

文章编号: 1001-0920(2004)03-0319-04

非完整移动机器人道路跟踪控制器设计及应用

邹小兵, 蔡自兴

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 讨论一类非完整约束条件下的移动机器人道路跟踪控制问题。综合后推方法与模糊滑模控制方法设计非完整移动机器人的状态反馈控制系统, 并根据 Lyapunov 稳定性定理后推设计时变光滑反馈控制律。当存在较大侧向误差时, 模糊滑模控制器确保移动机器人沿稳定的工作区域减小误差; 当误差比较小时, 时变光滑状态反馈控制实现对移动机器人的平稳镇定。采用移动机器人 Amigobot 作为实验平台, 验证了控制器设计的有效性。

关键词: 移动机器人; 道路跟踪; 后推方法; 模糊滑模控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Design and application of path tracking controller for nonholonomic mobile robots

ZOU Xiaobing, CAI Zixing

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: ZOU Xiaobing, Email: csutzxb@263.net)

Abstract: The path tracking control problem for mobile robots with nonholonomic constraints is discussed. A hybrid nonlinear state feedback control system is synthesized with backstepping technique and fuzzy sliding mode control methods. A time-varying smooth state feedback controller for the asymptotic stabilization of lateral error is designed with backstepping technique based on Lyapunov theory. The fuzzy slide mode controller decreases the lateral error by making the mobile robot move along the stable area when a large error exists and the time-varying smooth state feedback controller can stabilize the robot evenly in small error area. Such a controller is verified on the Amigobot.

Key words: mobile robot; path tracking; backstepping; fuzzy sliding mode control

1 引言

轮式移动机器人是一类典型的受到非完整性约束的非线性系统。由于非完整性约束下的控制系统不满足 Brockett 关于光滑反馈镇定的必要条件, 不能应用反馈线性化或光滑定常反馈的控制器设计方法渐近镇定系统^[1]。针对道路跟踪过程中的侧向镇定问题, 采用的方法有模糊滑模控制^[2,3]和分段连续指数镇定化^[4]等。采用光滑时变的反馈镇定能实现稳定、平稳的控制效果, 但在设计控制器时, 往往难

以避免一些奇异点的存在; 采用滑模等非连续状态反馈控制时, 能够设计出不含奇异点的控制器, 而且控制律的形式比较简洁, 但在控制中往往存在沿滑模界面切换时的“抖振”现象。现有的大多数控制方法均基于运动学模型^[5], 由于移动机器人动力学特性的复杂性, 使得实际控制效果难以保证。

本文利用基于 Lyapunov 稳定性定理的后推设计方法, 设计移动机器人的状态反馈控制律; 结合模糊滑模变结构控制实现混合型控制器。当大误差存

收稿日期: 2002-12-30; 修回日期: 2003-04-02

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60234030); 湖南省院士基金资助项目。

作者简介: 邹小兵(1969—), 男, 重庆人, 博士生, 从事移动机器人、智能控制系统等研究; 蔡自兴(1938—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士生导师, 从事人工智能、智能机器人等研究。

在时,模糊滑模控制限定移动机器人在反馈控制器的稳定区域中运动;在小误差范围时,则由平滑的状态反馈控制器实现平稳、快速的镇定

2 控制器设计

2.1 问题描述

本文的研究对象为二轮差分驱动的非完整移动机器人.用 $R(x, y, \theta)$ 代表移动机器人的参考点; x, y 为平面坐标; θ 为前进方向与 x 轴的方向角.将移动机器人的速度矢量分解为平移速度 v 和以参考点为轴心的旋转角速度 $\dot{\omega}$.则移动机器人的运动学方程可表示为

$$\dot{x} = v \cos \theta, \dot{y} = v \sin \theta, \dot{\theta} = \dot{\omega} \quad (1)$$

移动机器人沿规划好的道路前进,图1中的 P 是从移动机器人的参考点 R 到被跟踪路径的相切圆切点, ϕ 为道路曲线在 P 处的切向角, d 为 $R(x, y, \theta)$ 到 P 的距离,即侧向误差.规定沿着由起点 S 向终点 Q 的道路方向,移动机器人位于道路的左侧时,侧向误差为正值;位于右侧时,侧向误差为负值.令侧向夹角 $\varphi = \theta - \phi$.侧向夹角是机器人运动方向与道路切线方向的夹角.以 $\xi = \{d, \varphi, \dot{\omega}, v\}$ 作为状态变量,得

$$\begin{cases} \dot{d} = v \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \dot{\omega} - \dot{\phi} \\ \dot{\omega} = \hat{\alpha}_1(t) = \alpha_1(t) - \dot{\omega}, \\ \dot{v} = \alpha_0(t) = \alpha_0(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\alpha_0(t)$ 和 $\alpha_1(t)$ 是针对移动机器人平移速度和转动角速度的动力学控制; $\dot{\omega} = \dot{\phi}$ 为运动过程中道路曲线切点 P 的切向角变化率.在平移速度大于0的前提下,侧向误差由调节移动机器人的转动角加速度来实现.侧向误差控制器设计目标为确定控制律 $\alpha_1(t) = \hat{\alpha}_1(t) + \dot{\omega}$,使得系统最终稳定在 $d = 0$ 的状态

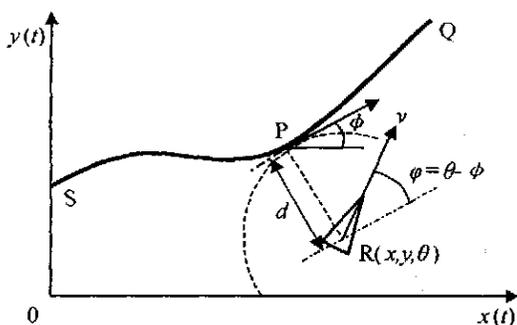


图1 道路跟踪示意图

2.2 应用 Backstepping 方法的控制律设计

后推设计非线性控制器是基于 Lyapunov 稳定性理论的方法,关键在于构造一个适当的 Lyapunov 函数.推导如下:

Step1 设误差状态变量为

$$z_1 = k_1 d, z_2 = k_2 v \sin \varphi - \beta_1, z_3 = \dot{\omega} - \beta_2 \quad (3)$$

式中: $k_1 > 0, k_2 > 0$ 为比例系数; β_1, β_2 为中间变量.构造 Lyapunov 函数 $V_1 = (1/2)z_1^2$,并由式(2)和(3)得 $\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = (k_1/k_2)z_1(z_2 + \beta_1)$,令 $\beta_1 = -c_1(k_2/k_1)z_1 = -c_1 k_2 d, c_1 = \text{const}, c_1 > 0$,则有

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + \frac{k_1}{k_2} z_1 z_2 \quad (4)$$

Step2 令 Lyapunov 函数 $V_2 = V_1 + \left(\frac{1}{2}\right)z_2^2$,则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = \\ -c_1 z_1^2 + z_2 \left(\frac{k_1}{k_2} z_1 + k_2 v z_3 \cos \varphi + \right. \\ \left. k_2 v \beta_2 \cos \varphi + k_2 v \dot{\sin} \varphi + \dot{\beta}_1 \right). \end{aligned}$$

由上式,可令

$$\beta_2 = \frac{-c_2 z_2 - \frac{k_1}{k_2} z_1 - k_2 v \dot{\sin} \varphi + \dot{\beta}_1}{k_2 v \cos \varphi}, \quad (5)$$

式中: $c_2 = \text{const}, c_2 > 0$

Step3 令 Lyapunov 函数 $V = V_2 + \left(\frac{1}{2}\right)z_3^2$,则

$$\begin{aligned} \dot{V} = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_3 (k_2 v z_2 \cos \varphi + \dot{z}_3) = \\ -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_3 (k_2 v z_2 \cos \varphi + \hat{\alpha}_1 - \dot{\beta}_2). \end{aligned}$$

令 $\hat{\alpha}_1 = -c_3 z_3 - k_2 v z_2 \cos \varphi + \dot{\beta}_2$, (6)

式中: $c_3 = \text{const}, c_3 > 0$.根据式(6),可以满足 $\dot{V} = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 \leq 0$,同时 $V(z_1, z_2, z_3) \geq 0$.故根据 Lyapunov 定理,系统的稳定条件得以满足.

计算中间变量 β_1 和 β_2 及 $\dot{\beta}_1$ 和 $\dot{\beta}_2$,并代入式(6),得

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) = \hat{\alpha}_1(t) + \dot{\omega}(t) = A(t) + \dot{\omega}(t) = \\ A_1(t) + A_2(t) + A_3(t) + \\ A_4(t) + A_5(t) + \dot{\omega}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} A_1(t) &= -k_2^2 v^2 \sin \varphi \cos \varphi - c_1 k_2^2 d v \cos \varphi \\ A_2(t) &= \left[-c_3 \frac{v}{v} - \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 - c_1 c_2 - \right. \\ &\quad \left. c_1 c_3 - c_2 c_3 - \frac{v}{v} + \left(\frac{v}{v} \right)^2 \right] \tan \varphi \\ A_3(t) &= \left[-\frac{v}{v \cos^2 \varphi} - \frac{c_1 + c_2}{\cos^2 \varphi} - c_3 \right] \dot{\omega}, \end{aligned}$$

$$A_4(t) = \left[\left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 + c_1 c_2 \right] \left(\frac{\dot{v}}{v^2} - \frac{c_3}{v} \right) \frac{d}{\cos \varphi}$$

$$A_5(t) = - \left[\left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 + c_1 c_2 \right] \frac{\sin \varphi}{v \cos^2 \varphi} \dot{\varphi} w_1$$

从式(7) 可以看到, 控制律中存在 $v = 0$ 以及 $\varphi = 360l \pm 90^\circ (l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 这样的奇异点。针对奇异点 $v = 0$, 机器人从起点 S 出发, 在未到达终点 Q 的情况下, 平移速度始终大于 0; 在终点附近, $d = 0$, 此时 $A_4(t)$ 和 $A_5(t)$ 为 0。在计算中常常忽略 \dot{v} ; 另外, 控制单位周期内平移速度的增量与平移速度之比有界, 即 $|\dot{v}/v| < \gamma$, γ 为一有界的常数, 从而保证了 $A(t)$ 有界。

2.3 基于模糊滑模变结构的控制器综合

针对奇异点 $\varphi = 360l \pm 90^\circ; l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 选定 $|\varphi| = 60^\circ$ 作为可靠工作区域。设计滑模控制器, 当 φ 超出这一区域时, 约束系统向这一区域回归, 从而远离系统的奇异点。采用模糊查询表结构实现对控制律的综合^[6] (见表 1)。

表 1 模糊控制量 ($\sim \hat{\alpha}_i$) 查询表

$\sim \hat{\alpha}_i$	$\sim \varphi$								
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9
M_0	8	6	5	4	3	3	2	1	0
M_1	8	5	4	3	$\hat{\alpha}_i(t) = A(t)$	2	1	0	-1
M_2	7	5	4	2		1	0	-1	-1
M_3	6	4	3	2		0	-1	-2	-3
M_4	5	4	2	1		-1	-2	-3	-5
M_5	4	3	2	1		-1	-2	-4	-6
M_6	3	2	1	0		-2	-3	-5	-7
M_7	1	1	0	-1		-3	-4	-5	-7
M_8	1	0	-1	-2		-3	-4	-6	-8
M_9	0	-1	-2	-3		-3	-4	-5	-7

移动机器人 Amigobot 的最大转动速度上限为 $\pm 20\%$ (此时车轮与地面间发生滑动的幅度可以忽略)。将 $\hat{\omega}$ 模糊化为 $M_0 \sim M_9$ 共 10 个区域, 其中: M_0 为 $\hat{\omega} \in (-20, -20)$, M_9 为 $\hat{\omega} \in (+20, +20)$; φ 模糊化为 $N_1 \sim N_9$ 共 9 个区域, 其中: N_1 为 $\varphi \in (-180, -90]$, N_5 为 $\varphi \in [-60, +60]$, N_9 为 $\varphi \in (+90, +180]$ 。

在 $\hat{\omega} \in [-20, +20]$, $\varphi \in [-60, +60]$ 的窗口区间中, 以式(7) 确定的 $\hat{\alpha}_i(t) = A(t)$ 进行平滑控制。转动控制量 $\hat{\alpha}_i(t)$ 被模糊化为 $[-8, +8]$ 区间的 17 个级别。在模糊控制区域, 由表 1 得到控制量的模糊量化值 ($\sim \hat{\alpha}_i$), 最终的控制量 $\alpha_i(t) = K(\sim \hat{\alpha}_i)$, K 为控制量计算的比例常数, 针对 Amigobot 设计为 K

= 2.5

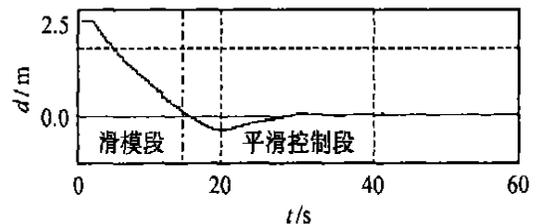
根据误差能量函数

$$V(t) = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} z_3^2,$$

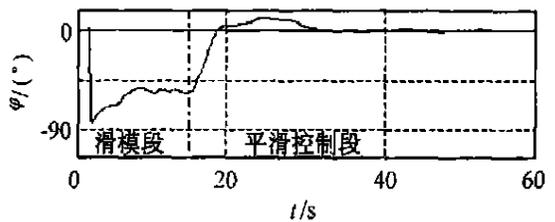
以及单位周期 T 内误差能量函数的增量 $\Delta V(t)$, 确定平移速度控制 $\alpha_0(t)$ 。在确保侧向误差被控制在适度状态下, 实现跟踪过程中平移速度的自适应调节, 即误差较大时减速, 误差适中时保持当前速度, 误差较小时加速。

3 实验结果

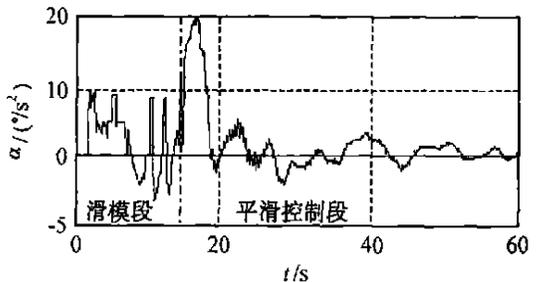
作为实验对象的移动机器人, Amigobot 的底



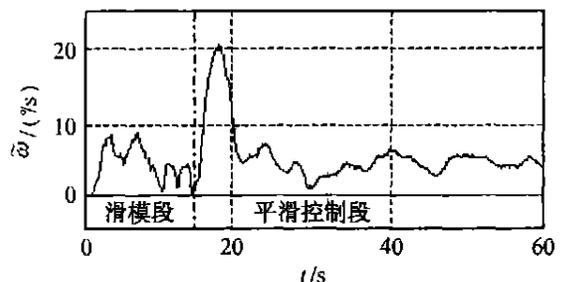
(a) 侧向误差曲线



(b) 侧向夹角曲线



(c) 转动控制曲线



(d) 转动速度曲线

图 2 圆轨迹跟踪的状态变量及控制量曲线

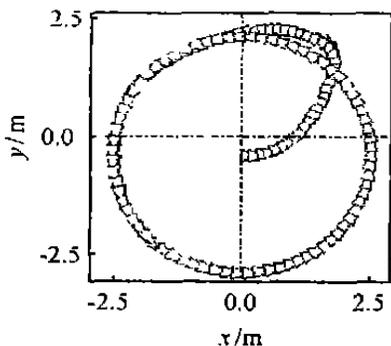


图 3 移动机器人圆轨迹跟踪过程

层控制通过无线通讯模块将机器人基于内部里程计信息的实时状态 $\{x, y, \theta, \tilde{\omega}, v\}$, 反馈给一台 P II 500MHz 的计算机; 选择式 (7) 中的控制参数 $\{k_1, k_2, c_1, c_2, c_3\} = \{1, 10, 1, 0.04, 0.04\}$. 上位机根据设定的被跟踪路径曲线以及实时状态计算 $\{\phi_d, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}, v\}$, 由式 (7) 以及表 1 计算控制量 $\hat{\alpha}_i(t)$, 并根据式 (2) 得到 $\alpha_i(t)$; 在确保侧向误差被控制在适度状态下, 实现平移速度控制量 $\alpha_0(t)$ 的自适应调节. 根据

$$\begin{cases} v(t+T) = v(t) + T\alpha_0(t), \\ \tilde{\omega}(t+T) = \tilde{\omega}(t) + T\alpha_i(t), \end{cases} \quad (8)$$

进行平移速度与转动速度的指令更新, 从而控制电机实现要求的运动

图 2 和图 3 显示了从坐标原点被渐近镇定在半径为 2.5m 的圆轨迹时的状态变量和控制量曲线. 在模糊滑模控制阶段, 初始侧向误差为 $d(0) = 2.5\text{m}$, φ 从 $\varphi(0) = -90^\circ$ 的初始状态, 沿 -60° 的模式降低侧向误差; 在 -60° 的控制模态切换处, φ 的变化曲线平稳; 进入平滑控制阶段, 侧向误差渐近镇定后, 侧向误差小于 $\pm 0.02\text{m}$. 将平移速度作为系统

的一个渐变调节参数进行控制, 调节范围为 $0 \sim 0.25\text{m/s}$

4 结 语

本文针对一类非完整性约束的移动机器人在道路跟踪过程中的侧向误差控制问题进行了研究, 应用 Backstepping 设计了时变光滑的侧向误差控制器, 并针对移动机器人的不确定性非线性因素, 采用模糊滑模控制以确保系统在全局范围内的稳定性. 控制器在移动机器人 Amigobot 平台上得以验证, 取得了稳定的控制效果. 本文研究结果对于移动机器人、自动驾驶车的运动控制具有一定的指导意义.

参考文献(References):

[1] Brockett R. *Nonlinear Control Theory and Singular Riemannian Geometry-New Directions in Applied Mathematics* [M]. New York: Springer, 1981.

[2] O'Brien R T, Iglesias P A, Urban T J. Vehicle lateral control for automated highway systems [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1996, 4(3): 266-273.

[3] Thomas Hessburg, Masayoshi Tomizuka. Fuzzy logic control lateral vehicle guidance [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1994, 14(4): 55-63.

[4] Sordalen O J, Canudas de Wit C. Exponential control law for a mobile robot extension to path following [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1993, 9(6): 837-842.

[5] ByungMoon Kim, Panagiotis Tsiotras. Controllers for unicycle-type wheeled robots: Theoretical results and experimental validation [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2002, 18(3): 294-307.

[6] 蔡自兴. 智能控制——基础与应用 [M]. 北京, 国防工业出版社, 1998.

下 期 要 目

模糊系统作为通用逼近器的 10 年历程	刘慧林 等
管道泄漏计算机在线检测系统及其算法实现	冯 健, 张化光
一类积分加权时滞型非线性微分包含的稳定性	郭树理 等
网络化控制系统中的抖动优化调度算法	白 涛 等
基于 LS-SVM 的非线性预测控制技术	王宇红 等
具有反馈时延的 TCP Vegas 拥塞控制算法的稳定性分析	杨洪勇, 田玉平
MTO 管理模式下钢铁企业生产合同计划建模与优化	刘士新 等
需求不确定条件下柔性供应链生产决策模型及优化	潘景铭, 唐小我
知识化制造系统的任务分配决策	董 昊, 严洪森