

文章编号: 1001-0920(2005)06-0750-05

非完整移动机器人的有限时间跟踪控制算法研究

李世华, 田玉平

(东南大学 自动控制系, 南京 210096)

摘要: 对非完整移动机器人的有限时间轨迹跟踪控制问题进行讨论。与基于非连续状态反馈的传统有限时间控制算法相比, 基于连续状态反馈的有限时间控制算法更适用于控制工程应用。利用该连续系统有限时间控制技术, 设计一种连续的状态反馈跟踪控制算法, 使得对角速度为非零常数的期望轨迹, 非完整移动机器人能够实现全局跟踪, 并能在有限时间内完全跟踪上期望轨迹。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 非完整移动机器人; 轨迹跟踪; 有限时间

中图分类号: O31 **文献标识码:** A

Finite Time Tracking Control Algorithm for Nonholonomic Mobile Robots

LI Shi-hua, TIAN Yu-ping

(Department of Automatic Control, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: LI Shi-hua, E-mail: lsh@seu.edu.cn)

Abstract: The finite-time trajectory tracking control problem of a nonholonomic mobile robot is discussed. In contrast to traditional finite time control algorithms based on non-continuous feedbacks, the finite time control algorithms based on continuous feedbacks are more suitable for application to control engineering. Using finite time control techniques for continuous systems, a continuous state feedback control law for trajectory tracking is developed. The proposed control law can guarantee that the mobile robot will track the desired trajectory in the global sense as well as in finite time when the desired rotate velocity is a nonzero constant. Simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: Nonholonomic mobile robot; Trajectory tracking; Finite time

1 引言

近年来, 非完整系统的控制问题一直受到广泛的关注^[1], 由于机器人技术的广泛应用, 研究非完整移动机器人的跟踪问题具有重要的工程意义。关于跟踪问题, 根据期望点是否为时间的函数可分为轨迹跟踪和路径跟踪。本文以非完整移动机器人为主要研究对象, 讨论其轨迹跟踪控制问题。

早期的非完整移动机器人轨迹跟踪控制方法主要包括在跟踪误差模型基础上的泰勒线性化或动态反馈线性化等方法^[2,3], 得到的是局部跟踪结果。在

此基础上一些研究者提出了全局的跟踪控制算法。其中一种是采用一维动态跟踪控制器的方法^[4], 由此得到的闭环系统无奇异点且为全局跟踪, 该方法要求参考模型角速度不趋于零; 还有利用 Lyapunov 直接方法和积分 backstepping 的方法^[5], 该方法对非完整移动机器人的局部及全局跟踪问题分别进行了研究, 全局跟踪的前提是参考模型平移速度不趋于零或参考模型平移速度趋于零时, 参考模型角速度不趋于零; 文献[6]对非完整移动机器人的全局跟踪问题进行了研究, 对满足一定条件的参考模型可

收稿日期: 2004-08-24; 修回日期: 2004-10-22

基金项目: 东南大学优秀青年教师教学科研资助项目

作者简介: 李世华(1975—), 男, 江西萍乡人, 博士, 副教授, 从事机器人控制、混沌控制等研究; 田玉平(1964—), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统控制理论及应用、鲁棒控制等研究

以实现全局指数跟踪

在上述的轨迹跟踪控制系统研究结果中, 最好的收敛性能是跟踪误差指数收敛于零, 因此这些控制方法均属于无限时间控制问题, 即系统在无穷大时间才能真正跟踪上参考轨迹。从控制系统时间优化的角度来看, 有限时间收敛的控制方法才是时间最优的控制方法。所谓有限时间控制问题是指能否在有限时间内将系统控制到平衡点。研究表明, 在系统具有干扰和不确定情况下, 有限时间收敛的系统往往具有更好的性能^[7]。但由此带来的一个问题是有限时间控制器的设计和稳定性分析更为复杂。

关于有限时间控制器设计的方法有开环控制、非连续反馈和连续反馈控制方法。开环控制在实际应用中局限很大; 以 bang-bang 控制为代表的非连续反馈方法可以实现有限时间收敛, 但控制器不易实现, 系统易产生抖动。因此, 采用连续状态反馈是值得关注和研究的一类方法。但此时有限时间系统对应的是分数幂的微分方程, 而目前关于分数幂非线性微分方程的理论结果和分析工具很少, 因此进行这方面的研究难度很大。

目前有限时间控制方法研究的对象主要局限在低阶线性系统和特殊结构的非线性系统等。文献[8]提出一种终端滑动模态的有限时间控制设计方法, 缺点是二阶系统的终端滑动模态设计存在奇异情况。[7]采用齐次系统的分析方法, 解决了二阶线性系统的全局有限时间控制问题, 并给出了非线性自治系统的有限时间稳定性定理。[9]针对 n 阶线性系统和特殊形式的非线性系统, 提出一种有限时间控制器设计方法, 遗憾的是为了实现有限时间控制, 必须估计出控制器增益的取值范围。

近期, 作者提出了一些有限时间跟踪控制方法。对参考模型角速度不为零的情况, 文献[10]利用[8]的终端滑动模态方法设计一种有限时间控制律, 缺点是控制律存在奇异, 必须采取附加的控制绕开奇异点; 对同样的问题, 文献[11]利用[7]中二阶系统有限时间技术, 结合反馈线性化技术, 实现了非完整移动机器人在有限时间内对参考轨迹的完全跟踪, 且控制器没有奇异。但文[10, 11]中的方法只是得到了误差模型有限时间收敛结果, 没有给出全局有限时间稳定性的分析和证明。本文则针对非完整移动机器人特点, 考虑参考模型角速度为非零常数情况, 提出了连续有限时间跟踪控制律, 并利用文献[7]的齐次系统有限时间稳定定理证明了闭环系统的全局有限时间稳定性。对满足一定假设条件的角速度不趋于零的期望轨迹, 非完整移动机器人能够实现全局跟踪, 并在有限时间内完全跟踪上期望轨迹。

2 移动机器人问题及模型描述

本文研究对象为轮式移动机器人, 其动力学特性由下列微分方程描述:

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

其中: v 和 ω 分别为移动机器人的平移速度和角速度; (x, y) 为机器人两轮轴中心笛卡儿坐标描述; θ 为其前进方向与 x 轴的夹角。本文研究机器人的轨迹跟踪问题, 即寻找 v, ω 的控制律使得机器人能在有限时间内跟踪由位姿矢量 $p_r = (x_r, y_r, \theta)^T$ 和输入信号 v_r, ω 描述的参考模型。

定义坐标误差为^[3]

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由此导出的位姿坐标误差模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \omega y_e - v + v_r \cos \theta, \\ \dot{y}_e = -\omega x_e + v_r \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega - \omega \end{cases} \quad (3)$$

3 有限时间跟踪控制器的分步设计

为方便描述, 令函数 $\text{sig}^\alpha x = |x|^{\alpha} \text{sign}(x)$, 其中 $\alpha > 0$, $\text{sign}(x)$ 为符号函数。注意到该函数满足下列性质:

$$\text{sig}^1 x = x, \frac{d}{dx} |x|^{\alpha+1} = (\alpha+1) \text{sig}^\alpha x.$$

在设计有限时间跟踪控制器之前, 首先给出一些相关的定义和引理。

引理 1^[7] 一阶线性系统

$$\dot{x} = u \quad (4)$$

可被下列控制器在有限时间内镇定:

$$u = -k \text{sig}^\alpha x, \quad (5)$$

其中: $k > 0, 0 < \alpha < 1$ 。

实际上该系统有这样的特性: 对初态为 $x(0)$ 的状态 $x(t)$, 系统(4)将在有限时间 t_s 内到达 $x = 0$, 其中 $t_s = |x(0)|^{1-\alpha} / k(1-\alpha)$ 。值得注意的是系统(4)到达原点(平衡点)后停留, 即有限时间收敛到原点。

定义 1^[7] 考虑如下非线性系统:

$$\dot{x} = f(x), x \in R^n, \quad (6)$$

其中 $f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))^T$ 。称系统齐次度为 k , 若存在 $(r_1, \dots, r_n), r_i > 0, i = 1, \dots, n$, 对任意 $\epsilon > 0, x \in R^n$ 满足

$$f_i(\epsilon^{r_1} x_1, \dots, \epsilon^{r_n} x_n) = \epsilon^{k+r_i} f_i(x). \quad (7)$$

引理 2^[7] 若系统(6)是渐近稳定且系统齐次度小于零, 则该系统为有限时间渐近稳定的。

引理 3^[12] 假设 $f(t): R^+ \rightarrow R$ 为可导函数, 且

当 t 时存在有界极限 若其导数函数可表示成如下两个函数之和:

$$\dot{f}(t) = g_1(t) + g_2(t),$$

其中 $g_1(t)$ 为一致连续函数, 并且 $\lim_{t \rightarrow \infty} g_2(t) = 0$, 则有 $\lim_{t \rightarrow \infty} g_1(t) = 0$

考虑到移动机器人的运动学模型特性, 将有限时间控制技术应用于移动机器人的跟踪控制, 可按如下步骤进行:

Step 1: 对系统(3)的状态 θ 按式(5)进行一阶系统有限时间控制设计, 选择 ω 的控制律为

$$\omega = \dot{\theta} + k_3 \text{sig}^{\alpha_3} \theta, \quad (8)$$

其中: $k_3 > 0, 0 < \alpha_3 < 1$, 则有

$$\dot{\theta} = -k_3 \text{sig}^{\alpha_3} \theta.$$

因此, 系统(3)在有限时间 t_0 内到达 $\theta = 0$, 其中

$$t_0 = \frac{|\theta(0)|^{(1-\alpha_3)}}{k_3(1-\alpha_3)}, \quad (9)$$

并且系统(3)在有限时间 t_0 内到达 $\omega = 0$, 即 $\dot{\omega} = 0$.

Step 2: 对系统(3)而言, 在 $t > t_0$ 时只需考虑另外两个状态的控制设计. 注意到此时原系统退化为

$$\dot{x}_e = \omega y_e - v + v_r, \quad (10)$$

$$\dot{y}_e = -\omega x_e \quad (11)$$

显然, 将状态 θ 首先调整为 0 的设计使得状态 y_e 的变化完全由 v 来控制. 下面对状态 (x_e, y_e) 组成的线性系统进行设计.

对子系统(10)和(11), 取 v 的控制律为

$$v = v_r + \omega y_e - k_1 \omega \text{sig}^{\alpha_1} y_e + k_2 \text{sig}^{\alpha_2} x_e, \quad (12)$$

其中: $k_1, k_2 > 0; 0 < \alpha_1, \alpha_2 < 1; \alpha_2 = 2\alpha_1 / (1 + \alpha_1)$.

于是得到子系统闭环形式为

$$\dot{x}_e = k_1 \omega \text{sig}^{\alpha_1} y_e - k_2 \text{sig}^{\alpha_2} x_e, \quad (13)$$

$$\dot{y}_e = -\omega x_e \quad (14)$$

由此, 得到如下定理:

定理 1 若 $v_r(t)$ 在 $[0, \infty)$ 连续有界, 且 $\omega(t) = c > 0$, 则控制律(8)和(12)使得系统(3)状态在有限时间到达零, 且满足闭环系统是有限时间稳定的, 系统(1)在有限时间内跟踪上参考轨迹.

证明 由上述控制律设计过程可知系统(3)在有限时间 t_0 内到达 $\theta = 0$, 下面首先证明系统状态 x_e 和 y_e 在状态 θ 有限时间 t_0 到达 $\theta = 0$ 这段时间内不会发散, 即不会出现有限时间逃离现象; 然后证明状态 x_e 和 y_e 在 $t > t_0$ 时间段有限时间到达零.

1) 状态 x_e, y_e 在 $t > t_0$ 内的有界性

将控制律(8)和(12)代入系统(3), 得到如下闭环系统:

$$\dot{x}_e = -k_3 \text{sig}^{\alpha_3} \theta y_e + v_r (\cos \theta - 1) -$$

$$k_2 \text{sig}^{\alpha_2} x_e + k_1 \omega \text{sig}^{\alpha_1} y_e, \\ \dot{y}_e = - (k_3 \text{sig}^{\alpha_3} \theta + \omega) x_e + v_r \sin \theta, \\ \dot{\theta} = -k_3 \text{sig}^{\alpha_3} \theta.$$

取关于状态 x_e, y_e 的 Lyapunov 函数为

$$V_1(x_e, y_e) = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2,$$

求导数得

$$\dot{V}_1(x_e, y_e) = -k_2 |x_e|^{\alpha_2+1} - \omega x_e y_e + v_r x_e (\cos \theta - 1) + v_r y_e \sin \theta + k_1 \omega \text{sig}^{\alpha_1} y_e x_e \quad (15)$$

由于状态 θ 有限时间 t_0 到达 $\theta = 0$, 状态 $\theta(t)$ 在任意时间均为有界(实际上 $|\theta(t)| \leq |\theta(0)|$). 并且由定理 1 假设知 $v_r(t)$ 和 $\omega(t)$ 有界, 则可验证对于式(15), 一定存在合适的 $\eta > 0$ 和 $K > 0$ 使得对任意 $(x_e, y_e) \in \eta$ 有

$$\dot{V}_1(x_e, y_e) \leq -KV_1(x_e, y_e).$$

例如, 设 $|v_r(t)|$ 的界为 v_r^{\max} , 不妨取 $(x_e, y_e) \in \eta$, $\eta = 1$, 则式(15)满足

$$\dot{V}_1(x_e, y_e) \leq -\frac{c}{2} \eta^2 + 3v_r^{\max} \eta^2 + k_1 c \eta^{\alpha_1+1} - KV_1, \\ K = c + 6v_r^{\max} + 2k_1 c,$$

并且当 $(x_e, y_e) \in \eta$ 时, 存在常数使得

$$\dot{V}_1(x_e, y_e) \leq -L.$$

因此, 对任意 $x_e(t)$ 和 $y_e(t)$, 有

$$\dot{V}_1(x_e, y_e) \leq -KV_1(x_e, y_e) + L.$$

求解上述不等式得

$$V_1(x_e(t), y_e(t)) \leq (V_1(x_e(0), y_e(0)) + \frac{L}{K}) e^{-Kt} - \frac{L}{K},$$

因此, 在 $t > t_0$ 有限时间区间内状态 x_e 和 y_e 是有界的.

2) 状态 x_e, y_e 在 $t > t_0$ 段的有限时间收敛性

由引理 2 和前述控制律设计过程, 只需证明在 $t > t_0$ 时子系统(13)和(14)渐近稳定且满足齐次系统性质. 取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{k_1}{\alpha_1 + 1} |y_e|^{\alpha_1+1},$$

求导数得

$$\dot{V} = -k_2 |x_e|^{\alpha_2+1} + x_e k_1 \omega \text{sig}^{\alpha_1} y_e + k_1 \text{sig}^{\alpha_1} y_e (-x_e \omega) = -k_2 |x_e|^{\alpha_2+1} < 0$$

显然 V 函数非增, 且存在有限极限, 则状态 x_e 和 y_e 有界, 由假设知 $v_r(t)$ 和 $\omega(t)$ 有界, 可验证 \dot{V} 有界, 所以 V 一致连续, 由 Barbalat 引理^[12] 知 V 趋于零, 则有 x_e 趋于零. 并且由 $\omega(t)$ 有界和式(13), (14) 可

知 \dot{x}_e 和 \dot{y}_e 有界, 因此 x_e, y_e 一致连续 观察 x_e, y_e 运动方程为

$$\frac{d}{dt}(x_e y_e) = k_1 \omega |y_e|^{\alpha_1 + 1} - k_2 \text{sig}^{\alpha_2} x_e y_e - \omega^2 x_e,$$

令 $g_1(t) = k_1 \omega |y_e|^{\alpha_1 + 1}$, 由假设知 $\omega(t)$ 有界, $g_1(t) = k_1 [\omega(\alpha_1 + 1) \text{sig}^{\alpha_1} y_e]$ 有界, $g_1(t) = k_1 \omega |y_e|^{\alpha_1 + 1}$ 一致连续 由 x_e 趋于零知 $g_2(t) = -k_2 \text{sig}^{\alpha_2} x_e y_e - \omega^2 x_e$ 趋于零 由引理 3, 有 $g_1(t)$ 趋于零, 则必有 y_e 趋于零, 所以闭环系统 (13), (14) 渐近稳定 可验证, 当取 $r_1 = 1, r_2 = 2/(\alpha_1 + 1)$ 以及 $0 < \alpha_1, \alpha_2 < 1, \alpha_2 = 2\alpha_1/(1 + \alpha_1)$ 时, 二阶系统 (13), (14) 向量场满足

$$f(\epsilon^1 x_e, \epsilon^2 y_e) = \begin{bmatrix} k_1 \omega \epsilon^{2\alpha_1} \text{sig}^{\alpha_1} y_e - k_2 \epsilon^{1\alpha_2} \text{sig}^{\alpha_2} x_e \\ -\omega \epsilon^1 x_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon^{1+k} & 0 \\ 0 & \epsilon^{2+k} \end{bmatrix} f(x_e, y_e).$$

其中系统齐次度为 $k = (\alpha_1 - 1)/(\alpha_1 + 1) < 0$ 由引

理 2, 子系统 (13), (14) 为有限时间渐近稳定的 所以, 全局跟踪控制律 (8) 和 (12) 使得系统 (3) 状态在有限时间到达零, 实现了系统 (1) 对参考轨迹的有限时间内全局跟踪

4 仿真例子

为验证本文提出的跟踪控制器的有效性, 在 Matlab 环境下给出 2 个仿真例子

例 1 选取期望轨迹 $v_r(t) = 1 + t/(t + 10)$ m/s, $\omega(t) = 1$ rad/s, 即初始时为平移变速运动, 随 t 时平移趋于匀速的运动 选取参数 $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 2\alpha_1/(1 + \alpha_1) = 0.75, \alpha_3 = 0.6, k_1 = 5, k_2 = k_3 = 2$, 当初初始值为 $x_r(0) = y_r(0) = 0$ m, $\theta(0) = 0$ rad, $x(0) = -1.5$ m, $y(0) = -2.5$ m, $\theta(0) = 1$ rad 时, 即 $x_e(0) = 2.914$ m, $y_e(0) = 0.089$ m, $\theta_e(0) = -1$ rad 时, 仿真结果如图 1~ 图 3 所示

例 2 选取期望轨迹 $v_r(t) = 1 + \sin(t)$ m/s, $\omega = 1$ rad/s, 即参考轨迹作匀速旋转螺旋运动 选

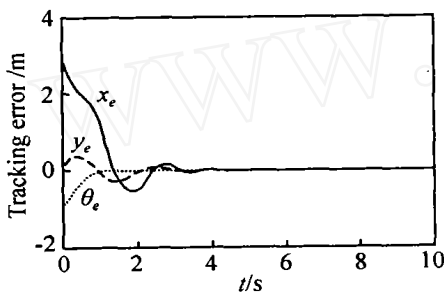


图 1 跟踪误差曲线 (例 1)

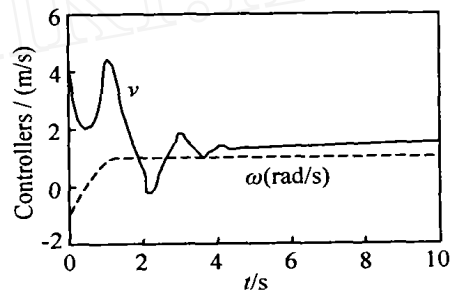


图 2 控制变量输出 (例 1)

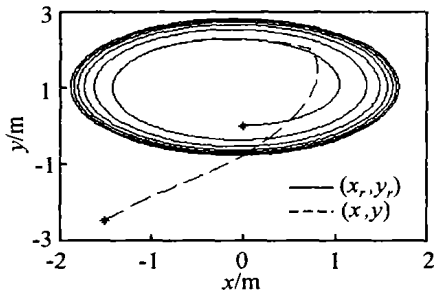


图 3 小车在平面上运动轨迹 (例 1)

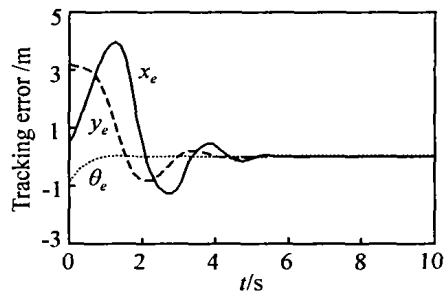


图 4 跟踪误差曲线 (例 2)

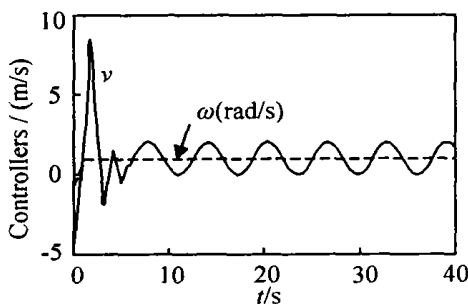


图 5 控制变量输出 (例 2)

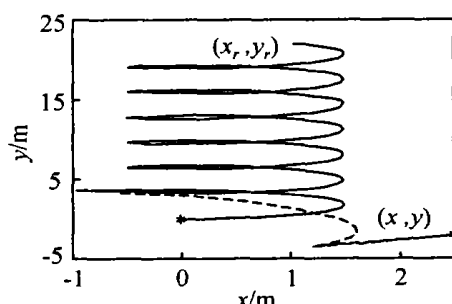


图 6 小车在平面上运动轨迹 (例 2)

取参数 $\alpha_1 = 0.6$, $\alpha_2 = 2\alpha_1/(1 + \alpha_1) = 0.75$, $\alpha_3 = 0.6$, $k_1 = 5$, $k_2 = k_3 = 2$ 当初始值为 $x_r(0) = y_r(0) = 0$ m, $\theta_r(0) = 0$ rad, $x(0) = 2.5$ m, $y(0) = -2$ m, $\theta(0) = 1$ rad 时, 即 $x_e(0) = 0.332$ m, $y_e(0) = 3.184$ m, $\theta_e(0) = -1$ rad 时, 仿真结果如图 4~图 6 所示

5 结 语

与基于非连续状态反馈的有限时间控制技术相比, 基于连续状态反馈的有限时间控制技术更适用于控制工程应用。本文将基于连续状态反馈的有限时间控制技术应用于基于运动学模型的非完整移动机器人的跟踪控制问题, 设计出有限时间收敛的跟踪控制算法。通过对不同状态分别采用有限时间控制技术进行分步设计, 使得对角速度为非零常数的期望轨迹, 跟踪误差模型在有限时间内收敛, 同时使得非完整移动机器人在有限时间内跟踪上需要的期望轨迹。仿真结果表明了该方法的有效性。

参考文献(References)

- [1] Kolmanovsky H, McClamroch N H. Developments in Nonholonomic Control Systems [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1995, 15(6): 20-36
- [2] Kanayama Y, Kimura Y, Miyazaki F, et al. A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Cincinnati: IEEE Computer Society Press, 1990: 384-389
- [3] Fliess M, Levine J, Martin P, et al. Flatness and Defect of Nonlinear Systems: Introductory Theory and Examples [J]. *Int J of Control*, 1995, 61(6): 1327-1361
- [4] 董文杰, 霍伟. 受非完整约束移动机器人的跟踪控制 [J]. *自动化学报*, 2000, 26(1): 1-6
(Dong W J, Huo W. Tracking Control of Mobile Robots with Nonholonomic Constraint [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(1): 1-6)
- [5] Jiang Z P, Nijmeijer H. Tracking Control of Mobile Robots: A Case Study in Backstepping [J]. *Automatica*, 1997, 33(7): 1393-1399
- [6] 李世华, 田玉平. 非完整移动机器人的轨迹跟踪控制 [J]. *控制与决策*, 2002, 17(3): 301-305
(Li S H, Tian Y P. Trajectory Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robots [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(3): 301-305)
- [7] Bhat S P, Bernstein D S. Finite Time Stability of Homogeneous Systems [A]. *American Control Conf* [C]. Evanston: American Autom Control Council, 1997: 2513-2514
- [8] Yu X H, Man Z H. Multi-input Uncertain Linear Systems with Terminal Sliding-mode Control [J]. *Automatica*, 1998, 34(3): 389-392
- [9] Hong Y. Finite-time Stabilization and Stabilizability of a Class of Controllable Systems [J]. *Systems and Control Letters*, 2002, 46(4): 231-236
- [10] 李世华, 田玉平. 移动小车的轨迹跟踪控制 [J]. *控制与决策*, 2000, 15(5): 626-628
(Li S H, Tian Y P. Tracking Control of Mobile Robots [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 626-628)
- [11] 李世华, 田玉平. 移动小车的有限时间轨迹跟踪控制 [J]. *东南大学学报*, 2004, 34(1): 113-116
(Li S H, Tian Y P. Trajectory Tracking Control of Mobile Robots in Finite Time [J]. *J of Southeast University*, 2004, 34(1): 113-116)
- [12] Dixon W E, Dawson D M, Zergeroglu E, et al. *Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robots* [M]. London: Springer-Verlag, 2000

(上接第 749 页)

- [2] Platt J, Cristianini N, Shawe-Taylor J. Large Margin DAG's for Multiclass Classification [A]. *Advances in Neural Information Processing Systems 12* [C]. Cambridge, MA: MIT Press, 2000: 547-553
- [3] Hsu C, Lin C. A Comparison of Methods for Multiclass Support Vector Machines [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2002, 13(2): 415-425
- [4] Takahashi F, Abe S. Decision-Tree-Based Multiclass Support Vector Machines [A]. *Proc of the 9th Int Conf on Neural Information Processing* [C]. Singapore, 2002, (3): 1418-1422
- [5] Sungmoon C, Sang H O, Soo-Young L. Support Vector Machines with Binary Tree Architecture for Multi-Class Classification [J]. *Neural Information Processing Letters and Reviews*, 2004, 2(3): 47-51
- [6] 马笑潇, 黄席樾, 柴毅. 基于 SVM 的二叉树多类分类算法及其在故障诊断中的应用 [J]. *控制与决策*, 2003, 18(3): 272-276
(Ma X X, Huang X Y, Chai Y. 2PTMC Classification Algorithm Based on Support Vector Machines and Its Application to Fault Diagnosis [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(3): 272-276)
- [7] Michie D, Spiegelhalter D, Taylor C. *Machine Learning, Neural and Statistical Classification* [DB/OL]. <http://www.iacc.up.pt/ML/statlog/datasets.html> 1994