

履带式移动机器人轨迹跟踪研究

康亮 赵春霞 郭剑辉

(南京理工大学计算机与科学技术学院 南京 210094)

摘要 详细分析了履带式移动机器人的受力特点,提出了一种适宜进行控制器设计的履带移动机器人模型。根据履带式移动机器人动力学模型和运动学模型,设计了机器人的轨迹跟踪控制器。利用 Lyapunov 稳定判据证明控制器的全局稳定性。在控制器的设计中考虑了履带-地面作用,引入参数对其描述。考虑到机器人动力学约束,引入机器人速度、加速度控制策略以保证机器人运动平滑。仿真实验验证了该方法的有效性和全局收敛。

关键词 履带式移动机器人, 轨迹跟踪, 动力学模型

中图分类号 TP24 文献标识码 A

Trajectory Tracking for Tracked Mobile Robot

KANG Liang ZHAO Chun-xia GUO Jian-hui

(School of Computer Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract A kind of tracked mobile robot model that is suitable for the design of controller was proposed through analyzing the force characteristics of the tracked mobile robot. Based on the dynamic model and kinematic constraints of the tracked mobile robot, a trajectory tracking controller was designed. Stability of the rule was proved through the use of a Lyapunov function. Parameters were introduced to describe the track-soil interactions. Considering the dynamics of the mobile robot, the limited control strategy was introduced to guarantee the robot's smooth motion. The simulation results verify the effectiveness and global stability of this method.

Keywords Tracked mobile robot, Trajectory tracking, Dynamic model

移动机器人是一个典型的非完整性约束系统,这类系统的跟踪控制吸引了研究人员的广泛研究。国内外关于这方面的研究很多^[1-14],形成了许多控制方法,如用动态反馈线性化、Lyapunov 方法等方法实现移动机器人的跟踪控制。CMU 的 Omead Amidi 于 1990 年就在文献[1]中给出 3 种比较实用的跟踪控制器,并提出了一种纯追赶的方法。文献[2]给出了一个用于路径跟踪的 PID 控制器。Farzad^[3]对 WMR 轨迹跟踪的非线性进行完全或部分补偿而得到一个线性化解耦状态方程,进而利用线性控制方法进行了求解。针对终端滑模控制存在奇异性的缺陷,Feng^[4]等人通过重新设计切换面,提出了一种全局非奇异终端滑模控制器,可用于带参数不确定和外部扰动的二阶非线性动态系统。Ning Xi^[5]等人设计了“基于时间”的跟踪控制器,然后利用 STR 映射将此控制器转换成非时间参考的控制器。这种方法的实现较为复杂,不易找到合适的 STR 映射。

履带式移动机器人在复杂环境中具有良好的通过性能和越野机动性,更适合执行特殊任务。目前对于轮式机器人轨迹跟踪控制的研究比较多,履带式机器人具有其特殊性,研究的重点与难点是其动力学模型难以进行精确的数学描述。

履带移动机器人的运动由履带径向驱动力以及履带与地

面侧向摩擦力共同决定。由于摩擦力由履带移动机器人的线速度和角速度决定,履带移动机器人的侧向力平衡方程表现为不可积分的微分方程,即非完整性约束。另外,由于履带-地面作用的复杂性,以及土壤参数的不确定性,履带移动机器人的地面作用力很难得到准确估计。文献[8]借鉴状态反馈线性化的思路,研究了履带式机器人反馈控制问题。Zvi^[9]采用简化的侧向摩擦力动力学模型对履带车辆的轨迹规划控制进行了研究。Ahmad^[10]在基于简化模型的基础上,采用力-打滑线性化模型,运用轮式机器人的轨迹跟踪算法,对履带机器人进行了控制研究。文献[11]采用扩展卡尔曼滤波器对实验参数进行估计,利用获得的车体位置姿态进行预测,进而构造了履带机器人的运动控制算法。

目前对履带式移动机器人进行分析的方法,按照所用模型的不同^[8],主要分为两大类:第一类是将履带式移动机器人简化为轮式机器人模型,主要是利用现有的成熟的轮式机器人模型,这类方法的模型较为简单,但与实际的情况有较大的误差。第二类方法的模型考虑了履带与地面之间滑动摩擦力的影响,这类模型统称为滑动操纵模型,它是基于机器人动力学平衡方程建立的,与实际情况符合得很好^[12]。滑动操纵动力学模型在履带式车辆动力校核方面^[12,13]和履带机器人轨

收到日期:2008-07-28 返修日期:2008-10-19 本文受国家 863 高技术发展项目(2006AA04Z238),南京理工大学国防科技工业研究生创新基金(2007060007)资助。

康亮(1980-),男,博士生,主要研究方向为智能机器人、路径规划等,E-mail: kangliang_0912@yahoo.com.cn;赵春霞(1964-),女,博士,教授,主要研究方向为智能机器人、仿真系统等;郭剑辉(1982-),男,博士生,主要研究方向为滤波等。

迹规划方面^[9]已得到很好的应用,但在履带机器人轨迹跟踪控制领域的应用却不多见。而且目前的履带移动机器人轨迹跟踪算法大多是从机器人的运动学模型出发,较少考虑其动力学特性,往往难以实现良好的速度跟踪。即使考虑了动力学特性,但在实际应用中又难以获得机器人完整准确的模型。

本文分析了履带式移动机器人的运动受力特点,引入履带-地面相互作用关系,考虑滑移率的影响,建立了履带式移动机器人的动力学模型和运动学约束方程,给出了满足 Lyapunov 稳定判据的速度计算公式,考虑动力学约束对速度和加速度加以限制来保证机器人运动平滑,引入滑移参数设计控制变量。

1 移动机器人模型

1.1 动力学方程

假定刚性履带式移动机器人在水平面上运动,转向运动不剧烈。在履带式移动机器人上建立车载坐标系。坐标系原点位于机器人几何中心, x 轴沿中轴线指向前进方向。机器人转弯时,履带与地面之间发生相对滑动,过转动瞬心且平行于 y 轴的直线将履带分为前后两段。XOY表示履带机器人所在的世界坐标系。图1描述了履带式移动机器人在水平面内逆时针转向运动时的受力情况。直线运动时履带侧向不受力。

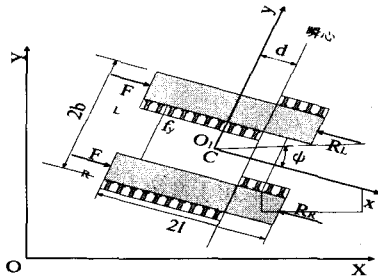


图1 受力分析

图中相关表示参数有: m 为履带机器人的质量; F_L, F_R 为左右履带的牵引动力; R_L, R_R 为左右履带的径向阻力; f_y 为履带侧向摩擦力; ψ 是移动机器人的方向角; I 为履带机器人的转动惯量; $2b$ 为两个履带之间的距离; d 为转动瞬心和质心在车载坐标系中的横轴距离; $2l$ 为履带触地长度。

通过对履带移动机器人的受力分析,机器人的动力学方程可以表示为

$$m\ddot{x} = F_L + F_R - R_L - R_R \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = 4f_y d \quad (2)$$

$$I\ddot{\psi} = (F_R - R_R)b - (F_L - R_L)b - 2f_y(l^2 - d^2) \quad (3)$$

其中,左右履带的阻力表达式为 $R_L = R_R = \mu_x mg/2$;侧向摩擦力计算表达式为 $f_y = \frac{\mu_y}{2l} mg$ 。这里的 μ_x 是履带径向摩擦力系数, μ_y 是履带侧向摩擦力系数。

左右履带的阻力方向与移动机器人前进方向相反,履带各点侧向摩擦力的方向取决于该点速度方向。

考虑履带与土壤的相互作用,有履带牵引动力的计算表达式为

$$F = F_{\max} \left[1 - \frac{k}{2l|i|} (1 - e^{-2l|i|/k}) \right] \cdot \text{sign}(i)$$

其中履带最大牵引力为

$$F_{\max} = A\tau_{\max} = A(c + p \tan\phi)$$

其中, τ_{\max} 为土壤最大剪切力; A 为履带触地面积; $p = mg/2A$ 为履带法向压强; c, ϕ, k 是相关的土壤参数,分别表示土壤合力、内在摩擦角和剪切变形系数; i 是履带滑移率。

从机器人运动学中,左右履带滑移率可以被定义为:

$$i_L = \frac{r\omega_L - (\dot{x} - b\dot{\psi})}{r\omega_L}, i_R = \frac{r\omega_R - (\dot{x} + b\dot{\psi})}{r\omega_R}$$

这里, ω_L, ω_R 是左右履带各自的角速度, r 是履带驱动轮半径。 i_L, i_R 分别表示左右履带相对于地面实际位移滑动参数。引入这两个参数的目的是为了对履带-地面之间的相互作用做一个估计。

这个动力学模型考虑了履带-地面之间的相互作用,引入了滑移率参数使得机器人动力学方程更加符合实际情况,拓展了模型的实际应用范围。

1.2 运动学方程

由图2的速度分析,根据上节引入的滑移率参数,履带移动机器人相应的运动学方程为:

$$\dot{x} = \frac{r}{2} [\omega_L(1 - i_L) + \omega_R(1 - i_R)] \quad (4)$$

$$\dot{y} = -\dot{x} \tan\alpha = -\dot{x}\sigma \quad (5)$$

$$\dot{\psi} = \frac{r}{2b} [\omega_R(1 - i_R) - \omega_L(1 - i_L)] \quad (6)$$

其中, $\sigma = \tan\alpha$ 。如图2所示, α 为移动机器人转向半径切线方向和机器人前进方向间的夹角。其他参数在上一节中都已说明。

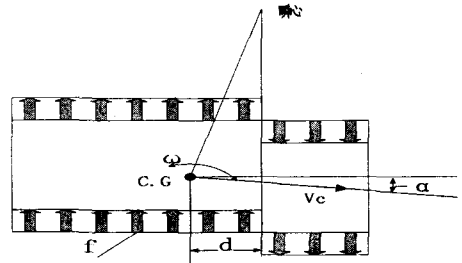


图2 速度分析

这里,履带移动机器人前进方向速度 $v = \dot{x}$,转向角速度 $\omega = \dot{\psi}$,左右履带速度分别为 $v_L = \omega_L r, v_R = \omega_R r$ 。

世界坐标系和车载坐标系之间可以通过矩阵 R 进行变换:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\psi - \alpha) & \sin(\psi - \alpha) & 0 \\ -\sin(\psi - \alpha) & \cos(\psi - \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通过上述的动力学方程(1-3)和运动学方程(4-6)及引入的滑移率参数定义,可以得到

$$\begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v - b\omega}{r(1 - i_L)} \\ \frac{v + b\omega}{r(1 - i_R)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1 - i_L)v_L + (1 - i_R)v_R}{2} \\ \frac{(1 - i_R)v_R - (1 - i_L)v_L}{2b} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 轨迹跟踪

所谓跟踪控制是指在控制系统驱动下,运动系统从任意

初始位置驶入规划好的航行路径,并沿此路径最终抵达目的地。

从动力学模型的第一个方程可知,移动机器人前进速度仅受到两条履带驱动力影响。根据模型中式(3),机器人方向角仅由这些力量的不同差别来控制。因此在轨迹跟踪问题中,需计算左右履带驱动力 F_L 和 F_R ,然后得到相应的输入角速度 ω_L 和 ω_R 。

机器人当前质心位姿 $p_c = (X_c, Y_c, \psi_c)$,期望目标位姿 $p_d = (X_d, Y_d, \psi_d)$,分别表示移动机器人质心和期望目标在世界坐标系中的位置坐标和方向夹角。位姿误差定义如下:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_c - \alpha) & \sin(\psi_c - \alpha) & 0 \\ -\sin(\psi_c - \alpha) & \cos(\psi_c - \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d - X_c \\ Y_d - Y_c \\ \psi_d - \psi_c \end{bmatrix} = R_e(p_d - p_c)$$

对上式求微分,有

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= (\dot{X}_d - \dot{X}_c)\cos(\psi_c - \alpha) + (\dot{Y}_d - \dot{Y}_c)\sin(\psi_c - \alpha) \\ &\quad - (X_d - X_c)\dot{\psi}_c\sin(\psi_c - \alpha) + (Y_d - Y_c)\dot{\psi}_c\cos(\psi_c - \alpha) \\ \dot{y}_e &= -(\dot{X}_d - \dot{X}_c)\sin(\psi_c - \alpha) + (\dot{Y}_d - \dot{Y}_c)\cos(\psi_c - \alpha) \\ &\quad - (X_d - X_c)\dot{\psi}_c\cos(\psi_c - \alpha) - (Y_d - Y_c)\dot{\psi}_c\sin(\psi_c - \alpha) \end{aligned}$$

化简得到

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= v_d \cos \psi_c - v_c + y_e \omega \\ \dot{y}_e &= v_d \sin \psi_c - x_e \omega \end{aligned}$$

整理后得到位姿误差微分方程为

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \omega y_e - v_c + v_d \cos \psi_c \\ -\omega x_e + v_d \sin \psi_c \\ \omega_d - \omega_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$q = (v_d, \omega_d)$ 为目标位姿的参考线速度与角速度,移动机器人跟踪控制器的任务就是根据输入的目标位姿参考车速与位姿误差,寻找合理的控制量 $g = (\omega_L, \omega_R)$,使得 p_e 有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} p_e = 0$ 。

参考文献[14]中的速度控制方程,采用式(10),则对于式(9)所描述的误差系统, $p_e = (0, 0, 0)$ 是其唯一的稳定平衡点,其中 k_x, k_y, k_ψ 为大于零的参数。

$$q_c = \begin{cases} v_d \cos \psi_c + k_x x_e \\ \omega_d + 2v_d k_y y_e \cos(\psi_c/2) + v_d k_\psi \sin(\psi_c/2) \end{cases} \quad (10)$$

收敛稳定证明如下:

取 Lyapunov 函数

$$V = x_e^2/2 + y_e^2/2 + 2(1 - \cos(\psi_c/2))/k_y$$

由式(9),对 Lyapunov 函数取微分,有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \sin(\psi_c/2)\dot{\psi}_c/k_y \\ &= x_e(y_e \omega_c - v_c + v_d \cos \psi_c) + y_e(-x_e \omega_c + v_d \sin \psi_c) + \sin(\psi_c/2)(\omega_d - \omega_c)/k_y \\ &= -X_c v_c + X_c v_d \cos \psi_c + Y_c v_d \sin \psi_c + \sin(\psi_c/2)(\omega_d - \omega_c)/k_y \end{aligned}$$

将式(10)代入上式,得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -x_e(v_d \cos \psi_c + k_x x_e) + x_e v_d \cos \psi_c + y_e v_d \sin \psi_c + \sin(\psi_c/2)2v_d y_e \cos(\psi_c/2) + \sin(\psi_c/2)v_d k_\psi \sin(\psi_c/2)/k_y \\ &= -k_x x_e^2 - v_d k_\psi \sin^2(\psi_c/2)/k_y \leq 0 \end{aligned}$$

因此由 Lyapunov 稳定判据可知全局范围内当 k_x, k_y, k_ψ 大于零, v_d 非负时 p_e 有界,且 $\lim_{t \rightarrow \infty} p_e = 0$ 。

根据式(10)得出了当前移动机器人所需的线速度和角速度。分析履带移动机器人动力学模型,考虑实际应用中的速度约束,这里存在有速度限制。

此时可将机器人运动误差分解为3个部分:方向误差、距离误差和速度误差。考虑将误差降为最小,形式为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (e_\psi, e_l, e_v) = 0$$

这里, $e_\psi = p_e(3)$ 是方向角误差,为履带机器人实际方向与期望目标方向间的夹角; $e_v = v_d - v_c$ 是速度误差; $e_l = \sqrt{p_e(1)^2 + p_e(2)^2}$ 是距离误差,为履带机器人与期望目标的最小距离。

为了使运动误差趋近零,满足移动机器人动力学模型和速度限制,有以下误差方程:

$$\dot{e}_\psi + \dot{e}_\psi + k_{\psi 1} e_\psi + \frac{k_{\psi 1}}{x_d} e_l = 0$$

$$\dot{e}_v + k_{v 1} e_v + k_{v 2} \int e_v dt = 0$$

其中, $k_{\psi 1}, k_{\psi 2}, k_{v 1}, k_{v 2}$ 是正的常数,确定了每一个动力学闭环极点的位置。

定义 $\bar{F}_L = F_L - R_L, \bar{F}_R = F_R - R_R$ 是左右履带的净拉力。

如果期望速度和方向角速度的导数不很大,就是说 $\dot{v}_d \approx 0, \dot{\psi}_d \approx 0$ 。这导致如下方程:

$$\bar{F}_{v,d} \equiv \bar{F}_{L,d} + \bar{F}_{R,d} = M(k_{v 1} e_v + k_{v 2} \int e_v dt)$$

$$\bar{F}_{\psi,d} \equiv \bar{F}_{L,d} - \bar{F}_{R,d} = -\frac{I}{b} \left(\frac{k_{\psi 1}}{x_d} e_l + \dot{e}_\psi + k_{\psi 2} e_\psi \right)$$

从上两个方程中可知,期望的左右履带净拉力可以为

$$\bar{F}_{L,d} = \frac{\bar{F}_{v,d} + \bar{F}_{\psi,d}}{2}, \bar{F}_{R,d} = \frac{\bar{F}_{v,d} - \bar{F}_{\psi,d}}{2}$$

结合履带移动机器人的动力学方程和运动学方程,经过反运算得出两条履带的角速度控制量 $g = (\omega_L, \omega_R)$ 。控制器接受输入参考左右履带驱动轮角速度和位姿误差,给出控制器输出,经过实际执行反馈到输入端,执行机构驱动履带机器人跟踪期望轨迹运动,最终到达目标点。

考虑到机器人运动过程的动力学特性,移动机器人系统的速度或加速度太大将会引起机器人运动打滑,为此,需要对速度加以控制,保证机器人运动平滑:

$$v_c = \begin{cases} v_c + \text{sign}(v_c - v_e) \dot{v}_{\max} dt, & \text{if } (|v_c| > |\dot{v}_{\max}|) \\ \text{sign}(v_c) v_{\max}, & \text{if } (|v_c| > |v_{\max}|) \\ v_c, & \text{otherwise} \end{cases}$$

3 仿真实验

为了验证本文移动机器人模型和跟踪算法的有效性,用 Matlab 进行了仿真实验。履带移动机器人稳定行驶时速度为 0.32m/s,直线高速行驶时可达 1.0m/s,最大转动速度设置为 60°/s。实验中其他相关设置参数为 $k_x = 0.01, k_y = 0.005, k_\psi = 0.5, k_{\psi 1} = 0.33, k_{\psi 2} = 5, k_{v 1} = 30, k_{v 2} = 0.36, \mu_c = 0.1, m = 20\text{kg}, r = 0.1\text{m}, b = 0.3\text{m}, 2l = 1.0\text{m}$ 。

土壤参数为 $c = 1.04\text{kPa}, \phi = 0.4887\text{rad}, k = 1.0\text{cm}$ 。这里仅取干性沙地土壤作为例子,验证本文模型的有效性。实际运行中,可以根据环境不同采取不同的土壤参数。

首先验证对于直线轨迹的跟踪情况。设给定的期望轨迹

是 $x_d(t) = v_d t, y_d(t) = v_d t$, 得到一条斜率为 $\pi/4$ 的直线。实验中取 $v_d = 0.5 \text{ m/s}$, 初始状态参数为 $p_c = (1, 0, \pi/4)^T, p_d = (0, 0, \pi/4)^T$ 。前两个状态变量是履带式移动机器人在世界坐标系中的横纵坐标, 第三个状态变量为履带式移动机器人的方向角度。跟踪结果如图 3 所示。

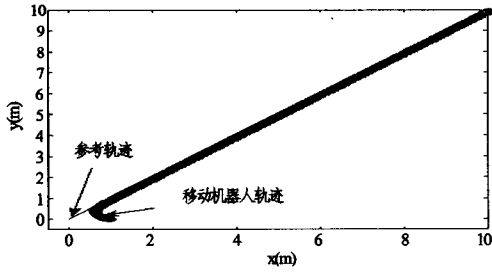


图 3 直线跟踪轨迹

从图 3 中可以看到履带式移动机器人能较好地跟踪期望的轨迹。这种运动的存在依赖于期望轨迹的方向、期望速度和参考点的位置。图 4 显示了跟踪过程中移动机器人位姿误差的变化情况。

图 4 中可以看到移动机器人系统在有起始误差的情况下, 通过本文的轨迹跟踪控制, 系统在短暂时间内就进入稳态, 初始跟踪误差迅速收敛到零, 表明履带式移动机器人在本文设计的模型和跟踪控制下具有很好的轨迹跟踪性能, 而且动力学控制收敛速度快、鲁棒性强。图 5 是左右履带驱动轮的角速度在跟踪过程中的变化情况。

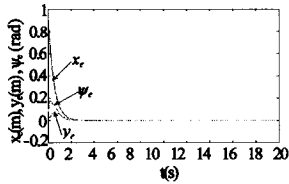


图 4 直线轨迹跟踪误差

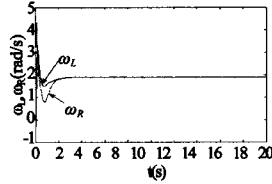


图 5 左右履带驱动轮角速度

从图 5 可以看到, 直线轨迹跟踪时履带式移动机器人的左右履带驱动轮控制角速度保持固定值, 以恒速行驶。行驶速度被限制在一个固定值范围内, 满足了机器人的动力学约束, 保证了机器人运动平滑。

图 6 是对圆弧轨迹进行跟踪的结果。设给定的期望轨迹是 $x_d(t) = R \cos(\omega_d t), y_d(t) = R \sin(\omega_d t)$, 得到半径 R 、角速度 ω_d 的圆形轨迹。实验中取 $R = 4.5 \text{ m}, \omega_d = 0.2 \text{ rad/s}$, 初始状态参数为 $p_c = (2.5, 0, \pi/2)^T, p_d = (4.5, 0, \pi/2)^T$ 。

可以看到对于圆弧轨迹, 移动机器人以稳定速度行驶, 同样能够快速收敛, 且具有很好的稳定性。图 7 是位姿误差的曲线, 收敛后稳态误差为零, 可以直观看到算法能保证全局稳定收敛。

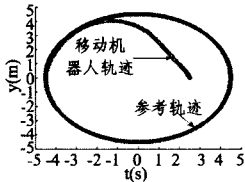


图 6 圆弧跟踪轨迹

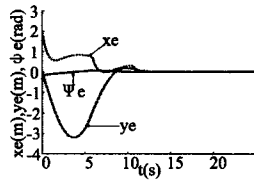


图 7 圆弧轨迹跟踪误差

从上述两种典型轨迹的跟踪实验结果曲线来看, 在跟踪速度和初始误差比较大的情况下, 机器人均能快速跟踪参考

轨迹, 使系统跟踪误差快速收敛, 证明本文建立的履带式移动机器人动力学模型和运动学模型是正确的, 相应的轨迹跟踪控制算法是合理可行的。

结束语 本文给出的履带移动机器人动力学模型较为准确地建模了履带移动机器人的动力特性, 考虑了履带与地面的相互作用关系和移动机器人的速度限制, 能准确反映出实验中履带移动机器人系统输入输出关系, 为后续的改进研究提供了基础。仿真结果表明, 根据该动力学模型提出的跟踪控制算法能够使移动机器人跟踪误差快速收敛。研究结果对履带移动机器人的整体建模和运动控制具有一定的指导意义, 同时对其他履带移动机器人的结构和控制器设计都有很好的借鉴意义。

参考文献

- [1] Amidi O. Integrated mobile robot control[R]. CMU-RI-TR-90-17. Robotics Institute, Carnegie Mellon Univ, 1990
- [2] Kanayama Y, Nilipour A, Lelm C. A locomotion control method for autonomous vehicles [C]// Proceedings of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 1988; 1315-1317
- [3] Farzad P, Mattias P K. Adaptive control of dynamic mobile robots with nonholonomic constraints [J]. Computers and Electrical Engineering, 2002(28): 241-253
- [4] Feng Y, Yu X, Man Z. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167
- [5] Wei K, Xi N, Tan J. Analysis and design of non-time based motion controller for mobile robots[C]// Proceedings of the 1999 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, 1999; 2964-2969
- [6] Hu T. Torque control design of nonholonomic mobile robots using a neural network based approach [D]. Guelph; University of Guelph, 2002
- [7] Qiang G. Tracking control of a mobile robot using neural dynamics based approaches [D]. Guelph; University of Guelph, 2001
- [8] 李岩, 杨向东, 陈愚. 履带式移动机器人动力学模型及其反馈控制[J]. 清华大学学报, 2006, 46(8): 1377-1380
- [9] Zvi S, William S, Minh H. Trajectory planning of tracked vehicles [C]// Proceedings of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation Atlanta, GA; IEEE Press, 1993; 796-801
- [10] Ahmad M I, Polotski V, Hurtera R. Path tracking control of tracked vehicles [C]// Proceedings of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA, 2000
- [11] Le A T, Rye D, Hugh F, et al. Estimation of track-soil interactions for autonomous tracked vehicles [C]// Proceedings of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, 1997; 1388-1393
- [12] Wong J Y, Chiang C F. A general theory for skid steering of tracked vehicles on firm ground [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D; Journal of Automobile Engineering, 2001, 215(3): 343-355
- [13] Weidong W, Zhijiang D, Lining S. Dynamic Load Effect on Tracked Robot Obstacle Performance [C]// Proceedings of International Conference on Mechatronics, Kumamoto Japan, 2007; 1-6
- [14] 吴卫国, 陈辉堂, 王月娟. 移动机器人的全局轨迹跟踪控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 326-331