

文章编号: 1001-0920(2008)06-0655-05

# 非完整移动机器人路径跟踪的模糊控制

邹细勇<sup>1</sup>, 徐 德<sup>2</sup>, 李子印<sup>1</sup>

(1. 中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018; 2. 中国科学院 自动化研究所, 北京 100080)

**摘要:** 以步进电机驱动的差动式移动机器人为对象, 建立非完整约束的离散运动学模型. 基于参数整定的思想, 并结合路径跟踪的特点来设计用于非完整移动机器人路径跟踪的分阶段模糊控制器, 在跟踪的趋近和稳定阶段, 分别采用了不同的模糊化比例因子和解模糊比例因子. 仿真和实验表明, 移动机器人采用分阶段模糊控制器对路径进行跟踪, 响应速度快, 稳态误差小, 鲁棒性强.

**关键词:** 非完整约束; 轮式移动机器人; 路径跟踪; 模糊控制; 参数整定

**中图分类号:** TP242

**文献标识码:** A

## Piece wise fuzzy control for path tracking of nonholonomic mobile robots

ZOU Xi-yong<sup>1</sup>, XU De<sup>2</sup>, LI Zi-yin<sup>1</sup>

(1. College of Optics and Electronics Science, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: ZOU Xi-yong, E-mail: xiyzhou@126.com)

**Abstract:** The discrete kinematics model of wheeled mobile robots in digital control system is analyzed and established. In order to improve the adaptability of path tracking, a piecewise fuzzy controller with parameter tuning is designed for mobile robots. The scaling factors of fuzzy variables are applied, which are tuned offline respectively in approaching phase and stable phase. Simulation experiments show that the path tracking has quick response, and the piecewise fuzzy controller has good fault tolerance and robustness.

**Key words:** Nonholonomic constraints; Wheeled mobile robots; Path tracking; Fuzzy control; Parameter tuning

### 1 引言

近年来, 移动机器人正进一步向微型化、智能化等方向发展<sup>[1]</sup>, 其控制问题受到人们越来越多的重视<sup>[2-6]</sup>, 已成为当前的研究热点. 在移动机器人中, 轮式移动机器人是最普遍、最常见的一类. 轮式移动机器人受轮子与地面之间的速度不可积约束, 即非完整约束, 也被称为非完整移动机器人. 此类系统不存在光滑或连续的时不变静态状态反馈, 能镇定在平衡点上, 其控制较为困难<sup>[7,8]</sup>.

非完整移动机器人的控制主要包括路径跟踪、轨迹跟踪和点镇定等, 本文重点讨论路径跟踪问题. 路径跟踪是指按给定任务进行路径规划后, 要求移动机器人快速准确地沿期望路径向目标点运动. 本文针对一个 4 轮移动机器人, 建立非完整约束运动的离散式运动学模型; 然后, 借鉴人驾驶汽车的行为经验, 设计一个分阶段模糊控制器, 用于实现非完整

移动机器人的路径跟踪. 实验表明, 所设计的控制器能控制移动机器人快速、准确地跟踪各种参考路径, 所获得的运动轨迹平稳, 稳态跟踪误差小.

### 2 轮式移动机器人的离散式运动学模型

文中的 4 轮移动机器人<sup>[9]</sup>, 采用双后轮驱动、双前轮支撑的方式. 前轮采用无动力的万向轮, 起平衡作用. 两后轮分别由步进电机驱动, 每个后轮上装有一台五相步进电机. 步进电机可直接接受计算机所发出脉冲的控制, 易于数字化, 具有调速方便、定位准确、抗干扰能力强等优点.

一般地, 可假定轮式移动机器人在运动过程中无打滑, 仅作纯滚动. 换言之, 可认为机器人在其横轴上没有运动分量. 这种约束条件可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (1)$$

收稿日期: 2007-03-09; 修回日期: 2007-07-02.

作者简介: 邹细勇(1979—), 男, 江西高安人, 博士, 从事模式识别、机器人控制等研究; 徐德(1965—), 男, 山东五莲人, 研究员, 博士生导师, 从事机器人视觉控制等研究.

其中： $(x, y)$  为机器人位姿， $(V, \omega)$  为机器人运动的线速度和角速度。

以往的很多研究正是基于模型(1)进行的，它是一个连续形式的运动学模型，而实际中的控制大多是数字式的离散控制。离散控制是按周期进行的，而且控制周期不同，所获得的控制效果可能不一样。因此有必要建立机器人位姿的离散计算方程。

移动机器人的步进过程如图1所示。其中： $XOY$  为地面坐标系； $S$  为机器人横轴，从左驱动轮指向右驱动轮； $T$  为机器人纵轴，从驱动轮指向随动轮；机器人中心为两个驱动轮的几何中心。考虑机器人从  $C_0$  点以匀速  $V$  和  $\omega$  运动至  $C_1$  点，途经  $C$  点。假设第  $k-1$  时刻机器人在  $C$  点  $(x_{k-1}, y_{k-1}, \theta_{k-1})$ 。不失一般性，假设机器人右轮电机的驱动频率大于左轮电机的驱动频率，即右轮速度高于左轮速度，且  $XOY$  坐标系的原点刚好是车体运动时的瞬心。

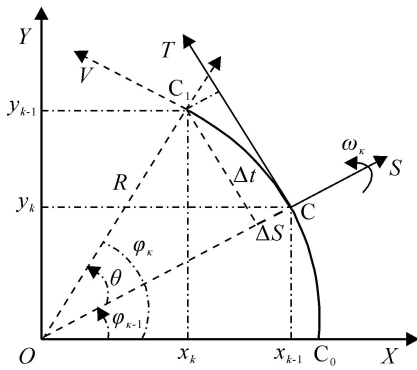


图1 移动机器人步进轨迹

由图1可知，当  $\theta = 0$  时，机器人位姿的离散周期迭代公式为

$$\begin{cases} k = k-1 + 1, \\ x_k = x_{k-1} + \text{sign}(\omega) R (\cos \theta_k - \cos \theta_{k-1}), \\ y_k = y_{k-1} + \text{sign}(\omega) R (\sin \theta_k - \sin \theta_{k-1}). \end{cases} \quad (2)$$

其中： $\text{sign}(\omega)$  是符号函数； $T_c$  是控制周期  $T_c$  内小车的转弯角度，它等于角速度  $\omega$  与  $T_c$  的乘积； $R$  是转弯半径，由线速度与角速度的比值决定。

当  $\theta = 0$  时，机器人的位姿可通过直线方程求出。

### 3 路径跟踪控制器设计

#### 3.1 控制策略的确定

轮式移动机器人是一类典型的非线性系统，对其控制往往通过改变角速度和线速度来实现。前者控制机器人的转向，后者控制移动的速度。在通常工作状态下，移动机器人可以以某一巡航速度前进。因此，最主要的是角速度的控制。

由于系统的欠驱动特性，采用传统方法对轮式移动机器人进行稳定控制非常困难。而同样是控制

轮式系统，人驾驶汽车却可以很轻松地完成。这是因为人能进行智能推理，其潜意识中有某种规则在指导。当人驾驶汽车跟踪附近路面上的一条车道线时，他首先要进行观察，将此直线当作参考路径，衡量车体与参考路径段的横向距离以及它们所处方向的夹角，而这种衡量是以一种模糊的概念给出的，如“距离比较大，角度很小”等。当发现车体离参考路径很远且与期望方向偏角较大时，可以驾驶汽车快速转弯，向期望位置靠拢；而在离参考路径很远，汽车朝向已正对前方车道线上某一位置时，就不需转动方向盘来改变行驶方向，而是一直保持当前行驶状态，直至离车道线上拐点比较近时，再找下一个参考路径段。

因为模糊逻辑<sup>[10,11]</sup> 可以描述人对同类对象进行控制的成功经验，而且不需对被控对象建立精确的模型，所以本文采用模糊控制策略对非完整移动机器人进行路径跟踪控制。

#### 3.2 模糊控制器设计

传统模糊控制中，模糊映射和推理在整个控制期间是不变的。但是，对于轮式移动机器人的路径跟踪，根据操作经验，在控制过程的不同阶段，横向偏差和航向偏差对输出的影响程度是不同的，而输出量的增益也不应固定不变。因此，为优化系统的跟踪响应性能，控制器按分段调整的思想进行设计，其结构如图2所示。

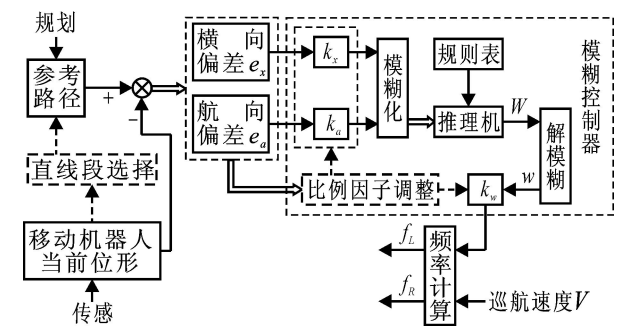


图2 分阶段模糊控制器结构

被跟踪路径是从起点到目标点的已规划路径，由头尾相连的直线段组成。在跟踪过程中，参考的直线段根据机器人当前位置变化不断往前移动。如图2所示，根据参考路径和机器人当前位姿，计算出控制器的两个输入量，即横向偏差  $e_x$  和航向偏差  $e_a$ 。前者是在地面坐标系中移动机器人到参考路径段的距离，定义参考路径段在机器人左侧时  $e_x$  为负，否则为正；后者是移动机器人航向到参考路径段方向的转角。横向偏差和航向偏差经模糊化接口映射到模糊论域，模糊推理机根据模糊关系完成模糊推理，解模糊接口将推理机得出的模糊值转化成实际纠偏

角速度. 模糊控制器输入、输出量的比例因子根据实际控制情况进行适当调整, 调整过程是通过比较它们不同取值时路径跟踪的动、静态特性进行的. 这 3 个比例因子在离线整定后, 存储在调整表中, 具体应用时查表即可. 在整个控制过程中, 输出量限定在最大角速度  $\omega_m$  以内. 控制器输出  $\omega$  还要与  $V$  一起映射到左右步进电机的脉冲频率.

模糊推理机的输入变量  $E_x, E_a$  和输出变量  $W$  的模糊子集均为 7 个:  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ , 各模糊子集的隶属度函数均采用三角形. 隶属度函数的形状越尖锐, 控制灵敏度越高, 因此, 横向偏差  $E_x$  在零值区域附近的形状设定得比较陡直.

参考人驾驶汽车的操作经验, 可归纳出表 1 所示的 49 条模糊控制规则. 模糊推理采用取大-取小 (MAX-MIN) 法, 解模糊采用重心法.

表 1 模糊控制规则表

$E_a$	$E_x$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZE
PM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
PS	PB	PM	PS	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
NS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NB
NM	PS	ZE	NS	NS	NM	NB	NB
NB	ZE	NS	NS	NM	NB	NB	NB

### 3.3 比例因子的调整

模糊变量的比例因子决定横向偏差  $e_x$  和航向偏差  $e_a$  对输出的影响权重. 在趋近参考路径的初期, 由于横向偏差大, 纠偏任务是主要的. 为达到快速纠偏, 必须加大  $e_x$  对输出的影响, 体现在比例因子上, 则应增大  $k_x$  相对  $k_a$  的比值, 而此时输出量也要取一个大的值, 即应该增大  $w$  的比例因子  $k_w$ . 随着横向偏差的不断缩小, 系统输出接近期望值. 此时, 限制超调、快速进入稳定状态成为主要任务, 即应抑制车体在期望直线段左右摆动的幅度, 所以应增大航向偏差  $e_a$  相对横向偏差  $e_x$  的控制权重, 增大  $k_a$  而减小  $k_x$ . 在这个阶段, 为使系统尽快进入稳态,  $k_w$  的取值也应减小.

模糊控制器比例因子是离线整定的. 不失一般性, 可将这个过程以移动机器人跟踪一条经过 (0, 3) 和 (4, 9) 两点的直线段为例进行说明. 小车的起始位置为 (1, 1.5), 起始航向为正  $X$  轴方向.

图 3 给出了在趋近和稳定两个阶段采用不同比例因子时路径的跟踪响应, 横坐标为控制周期数, 纵坐标为跟踪的横向偏差  $e_x$ . 系统处于趋近阶段的判

定条件为  $e_x > 0.3$  或  $e_a > 0.526 \text{ rad}$  (即  $30^\circ$ ), 其中加入第 2 个条件的目的是在移动机器人直接奔向参考路径的情况下提高横向偏差的控制权重.

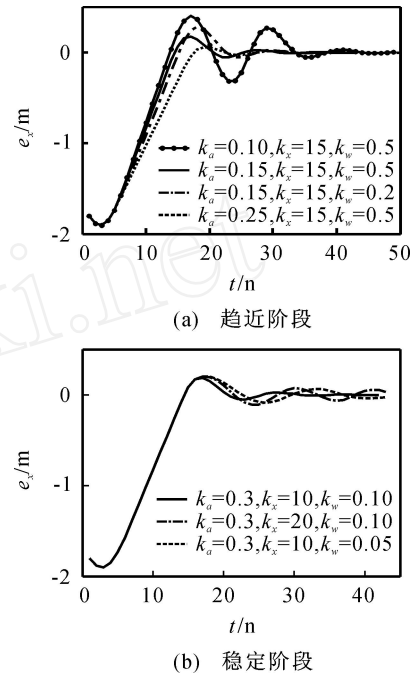


图 3 不同比例因子时系统响应比较

从图 3(a) 可看出, 当  $k_a$  取值较大 ( $k_a = 0.25$ ) 时,  $e_x$  的超调小, 但系统的响应太慢, 应减小  $k_a$ ; 但如果  $k_a$  过小 ( $k_a = 0.10$ ), 将因为角度纠偏的权重太小而使得系统超调增大; 固定  $k_a$  和  $k_x$  ( $k_a = 0.15, k_x = 15$ ), 观察  $k_w$  对响应性能的影响, 可以看出  $k_w$  取较小值 ( $k_w = 0.20$ ) 的响应不但趋近速度慢, 而且由于控制量不足使得系统超调增大. 因此, 趋近阶段的比例因子整定为:  $k_a = 0.15, k_x = 15, k_w = 0.50$ .

图 3(b) 是稳定阶段的响应对比. 该阶段移动机器人主要的纠偏任务是抑制它在参考路径左右两个方向上摆动的幅度和频率, 因此要增大  $k_a$ . 此时若同时增大  $k_x$  ( $k_x = 20$ ), 则系统的超调将随之增大, 因而应减小  $k_x$  的值. 同样, 若保持  $k_w$  不变, 系统的超调也将增大, 同时使得系统进入稳态的时间被延迟; 反之, 如果  $k_w$  太小 ( $k_w = 0.05$ ), 则由于控制量不足也会存在相同的缺点. 因此, 稳定阶段的比例因子整定为:  $k_a = 0.30, k_x = 10, k_w = 0.10$ . 整定后的比例因子值如表 2 所示.

表 2 比例因子整定表

	$k_a$	$k_x$	$k_w$
趋近阶段	0.15	15	0.50
稳定阶段	0.30	10	0.10

## 4 路径跟踪实验及结果分析

按所提出的控制策略进行移动机器人路径跟

踪的仿真和实际控制实验.

首先,针对文献[12]获得的规划路径进行跟踪控制的仿真实验.图4给出了对环境一段参考路径的仿真实验跟踪结果.仿真实验中,减速比取3,机器人巡航速度 $V = 0.4 \text{ m/s}$ ,初始方位角 $\theta = 0$ ,控制周期 $T_c = 0.5 \text{ s}$ .其中:图4(a)是路径跟踪的全局视图,图中带点的虚线是参考路径,实线是跟踪时车体中心的行走轨迹;图4(b)给出了整个跟踪过程的横向偏差 $e_x$ ;图4(c)是驱动左轮步进电机脉冲的频率.

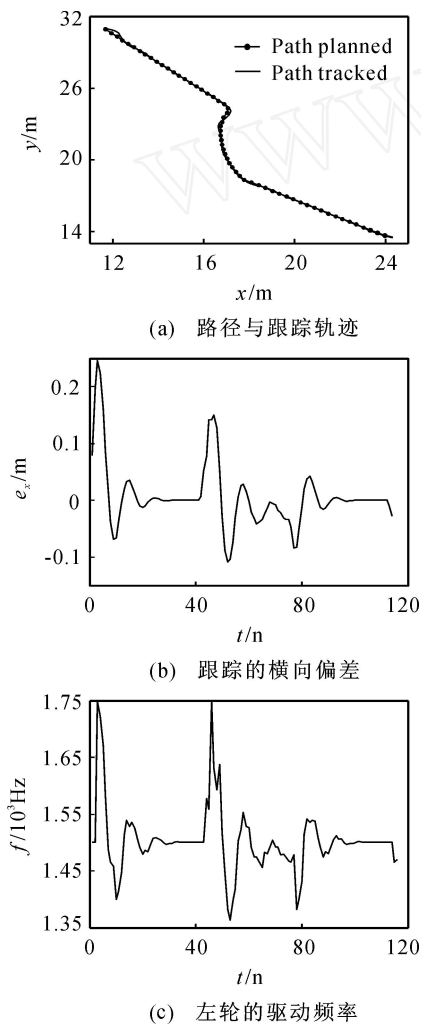


图4 参考路径跟踪过程

从跟踪过程可以看出,模糊控制能对曲折的路径实现稳定、平滑跟踪.横向误差曲线表明,在路径突然拐弯的地方跟踪误差较大,但能被迅速减小,在大部分路径比较平滑的地方跟踪误差小于 $0.1 \text{ m}$ .特别在跟踪几段近乎直线的路径时,误差接近于0.这说明比例因子整定后的分段模糊控制器具有响应速度快、超调小、稳定时间短的优点.

为探讨离散控制时不同传感采样速率下路径跟踪的效果变化,可改变控制周期或移动机器人巡航速度,增大速度即相当于增大了控制周期.仿真实

验表明,在巡航速度增大后,模糊控制虽仍可保证路径跟踪的稳定性,但跟踪偏差明显增大.因此,在控制周期比较大的情况下,巡航速度必须控制在较小的范围内,这样才能保证路径跟踪的效果,使机器人运行平稳.

用车载像机作为小车与参考路径偏差信息测量的传感器,利用本文的分阶段模糊控制器进行移动机器人路径跟踪的实际控制实验.实验过程如下:以室内地面上的黄色金属线条作为参考路径;用模板进行像机的内、外部(相对于路面)参数的标定;通过车载像机获得实时的地面图像,基于Canny算子进行边缘提取后,用Hough变换技术进一步提取出路径;由于像机参数已知,将所提取的路径通过坐标变换映射到地面固定坐标系,即可求出小车的实时横向偏差和航向偏差;之后,用本文提出的模糊控制器计算出控制量——两个电机的驱动脉冲频率.所采用的图像处理技术简单实用,其处理周期小于 $200 \text{ ms}$ ,因此设定整个系统的控制周期为 $0.2 \text{ s}$ .

图5是移动机器人跟踪前方路面上一条黄色金属线条(直线路径)期间,车体中心与金属线距离的分时记录.启动后移动机器人车体中心的线速度保持为 $0.4 \text{ m/s}$ ,执行机构没有减速装置.由于车载像机的视野有限,在起始时刻,车体航向偏差设定为 $1/6$ ,横向偏差的大小为 $15 \text{ cm}$ .从图5可以看出,小车运行稳定,跟踪的最大横向偏差发生在第1个峰值处.随着时间的推移,跟踪误差能迅速减小,7.5 s后跟踪误差已小于 $5 \text{ cm}$ .进入稳态后,稳定阶段的跟踪误差很小.实测表明,在此速度下,当直线段长度为 $2.5 \text{ m}$ 时,稳态跟踪误差小于 $1.5 \text{ cm}$ .由此可见,所提出的模糊控制很好地实现了移动机器人的路径跟踪.考虑到地面是凹凸的,而且系统中存在机械传动机构对位不精确等因素,说明模糊控制器有较好的鲁棒性和容错性.

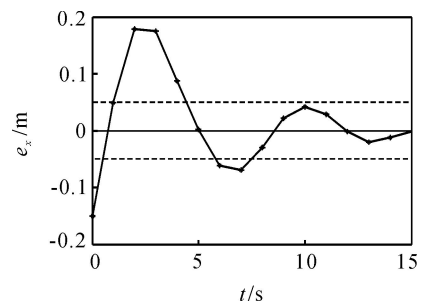


图5 一次实际实验中的横向偏差

## 5 结 论

为了实现非完整约束4轮移动机器人的路径跟踪控制,本文研究了分阶段模糊控制器的设计和模糊变量比例因子的整定.仿真和实际路径跟踪实验

表明,在整定后的分段模糊控制器作用下,移动机器人能快速纠偏,而且进入稳定阶段的时间短、稳态跟踪误差小.实际跟踪实验表明,分段模糊控制器鲁棒性强,能包容建模不精确带来的误差.

### 参考文献(References)

- [1] 王田苗. 走向产业化的先进机器人技术[J]. 中国制造业信息化, 2005, 34(10): 24-25.  
(Wang T M. Advanced robotic technology approaching industrialization [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2005, 34(10): 24-25.)
- [2] Caracciolo L, De L A, Iannitti S. Trajectory tracking control of a four-wheel differentially driven mobile robot [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Detroit, 1999, 4: 2632-2638.
- [3] Su C Y, Stepanenko Y. Robust motion/force control of mechanical systems with classical nonholonomic constraints [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(3): 609-614.
- [4] Park K, Chung H, Lee J G. Point stabilization of mobile robots via state space exact feedback linearization [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Detroit, 1999, 4: 2626-2631.
- [5] 李世华, 田玉平. 非完整移动机器人的有限时间跟踪控制算法研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 750-754.  
(Li S H, Tian Y P. Finite time tracking control algorithm for nonholonomic mobile robots [J]. Control and Decision, 2005, 20(7): 750-754.)
- [6] Maaref H, Barret C. Sensor-based navigation of a mobile robot in an indoor environment [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 38(1): 1-18.
- [7] 吴忻生, 任华瑛. 非完整移动机器人轨迹跟踪的最优模糊控制[J]. 华南理工大学学报, 2004, 32(3): 44-49.  
(Wu X S, Ren H Y. An optimized fuzzy control approach to the trajectory tracking of nonholonomic mobile robots [J]. J of South China University of Technology, 2004, 32(3): 44-49.)
- [8] 胡跃明, 谭慧琼, 李迪. 基于非线性系统相对度的学习控制算法及在非完整移动机器人中的应用[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(5): 662-668.  
(Hu Y M, Tan H Q, Li D. Learning control algorithm based on relative degree of nonlinear systems with application to nonholonomic mobile robots [J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(5): 662-668.)
- [9] 邹细勇. 自主移动机器人的智能导航研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
(Zou X Y. Intelligent navigation research of autonomous mobile robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.)
- [10] 张颖伟, 王小刚, 王福利. 基于模糊自适应滑模的非线性系统的故障调节[J]. 控制与决策, 2005, 20(4): 408-411.  
(Zhang Y W, Wang X G, Wang F L. Fault accommodation for nonlinear systems using fuzzy adaptive sliding control [J]. Control and Decision, 2005, 20(4): 408-411.)
- [11] 高宪文, 赵亚平. 焦炉模糊免疫自适应 PID 控制的应用研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1346-1349.  
(Gao X W, Zhao Y P. Application research on fuzzy immune adaptive PID control in coke oven [J]. Control and Decision, 2005, 20(12): 1346-1349.)
- [12] Zou Xi-yong, Zhu Jing. Vector field based robot navigation using hybrid genetic/simulated annealing algorithm [J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(5): 657-663. )

(上接第 650 页)

- [9] Guo B Z, Han J Q, Xi F B. Linear tracking-differentiator and application to online estimation of the frequency of a sinusoidal signal with random noise perturbation [J]. Int J of Systems Science, 2002, 33(5): 351-358.
- [10] 王新华, 陈增强, 袁著祉. 全程快速非线性跟踪-微分器[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 875-878.  
(Wang X H, Chen Z Q, Yuan Z Z. Nonlinear tracking-differentiator with high speed in whole course [J]. Control Theory and Applications, 2003, 20(6): 875-878.)
- [11] Su Y X, Zheng C H, Mueller P C, et al. A simple improved velocity estimation for low-speed regions based on position measurements only [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(5): 937-942.