

文章编号: 1001-0920(2002)03-0301-05

非完整移动机器人的轨迹跟踪控制

李世华, 田玉平

(东南大学 自动控制系, 江苏 南京 210096)

摘要: 讨论基于运动学模型的非完整移动机器人的轨迹跟踪控制问题。在一定的假设条件下实现了全局指数跟踪, 该假设允许参考模型角速度和平移速度均趋于零, 并将该方法推广到动力学模型。仿真例子证明了该方法的有效性。

关键词: 移动机器人; 轨迹跟踪; 非完整系统; 运动学模型; 动力学模型

中图分类号: O 31 **文献标识码:** A

Trajectory tracking control of nonholonomic mobile robots

L I Shi-hua, T IAN Yu-ping

(Department of Automatic Control, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The trajectory tracking control problem of the kinematic model of a mobile robot with nonholonomic constraints is discussed. Given some mild conditions, the reference model can be globally tracked with exponential convergence. The method especially solves the tracking problem of the reference model whose angular velocity and linear velocity both tend to zero. The method is also extended to the dynamic extension model of nonholonomic mobile robots. Simulation results validate the theoretical results.

Key words: mobile robot; trajectory tracking; nonholonomic systems; kinematic model; dynamic model

1 引言

近年来, 非完整控制系统已成为机械控制系统研究的一个热点。作为一类典型的非完整系统, 移动机器人的镇定问题引起人们的广泛关注^[1, 2]。相对而言, 对非完整移动机器人的跟踪问题研究得则较少。根据参考轨迹是否为时间的函数, 跟踪控制可分为路径跟踪和轨迹跟踪。一般说, 对后者的研究要困难得多。本文主要研究移动机器人的轨迹跟踪控制问题。

文献[3]在对跟踪系统误差模型线性逼近的基

础上进行控制律设计, 由此得到的跟踪控制律只能保证局部跟踪。为了得到完全线性化模型及全局跟踪控制律, [4]利用微分平坦的概念, 引入动态反馈使得扩展系统完全线性化, 由此得到指数收敛的跟踪控制律。该类动态反馈方法不足之处是闭环系统存在奇异点, 并且动态控制器维数较高。一种对此改进的方法是[5, 6]提出的一维动态跟踪控制器方法, 由此得到的闭环系统无奇异点且为全局跟踪, 但该方法要求参考模型角速度不趋于零。[7, 8]利用 Lyapunov 直接方法和积分 backstepping 方法, 可对移动机器人以及更一般的模型链式系统进行全局跟

收稿日期: 2001-04-16; 修回日期: 2001-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(69974009); 国家攀登计划预选项目(970211017)

作者简介: 李世华(1975—), 男, 江西萍乡人, 讲师, 博士, 从事机器人控制、系统辨识、智能控制等研究; 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、鲁棒控制、混沌控制、机器人控制等研究。

踪控制,条件是参考模型的平移速度和角速度最多只能有一个趋于零。[9]将终端滑动模态方法应用于移动机器人的跟踪控制,使得对角速度不为零的参考模型,移动机器人在有限时间内完全跟踪。

综上所述,已有的非完整移动机器人全局跟踪方法或有奇异点,或无法适用于参考模型角速度趋于零或角速度与平移速度均趋于零的情况,跟踪问题还有许多难点未解决。本文以非完整移动机器人运动学模型为对象,对其全局跟踪问题进行研究。对满足一定条件的参考模型可以实现全局指数跟踪,其中包括参考模型角速度和平移速度均趋于零这类情况,并将该方法推广到动力学模型。仿真例子证明了该方法的有效性。

2 移动机器人模型及跟踪问题描述

本文研究对象为非完整移动机器人,其动力学特性由下列微分方程描述^[3]

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

其中, v 和 ω 分别为移动机器人的平移速度和转动速度, (x, y) 为机器人质心的笛卡儿坐标描述, θ 为其前进方向与 x 轴的夹角。对式(1)进行坐标与控制输入变换,可得如下三阶链式模型^[3]

$$\dot{x}_1 = u_1, \quad \dot{x}_2 = u_2, \quad \dot{x}_3 = x_2 u_1 \quad (2)$$

此时得到相应的跟踪误差模型

$$\begin{cases} \dot{x}_{1e} = u_1 - u_{1d}, & \dot{x}_{2e} = u_2 - u_{2d} \\ \dot{x}_{3e} = x_2 u_1 - x_2 u_{1d} = x_{2e} u_{1d} - x_2 (u_1 - u_{1d}) \end{cases} \quad (3)$$

跟踪问题描述为:寻找控制律 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$,使得对任意初始跟踪误差 $(x_{1e}(0), x_{2e}(0), x_{3e}(0))$,闭环系统轨迹一致有界并收敛于零。

3 跟踪控制律设计

3.1 运动学情况

本文对式(3)系统作如下假设:

假设1 $u_{1d}(t) = f(t)g(t)$, 这里对任意 $t \in [0, +\infty)$, 有 $f(t)$ 连续有界且 $f(t) > 0$; $\dot{f}(t)$ 连续有界且满足 $M_1 \leq \dot{f}_d(t) \leq M_2$, 其中 $f_d(t) = \dot{f}(t)/f(t)$, M_1 和 M_2 为常数。

假设2 $g(t), \dot{g}(t), \ddot{g}(t)$ 连续有界, 且存在常数 $G > 0$, 对任意 $\epsilon > 0$, 都存在 $t_1(\epsilon) > 0$, 使 $g(t)$ 满足

$$\int_0^t (G - g^2(\tau)) d\tau < \epsilon, \quad \forall t \geq t_1 \quad (4)$$

注1 假设1和假设2意味着可将 $u_{1d}(t)$ 分为两部分: $f(t)$ 与 $g(t)$ 。连续函数 $f(t)$ 在 $t \in [0, +\infty)$ 区间不过零点, 即 $f(t)$ 不变号, 在 $[0, +\infty)$ 区间恒大于零或恒小于零, 但 $f(t)$ 在 $t \rightarrow +\infty$ 时可以趋于零。这两个假设使得本文方法与[5~8]等文献的方法截然不同。根据假设1, 对任意 $t \in [0, +\infty)$, 易证必有 $M_1 > 0$, 且当 $f(t)$ 趋于零时, 必有 $M_1 < 0$ 。假设1实际上限制了被跟踪轨迹趋于零的速率不能比指数收敛更快, 因为我们所设计的系统, 其状态是指数收敛的。

注2 假设2意味着当 $t \rightarrow +\infty$ 时 $g(t)$ 不趋于零。因为若 $g(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow +\infty)$, 则不可能找到一个常数 $G > 0$ 使得式(4)满足, 而式(4)意味着 $g^2(t)$ 中可由一个正分量 G 来逼近, 随着时间增长, 逼近的累计误差 $\int_0^t (G - g^2(\tau)) d\tau$ 增长率比线性增长率慢, 工程中常见的满足假设2的有下列两种情况:

1) 任意 $g(t)$ 和 $\dot{g}(t)$ 连续有界, 周期为 $T > 0$ 的非零函数(包括 $g(t)$ 为常数的情况), 即 $g(t) = g(t + T)$ 。可以证明, 取 $G = \frac{1}{T} \int_0^T g^2(t) dt > 0$ 时, 假设2满足。

2) 若 $g(t)$ 连续有界, 极限 $\lim_{t \rightarrow +\infty} g^2(t)$ 存在且为有界的正的常数, 取 $G = \lim_{t \rightarrow +\infty} g^2(t)$ 时, 假设2满足。

注3 将参考信号 $u_{1d}(t)$ 分为两部分, 原因是当 $u_{1d}(t) \rightarrow 0$ 时, 很难直接利用该信号进行控制。若将该信号分为两部分, 一部分为 $t \rightarrow +\infty$ 时趋于零但在 $[0, +\infty)$ 不过零的 $f(t)$, 而另一部分为允许过零但在 $t \rightarrow +\infty$ 时不趋于零的有界信号 $g(t)$ 。因为 $f(t)$ 不过零, 这样可以利用一种“除法”的坐标变换从 $u_{1d}(t)$ 中“除”去 $f(t)$, 由于剩下的 $g(t)$ 信号不趋于零, 当其满足假设2时, 可以从中提取出有用分量 G 进行控制。而当 $u_{1d}(t)$ 不趋于零时, $f(t)$ 可看成是常数, 只要 $g(t)$ 信号满足假设2, 同样可以采用该方法。

对系统(3)采用坐标变换

$$y_{1e} = x_{1e}, \quad y_{2e} = x_{2e}, \quad y_{3e} = x_{3e}/f \quad (5)$$

整理得

$$\begin{cases} \dot{y}_{1e} = u_1 - u_{1d}, & \dot{y}_{2e} = u_2 - u_{2d} \\ \dot{y}_{3e} = g(t)y_{2e} - \frac{\dot{f}(t)}{f(t)}y_{3e} + \frac{(x_{2d} + y_{2e})(u_1 - u_{1d})}{f} \end{cases} \quad (6)$$

对给定的 $f(t)$, 设计 u_1 使得 $y_{1e}(t)$ 收敛于零并使 $\Psi(t) = (u_1 - u_{1d})/f \quad 0$ 。此处不妨取

$$u_1 = u_{1d} - k_4 y_{1e}, \quad k_4 > -M_1 \quad (7)$$

则有

$$y_{1e}(t) = y_{1e}(0)e^{-k_4 t} \quad 0, \quad t \quad (8)$$

易得

$$|\Psi(t)| \leq k_4 \left| \frac{y_{1e}(0)}{f(0)} \right| e^{-(k_4 + M_1)t} \quad (9)$$

对 $u_1(t)$ 采用上述设计使得 $y_{1e}(t)$ 指数收敛于零, 此时系统(6)中另外两个状态 $(y_{2e}(t), y_{3e}(t))$ 组成的子系统, 可看成一个带时变扰动的线性时变系统, 即

$$\begin{cases} \dot{y}_{2e} = u_2 - u_{2d} \\ \dot{y}_{3e} = (g(t) + \Psi(t))y_{2e} - f_d(t)y_{3e} + x_{2d}(t)\Psi(t) \end{cases} \quad (10)$$

令 $y = y_{2e} + k_3 g(t)y_{3e}$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{y} &= u_2 - u_{2d} + k_3 g(t)y_{3e} + \\ &k_3 g(t)((g(t) + \Psi(t))y_{2e} - \\ &f_d y_{3e} + x_{2d}(t)\Psi(t)) \end{aligned}$$

取

$$u_2 = u_{2d} - k_3 g(t)y_{3e} - k_3 g(t) \times ((g(t) + \Psi(t))y_{2e} + f_d y_{3e} + x_{2d}(t)\Psi(t)) - ky \quad (11)$$

其中 $k > 0$, 则有

$$\dot{y} = -ky \quad (12)$$

引理 1 在假设 1 和假设 2 下, 考虑如下系统

$$\dot{x} = (-k_3 g^2(t) - k_3 g(t)\Psi(t) - f_d)x + \tilde{\Psi}(t) \quad (13)$$

其中, $|\tilde{\Psi}(t)| \leq C_1 e^{-\lambda t}$, $C_1 > 0, \lambda > 0$ 。当 $k_3 > -M_1/G$ 时, $x(t)$ 一致有界并且指数收敛于零。

证明 系统(13)的状态转移矩阵为 $\Phi(t) = e^{\int_0^t (-k_3 g^2(\tau) - k_3 g(\tau)\Psi(\tau) - f_d(\tau))d\tau}$ 。由假设 1 和假设 2, 对所有 t

$$\begin{aligned} t_1 \in \Theta, \text{ 有} \\ \int_0^t (-k_3 g^2(\tau) - k_3 g(\tau)\Psi(\tau) - f_d(\tau))d\tau \\ < -(k_3 G + M_1 - k_3 \Theta)t + k_3 M_0 C_1 / \lambda \quad (14) \end{aligned}$$

由假设 $k_3 > -M_1/G$, 取 ϵ 满足 $0 < \epsilon < (k_3 G + M_1)/k_3$, 则有 $\mu = k_3 G + M_1 - k_3 \epsilon > 0$ 。令 $C_2 = e^{k_3 M_0 C_1 / \lambda}$, 则系统(13)的状态转移矩阵有关系式 $\Phi(t) = C_2 e^{-\mu t}, t \geq t_0$ 。系统(13)的解可表示为

$$x(t) = \Phi(t)x(0) + \int_0^t \Phi(t-\tau)\tilde{\Psi}(\tau)d\tau \quad (15)$$

且有

$$\Phi(t_1)x(t) =$$

$$\Phi(t)x(t_1) + \int_{t_1}^t \Phi(t-\tau)\tilde{\Psi}(\tau)d\tau \quad (16)$$

由式(16)得

$$|\Phi(t)x(t)| \leq |\Phi(t)x(t_1)| + \int_{t_1}^t |\Phi(t_1+t-\tau)| |\tilde{\Psi}(\tau)| d\tau \quad (17)$$

式(17)又可写成

$$|\Phi(t)x(t)| \leq C_2 e^{-\mu t} (|x(t_1)| + e^{-\mu t_1} C_1 \int_{t_1}^t e^{\mu \tau} d\tau) \quad (18)$$

不等式(18)右边可写成

$$C_2 e^{-\mu t} (|x(t_1)| + e^{-\mu t_1} C_1 \int_{t_1}^t e^{\mu \tau} d\tau) = \begin{cases} C_2 e^{-\mu t} (|x(t_1)| + C_1 e^{-\mu t_1} (t - t_1)), & \mu = \lambda \\ C_2 (e^{-\mu t} |x(t_1)| + \frac{C_1 e^{-\mu t_1}}{\mu - \lambda} (e^{-\lambda t} - e^{-\mu t} e^{\mu t_1})) & \mu \neq \lambda \end{cases} \quad (19)$$

由式(15)可以看出 $x(t_1)$ 有界。由式(18)和(19), $\Phi(t)x(t)$ 一致有界且指数收敛于零。因为 $\Phi(t)$ 为有界的正常数, 所以 $x(t)$ 亦一致有界且指数收敛于零。

定理 1 在假设 1 和假设 2 下, 当 $x_{2d}(t)$ 有界且 $k > 0, k_4 > -M_1, k_3 > -M_1/G$ 时, 控制律(7)和(11)使得系统(3)中状态一致有界且满足状态指数趋于零, 即系统(1)一致跟踪系统(2)且跟踪误差指数收敛到零。

证明 采用式(5)坐标变换将系统(3)变换成系统(6)。当 $k_4 > -M_1$ 时, 式(7)控制律 $u_1(t)$ 使得状态 $y_{1e}(t)$ 即 $x_{1e}(t)$ 一致有界并指数收敛于零。根据式(12)有 $y(t) = y(0)e^{-kt}$, 代入式(10)有

$$\begin{aligned} \dot{y}_{3e} &= (-k_3 g^2(t) - k_3 g(t)\Psi(t) - f_d)y_{3e} + \\ &(g(t) + \Psi(t))y(0)e^{-kt} + x_{2d}(t)\Psi(t) \quad (20) \end{aligned}$$

令 $\tilde{\Psi}(t) = (g(t) + \Psi(t))y(0)e^{-kt} + x_{2d}(t)\Psi(t)$, 因为 $g(t)$ 和 $x_{2d}(t)$ 为有界函数, 令 $|x_{2d}(t)| \leq M_4, |g(t)| \leq M_6$ 。由式(9)得

$$\begin{aligned} |\tilde{\Psi}(t)| \\ \left(M_0 + k_4 \left| \frac{y_{1e}(0)}{f(0)} \right| e^{-(k_4 + M_1)t} \right) y(0)e^{-kt} + \\ M_4 k_4 \left| \frac{y_{1e}(0)}{f(0)} \right| e^{-(k_4 + M_1)t} \end{aligned}$$

取 $\lambda = \min\{k, k_4 + M_1\} > 0$, 易知存在常数 $C_1 > 0$, 使得 $|\tilde{\Psi}(t)| \leq C_1 e^{-\lambda t}, \forall t \geq 0$.

对式(20)应用引理1, 则当 $k_3 > -M_1/G$ 时, y_{3e} 为一致有界且指数趋于零. 因为 $f(t)$ 为有界函数, 所以 $x_{3e} = f(t)y_{3e}$ 亦为一致有界且指数趋于零. 此时, $x_{2e} = y_{2e} = y - k_3g(t)y_{3e}$ 亦为一致有界且指数趋于零. 利用式(3)坐标变换的反变换, 易得系统(1)一致跟踪系统(2)且跟踪误差指数收敛到零.

注4 对跟踪控制律(7)和(11), 采用坐标变换的反变换^[3]即可得到关于原系统坐标描述的控制律. 此略.

3.2 动力学情况

考虑非完整移动机器人的动力学简化情况, 即系统(3)加上两个积分器

$$\begin{cases} \dot{x}_{1e} = u_1 - u_{1d}, & \dot{x}_{2e} = u_2 - u_{2d} \\ \dot{x}_{3e} = x_{2e}u_{1d} - x_{2e}(u_1 - u_{1d}) \\ u_1 = v_1, & u_2 = v_2 \end{cases} \quad (21)$$

此时控制输入为 v_1 和 v_2 , 可看成是施加在非完整移动机器人的广义力或广义力矩.

对系统(21)采用与式(5)相同的坐标变换, 整理得

$$\begin{cases} \dot{y}_{1e} = u_1 - u_{1d}, & \dot{y}_{2e} = u_2 - u_{2d} \\ \dot{y}_{3e} = g(t)y_{2e} - \frac{f(t)}{f(t)}y_{3e} + \frac{(x_{2d} + y_{2e})(u_1 - u_{1d})}{f} \\ u_1 = v_1, & u_2 = v_2 \end{cases} \quad (22)$$

设计 v_1 使得 $y_{1e}(t)$ 收敛于零并使 $\Psi(t) = (u_1 - u_{1d})/f$. 此处不妨取

$$v_1 = u_{1d} - k_5k_6y_{1e} - (k_5 + k_6)(u_1 - u_{1d}) \quad (23)$$

$k_6 > k_5 > -M_1 > 0$

则有 $\ddot{y}_{1e} + (k_5 + k_6)\dot{y}_{1e} + k_5k_6y_{1e} = 0$, 因此

$$\begin{aligned} u_1 - u_{1d} &= y_{1e}(t) = \\ C_5 e^{-k_5 t} + C_6 e^{-k_6 t} &= 0, \quad t \end{aligned}$$

其中 C_5 和 C_6 为与初值 $y_{1e}(0)$ 和 $\dot{y}_{1e}(0)$ 有关的常数. 由此推出 $|\Psi(t)| \leq C_7 e^{-(k_5 + M_1)t}$, 其中 C_7 为某个与初值有关的有界正的常数.

对 $v_2(t)$ 采用上述设计, 使得 $y_{2e}(t)$ 指数收敛于零, 此时系统(22)中其它状态组成的子系统为

$$\begin{cases} \dot{y}_{2e} = u_2 - u_{2d} \\ \dot{y}_{3e} = (g(t) + \Psi(t))y_{2e} - f_d(t)y_{3e} + x_{2d}(t)\Psi(t) \\ \dot{v}_2 = u_2 \end{cases} \quad (24)$$

令 $y = y_{2e} + k_3g(t)y_{3e}$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{y} &= v_2 - u_{2d} + [k_3g(t)y_{3e} + \\ &k_3g(t)((g(t) + \Psi(t))y_{2e} - \\ &f_d y_{3e} + x_{2d}(t)\Psi(t))] \end{aligned}$$

取

$$\begin{aligned} v_2 &= u_{2d} - [k_3g(t)y_{3e} + k_3g(t)((g(t) + \\ &\Psi(t))y_{2e} - f_d y_{3e} + x_{2d}(t)\Psi(t))] - \\ &k_7k_8y - (k_7 + k_8)y \end{aligned} \quad (25)$$

其中 $k_8 > k_7 > 0$, 则有

$$\dot{y} + (k_7 + k_8)y + k_7k_8y = 0$$

定理2 在假设1和假设2下, 当 $u_{1d}(t), u_{2d}(t), x_{2d}(t)$ 有界, 且 $k_8 > k_7 > 0, k_6 > k_5 > -M_1, k_3 > -M_1/G$ 时, 控制律(23)和(25)使得系统(21)中状态一致有界且满足状态指数收敛.

证明与定理1的证明过程类似, 此略.

4 仿真结果

选取参考输入 $v_d = e^{-0.5t} \sin 0.5t$ m/s, $\omega_d = e^{-0.5t} \sin 0.5t$ rad/s, 此时参考模型轨迹为 $x_d(t) = \sin \theta_d(t) - \sin \theta_d(0) + x_d(0), y_d(t) = -\cos \theta_d(t) + \cos \theta_d(0) + y_d(0), \theta_d(t) = [1 - (\sin 0.5t + \cos 0.5t) \times e^{-0.5t}] + \theta_d(0)$.

相应地有 $u_{1d} = \omega_d$ rad/s, $u_{2d} = \omega_d (\cos(\theta_d(t) - \theta_d(0)) - x_d(0) \sin \theta_d(t) + y_d(0) \cos \theta_d(t))$ m/s. 注意

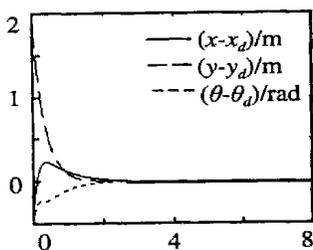


图1 跟踪误差曲线

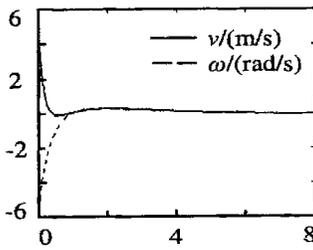


图2 控制量变化曲线

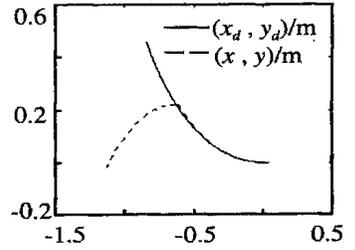


图3 平面跟踪轨迹

$x_{2d}(t)$ 有界, $u_{2d}(t)$ 和 $u_{1d}(t)$ 趋于零。

取初值 $x_d(0) = -0.8415\text{m}$, $y_d(0) = 0.4597\text{m}$, $\theta_d(0) = -1.0\text{rad}$, $x(0) = -1.1313\text{m}$, $y(0) = -0.0165\text{m}$, $\theta(0) = 0.8\text{rad}$, 即 $x_{1e}(0) = 1.8\text{rad}$, $x_{2e}(0) = 0.0415\text{m}$, $x_{3e}(0) = -1.2597\text{m}$ 。采用控制律(7)和(11), 这里, $f(t) = e^{-0.5t}$, $f_d = -0.5$, $M_1 = -0.5$, $g(t) = \sin 0.5t$, $G = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \sin^2 0.5t dt = 1/2$ 。选取参数 $k = 2.5$, $k_3 = 2 > -M_1/G = 1$, $k_4 = 3 > -M_1$, 仿真结果如图1~图3所示。由图3可以看出, 系统轨迹最终跟踪参考轨迹收敛到原点, 实现了逼近参考轨迹基础上的镇定。

5 结 论

本文对基于运动学模型的非完整移动机器人的全局跟踪问题进行研究, 对满足假设的一类参考模型可实现全局指数跟踪。尤其是对参考轨迹趋于静止的情况, 对参考轨迹的成功跟踪相当于实现了在逼近给定轨迹基础上的镇定问题。仿真例子证明了该方法的有效性。目前, 本文方法只考虑了低阶非完整系统的轨迹跟踪问题, 高阶情况将是今后进一步研究的课题。

参考文献(References):

[1] Kolmanovsky I, McClamroch N H. Developments in nonholonomic control problem [J]. IEEE Control Sys-

tem Magazine, 1995, 15(6): 20-36

- [2] Tian Y P, Li S. Smooth exponential stabilization of nonholonomic systems via time-varying feedback [A]. Proc of IEEE Conf on Decision and Control [C]. Sydney: Casual Production Pty Ltd, 2000. 1912-1917.
- [3] 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.
- [4] D Andrea-Novel B, Campion G, Bastin G. Control of nonholonomic wheeled mobile robots by state feedback linearization [J]. Int J of Robotics Research, 1995, 14(6): 543-559.
- [5] 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 (Acta Autom Sinica), 2000, 26(1): 1-6.
- [6] 董文杰, 霍伟. 链式系统的轨迹跟踪控制 [J]. 自动化学报 (Acta Autom Sinica), 2000, 26(3): 310-316.
- [7] Jiang Z P, Nijmeijer H. Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping [J]. Automatica, 1997, 33(7): 1393-1399.
- [8] Jiang Z P, Nijmeijer H. A recursive technique for tracking control of nonholonomic systems in chained form [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1999, 44(2): 265-279.
- [9] 李世华, 田玉平. 移动小车的轨迹跟踪控制 [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2000, 15(5): 626-628.

(上接第300页)

参考文献(References):

- [1] Van H P. Constraint satisfaction in logic programming [M]. Cambridge: MIT Press, 1989. 61-65.
- [2] Panwalker S S, Iskander W. A survey of scheduling rules [J]. Operation Research, 1977, 25(1): 45-61.
- [3] Mesghouni K, Pesin P, Hammadi S, et al. GA-constraint logic programming hybrid method for job shop scheduling [A]. Re-engineering for Sustainable Industrial Production [M]. Great Britain: Chapman and Hall, 1997. 151-160.
- [4] Hoitomt D J, Luh P B, et al. A practical approach to job-shop scheduling problems [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, 9(1): 1-13.
- [5] Dincbas M, Simonis H, Van Hentenryck P. Solving

large combinatorial problems in logic programming [J]. J of Logic Programming, 1990, 8(1-2): 74-94.

- [6] Kowalski A R, Keuhner D. The semantic of predicate logic as programming language [J]. Int J of the ACM, 1976, 22: 733-742.
- [7] Colmerauer A. Equation and in-equation on finite and infinite trees [A]. Proc of the Int Conf on 5th Generation Computer Systems [C]. Tokyo, 1984. 85-99.
- [8] Robsin A J. A machine-oriented logic based on the resolution principle [J]. Int J of the ACM, 1965, 12(1): 23-41.
- [9] Fruhwirth T, Herold A, Kuchenhoff V, et al. Constraint logic programming—An informal introduction [A]. Logic Programming in Action [M]. Berlin: Springer, 1992. 3-35.