但该控制量只能保证滑模平面收敛, 即中间变量能够在有限时间收敛到平衡点, 这也是滑模控制器设计的常用方法.

下面进一步分析系统内部状态变量的稳定性. 对于滑模函数 s , 由于满足滑模存在和稳定的条件, s 在有限时间内滑模平面将趋近原点, 即下式成立:

$$z(t) = \dot{z}(t) = 0, \quad t \geq t_s.$$

进一步, 可得到如下结果:

$$\dot{z} = 0 \Rightarrow \ddot{z} = 0 \Rightarrow u'_{eq} = -\frac{af_2 + f_1}{ab_2 + b_1}.$$

由于滑模平面收敛到原点后, 等效控制量 u_{eq} 切换到 u'_{eq} , 它描述的是在 $\dot{z} = 0$ 上运动的轨迹, 同样通过这个控制量能够保证 \dot{z} 所构成的两个状态变量也在有限时间内收敛到平衡点, 即 $\dot{x}_1(t) = \dot{x}_3(t) = 0, t \geq t_p$.

下面讨论 $t \geq t_p \geq t_s$ 时刻系统的稳定性问题. 当 $t \geq t_p \geq t_s$ 时, $u = 0$, 系统的方程变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = f_1(X), \\ \dot{x}_3 = x_4, \dot{x}_4 = f_2(X). \end{cases}$$

对于上述自治系统, 采用 LaSalle 不变性定理进行进一步分析. 首先定义一个紧集 Ω_ω , 其形式为

$$\Omega_\omega = \{X | V(s) \leq \omega, s = cz + \dot{z} = cx_1 + ca x_3 + x_2 + ax_4\},$$

这里 ω 为一个正常数, 通常为 $V(0)$. 进一步定义一个集合 $\Gamma \subset \Omega_\omega$, 其形式为

$$\Gamma = \{X \in \Omega_\omega | \dot{V}(X) = 0\}.$$

因为 $t \geq t_p$, 所以系统的状态又收敛到更小的一个收敛域内. 因此进一步取 Γ 的一个子集 $\Gamma_1 \subset \Gamma$ 为

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \Omega_\omega \cap \{z = \dot{z} = \dot{x}_1 = \dot{x}_3 = 0\} \subset \\ &\Omega_\omega \cap \{X | \dot{V}(X) = 0\} = \Gamma. \end{aligned}$$

定义 ψ 为 Γ_1 中的最大不变集, 则根据 LaSalle 不变性原理, 可得到满足由 Ω_ω 出发的每一个解当 $t \rightarrow \infty$ 时必然趋于 ψ . 下面进一步计算该最大不变集 ψ 的范围. 当 $t \geq t_p \geq t_s$ 时, 由 Γ_1 的范围可以得到

$$\begin{aligned} \begin{cases} \dot{x}_1 = 0, \\ \dot{x}_3 = 0; \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} \ddot{x}_1 = 0, \\ \ddot{x}_3 = 0; \end{cases} \Rightarrow \\ \begin{cases} f_1(X) = \dot{x}_2 = \ddot{x}_1 = 0, \\ f_2(X) = \dot{x}_4 = \ddot{x}_3 = 0; \end{cases} &\Rightarrow \\ X &= 0. \end{aligned}$$

根据假设1, 可进一步得到

$$\psi = \Omega_\omega \cap \{X | \dot{V}(X) = 0, (t \geq t_p)\} = \{(0, 0, 0, 0)\},$$

因此 Γ_1 中的最大不变集就是原点. 假设条件1表明, 当且仅当 $X = 0$ 时才有 $f(X) = 0$, 因此原点是 Γ_1 中的唯一解. 根据 LaSalle 渐近稳定性定理可知, 平衡点 $X = 0$ 是渐近稳定的.

值得说明的是, 这里讨论的系统平衡点渐近稳定性问题是有条件的, 即 $t \geq t_p \geq t_s$ 时刻以后的平衡点稳定性问题. 对于 $0 \leq t \leq t_p$ 这一有限时间内系统状态的收敛问题, 可通过滑模方法加以解决, 因为利用 Lyapunov 稳定定理求得的变结构控制量能够保证滑模函数在有限时间存在和收敛, 并能将系统状态控制到一个紧集 $\{X | z = \dot{z} = \dot{x}_1 = \dot{x}_3 = 0\}$ 内, 采用 LaSalle 不变性定理可以进一步证明此时的系统平衡点是渐近稳定的.

5 仿真分析

通过验证可知, 当且仅当 $X = (x_1, x_2, 0, 0)$ 时有 $f_1(X) = f_2(X) = 0$. 因为此时 $z = \dot{z} = 0$, 所以可得到 $x_1 = \dot{x}_1 = 0$, 因而满足假设1. 本系统在仿真实验中构造滑模控制器时, 令 α 和 β 的初值为 $\alpha = \pi/30, \beta = \pi/30$. 在稳定滑模控制方法中, 滑模系数 $a = 0.0001, c = 40$. 其他控制器参数为 $k = 10, \eta = 4$. 其稳定滑模作用下的车把转角及其变化率输出曲线如图3所示, 车体倾角及其变化率输出曲线如图4所示. 经过大量的仿真实验发现: c 越大, α 和 $\dot{\alpha}$ 越接近零值, 而且平滑; a 越大, α 和 β 越会发散而不稳定; k 和 η 的数值越大, 系统达到稳定所用的时间越少, 快速性越好.

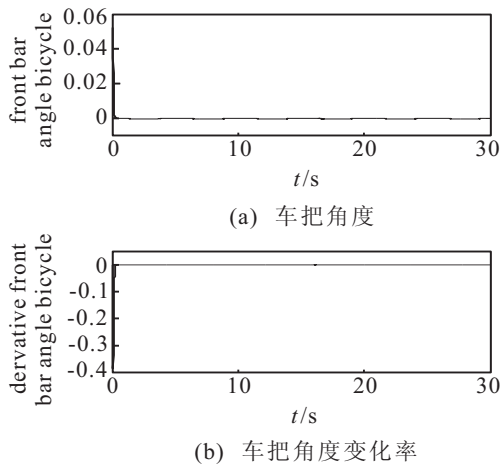


图3 自行车机器人的车把角度及变化率

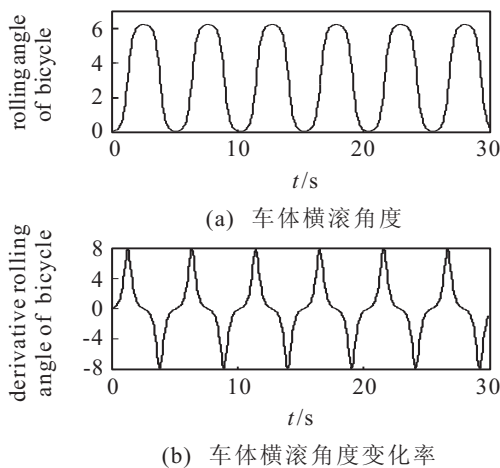


图4 自行车机器人的车体横滚角度及变化率

6 结论

本文针对自行车机器人这一非线性欠驱动系统,利用稳定滑模理论对自行车机器人进行控制.介绍了稳定滑模控制的基本理论;利用拉格朗日方程建立了单入单出的动力学模型,针对该模型利用李雅普诺夫定理推导出滑模控制器的输出;最后通过仿真得出稳定滑模控制器可以使车把转角得到有效控制,而车体倾角等幅震荡不发散.由于采用了滑模控制,当系统状态进入滑动平面后,整个系统对外界干扰具有抗扰性.本文提出的对自行车机器人这一欠驱动被控对象的控制方法是可行而有效的.

参考文献(References)

- [1] Shashikanth Suryanayanan, Masayoshi Tomizula, Matt Weaver. System dynamics and control of bicycles at high speeds[C]. Proc of the American Control Conf. Anchorage AK: IEEE, 2002:845-850.
- [2] Karl J Astrom, Richard E Klein, Anders Lennartsson. Bicycle dynamics and control: Adapted bicycles for education and research[J]. Control Systems Magazine, IEEE, 2005, 25(4): 26-47.
- [3] Yasuhito Tanaka, Toshiyuki Murakami. Self sustaining bicycle robot with steering controller[C]. The 8th IEEE Int Workshop on Advanced Motion Control. Kawasaki: IEEE, 2004: 193-197.
- [4] 王洪斌, 陈卫东, 王洪瑞, 等. 一种非线性变结构控制器的设计[J]. 燕山大学学报, 2001, 25(2): 150-155. (Wang H B, Chen W D, Wang H R, et al. Design for a kind of nonlinear variable structure controller[J]. J of Yanshan University, 2001, 25(2): 150-155.)
- [5] 孙德滨, 程勉, 高为炳. 非线性变结构控制系统的综合[J]. 自动化学报, 1989, 15(3): 248-253. (Sun D B, Cheng M, Gao W B. The synthesis of nonlinear variable structure control systems[J]. Acta Automation Sinica, 1989, 15(4): 408-415.)
- [6] 程代展, 秦化淑, 洪奕光, 等. 非线性系统研究动态与展望[J]. 控制与决策, 1995, 6(5):394-400. (Cheng D Z, Qin H S, Hong Y G, et al. A survey and prospect in research of nonlinear systems[J]. Control and Decision, 1995, 6(5): 394-400.)
- [7] 郑艳, 朱媛, 井元伟. 一类欠驱动机械系统基于滑模的变结构控制[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(6): 511-514. (Zheng Y, Zhu Y, Jing Y W. Variable structure control based on sliding model for a class of underactuated mechanical system[J]. J of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(6): 511-514.)
- [8] 罗璟, 赵克定, 陶湘厅, 等. 工业机器人的控制策略探讨[J]. 机床与液压, 2008, 36(10):95-97. (Luo J, Zhao K D, Tao X T, et al. Study on the control strategy in industrial robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(10): 95-97.)
- [9] 王伟, 易建强, 赵冬斌, 等. 一类欠驱动系统的稳定滑模控制方法[C]. 中国自动化与信息技术研讨会暨2004年年学术年会. 北京, 2004: 159-164. (Wang W, Yi J Q, Zhao D B, et al. Stable sliding-mode control method for a class of underactuated systems[C]. Chinese Automation and Information Technology Symposium 2004 Annual Meeting. Beijing, 2004: 159-164.)
- [10] Lei Guo, Qizheng Liao, Shimin Wei. Nonlinear stabilization of bicycle robot steering control system[C]. Proc of the 2009 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation. Changchun, 2009: 3185-3189.
- [11] Lei Guo, Qizheng Liao, Shimin Wei, et al. Design of linear quadratic optimal controller for bicycle robot[J]. Proc of the IEEE Int Conf on Automation and Logistics. Shenyang, 2009: 1968-1972.