

模块化移动机器人的无模型自适应控制研究*

王 永¹, 费燕琼^{1*}, 宋立博²

(1. 上海交通大学 机器人研究所, 上海 200240; 2. 上海交通大学 工程训练中心, 上海 200240)

摘要: 为研究无模型自适应(MFA)控制算法在机器人控制领域的应用,设计了差动驱动模块化移动机器人。在考虑非完整约束、MIMO、饱和约束等特点基础上,建立了以差动驱动电机脉宽调制(PWM)信号为输入、以机器人方位角和线速度为输出的无模型自适应控制系统;为提高运算速度并减少运算量,使用最小二乘原理设计了新的伪偏导数和控制律在线估计算法。仿真结果表明,该方法具有鲁棒性强、响应速度快及控制精度高的特点,其性能优于传统的PID控制。

关键词: 模块化移动机器人;无模型自适应控制;最小二乘法;伪偏导数;脉宽调制

中图分类号: TH39;TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0400-04

Study on control method of modular mobile robot based on MFA theory

WANG Yong¹, FEI Yan-qiong¹, SONG Li-bo²

(1. Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Engineering Training Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: For the study of model-free adaptive(MFA) control algorithm applied in the field of robot control, a modular differential-driven mobile robot was designed. Taking such factors as nonholonomic constraint, MIMO, capacity constraints and other characteristics into consideration, the model-free adaptive control system was established accordingly. The pulse width modulation(PWM) signals were used as inputs, the robot's azimuth and velocity were used as outputs. To improve processing speed and reduce the computation, the least squares principle was used to design a new pseudo-partial derivative and the control law online estimation algorithm. The simulation results show that the method has strong robustness, fast response, high accuracy and control features, its performance better than traditional PID control.

Key words: modular mobile robot; model-free adaptive(MFA) control; least squares; pseudo-partial derivative; pulse width modulation(PWM)

0 引 言

模块化移动机器人具有自身模块化和可重构性的特点。模块化设计简化了机器人结构,降低了成本,提高了系统的稳定性与可维护性。可重构性实现了不同作业构型之间的转换,使机器人可以根据周围环境和实际任务动态地改变自身结构与构型,具有较强的运动灵活性和环境适应能力,在多机器人协作、足球机器人等领域备受关注,并得到了广泛应用。

从动力学和控制系统角度讲^[1],模块化移动机器人系统具有如下特征:①多输入多输出(MIMO)系统

属性。在采用差动驱动时,一般有电机的PWM控制信号、倾角输入信号、方位角输出信号及速度输出等诸多信号;②动力学模型较为复杂。机器人中存在难以精确建模的滚动摩擦、滑动摩擦等因素及速度控制空间的协调函数(非完整约束),难以精确建立系统的动力学模型,从而增加了建立在模型基础之上的PID等控制算法的整定难度和设计过程^[2];③存在最大占空比和电机最大输出角速度及机器人最大运动速度等饱和约束,使系统存在较大的非线性。

鉴于以上特征,当前基于建立数学模型的控制算法研究多数存在局限性与不合理性,而MFA控制算法

收稿日期:2011-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775145)

作者简介:王 永(1987-),女,山东菏泽人,主要从事模块化移动机器人设计及控制方面的研究。E-mail:taifeng945@126.com

通信联系人:费燕琼,女,副教授,硕士生导师。E-mail:fyq@sjtu.edu.cn

已应用于多处工业控制当中,却未涉及机器人控制领域,综合MFA控制算法的优势,本研究提出将该算法应用到移动机器人控制领域。在国家自然科学基金项目赞助下,研究采样周期和非完整约束条件下的模块化移动机器人MFA控制系统设计和实现方法,并进行必要的仿真验证。

1 模块化移动机器人的结构

1.1 机械结构

模块化移动机器人由驱动模块、控制模块、传感模块及连接模块四大基本功能模块组成,机器人的模块化结构如图1所示。驱动主要由直流电机组成,采用差动驱动形式以获得全向运动能力。传感模块包括倾角传感模块、方位测量模块、无线数传单元等,来获得环境位置变化的信息。控制模块处理传感器采集到的数据并生成机器人动作命令,由驱动模块完成电机驱动。连接模块包括机械接口和电子接口等物理连接机构,便于模块间及机器人间的相互快速连接与脱离。

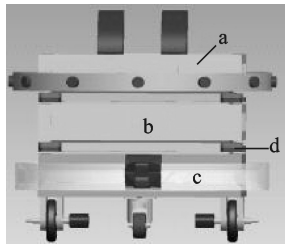


图1 机器人的模块化结构

a—传感模块;b—控制模块;c—驱动模块;d—连接模块

1.2 控制系统结构

控制系统采用TMS320F2812处理器为控制器。本研究运用TMS320F2812的事件管理器模块、PWM模块、SCI串口通讯模块、A/D模数转换模块等功能,结合外部无线数传单元、倾角传感模块、方位测量模块、电机驱动模块等模块完成模块化移动机器人的控制,模块化移动机器人控制系统亦采用模块化设计方法,其结构如图2所示。

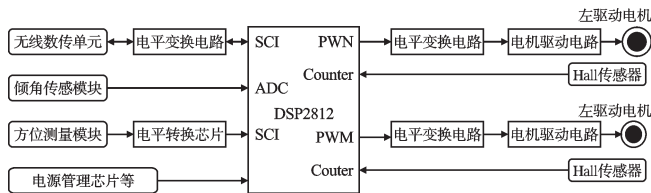


图2 控制系统结构图

2 模块化移动机器人MFA控制系统设计

在忽略滚轮与地面之间的相对滑动时,模块化移动机器人是一类典型的非完整动力学系统。由于非完

整系统不能用光滑定常的反馈控制律镇定^[3],必须设计时变或非连续的控制律来镇定系统。同时,受驱动器输出饱和的限制,实际系统的控制输入也是有界的,因此在考虑输入饱和约束条件和非完整约束条件下设计控制系统才有意义。

机器人的运动线速度 $v=(v_R+v_L)/2$,状态方程可使用非线性离散时间方程描述如下^[4]:

$$q(k+1)=f\left(\begin{matrix} q(k),q(k+1),\dots,q(k-n_q),u(k), \\ u(k+1),\dots,u(k-n_u) \end{matrix}\right) \quad (1)$$

式中: $q(k)$, $u(k)$ 一系统在 k 时刻的输出与输入, $q(k)=[v_k \ \theta_k]^T$, $u(k)=\begin{bmatrix} pr_k \\ pl_k \end{bmatrix}$; θ_k 一在 k 时刻的方位角输出; pr_k 、 pl_k 一右轮、左轮电机PWM信号值; n_q , n_u 一系统未知阶数; $f(\dots)$ 一未知的非线性函数。

pr_k 和 pl_k 满足输入饱和和约 $|pr_k| \leq pr_{max}$, $|pl_k| \leq pl_{max}$ 其中, pr_{max} 和 pl_{max} 为给定的正常数。

在输入饱和约束条件下,假设 $f(\dots)$ 关于系统当前的控制输入信号 $u(k)$ 的偏导数是连续的,式(1)满足对任意的 k 和 $\Delta u(k) \neq 0$,有:

$$|\Delta q(k+1)| \leq b|\Delta u(k)|$$

其中: $\Delta q(k+1)=q(k+1)-q(k)$, $\Delta u(k)=u(k)-u(k-1)$, b 是常数。

当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时,一定存在伪偏导数矩阵 $\varphi(k)$,满足:

$$\Delta q(k+1)=\varphi(k)\Delta u(k) \quad (2)$$

$$\varphi(k)=\begin{bmatrix} \varphi_{11}(k) & \varphi_{12}(k) & \dots & \varphi_{1m}(k) \\ \varphi_{21}(k) & \varphi_{22}(k) & \dots & \varphi_{2m}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{n1}(k) & \varphi_{n2}(k) & \dots & \varphi_{nm}(k) \end{bmatrix}$$

并且: $\|\varphi(k)\| \leq b$ 。

式(1)由式(2)替代之后,模块化移动机器人就转化为一个仅由系统输入、系统输出及状态矩阵组成的线性系统。无模型化的模块移动机器人控制系统结构如图3所示。由于无滚轮直径、滑动摩擦系数、差动驱动轮中心距离等机械结构与力学参数,可使用无模型自适应控制算法(MFA)设计控制系统^[5-6]。完整的

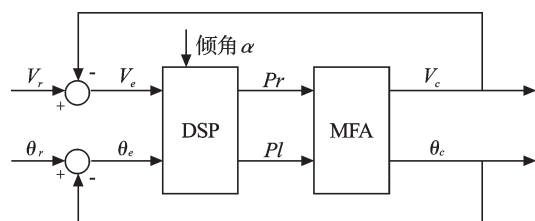


图3 控制系统结构简图

MFA 控制系统由控制律在线估计算法和偏导数在线估计算法两部分组成。

2.1 控制律在线估计算法

本研究考虑如下控制输入准则函数：

$$J(u(k)) = \left[\begin{aligned} &|q_r(k+1) - q(k+1)|^2 + \\ &|\lambda_k |u(k) - u(k-1)|^2 \end{aligned} \right] \quad (3)$$

其中， $\lambda_k |u(k) - u(k-1)|^2$ 项用来限制 $\Delta u(k)$ ，并克服稳态跟踪误差； $q_r(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻期望输出值，即系统参考输出； $\lambda_1(k), \lambda_2(k), \dots, \lambda_r(k)$ 是适当的参数。 $\lambda_k = \text{diag}(\lambda_1(k) \lambda_2(k) \dots \lambda_r(k))$ ，这是对角矩阵的标准表达形式。本研究将式(2)代入(3)，对 $u(k)$ 求导，并令其等于0，得：

$$u(k) - u(k-1) = \frac{\rho_k \varphi(k)}{\lambda_k + \varphi(k) \varphi(k)^T} [q_r(k+1) - q(k)] \quad (4)$$

式中： ρ_k 一步长矩阵。

2.2 伪偏导数在线估计算法

为改变估计值变化很快或对某些采样数据过于敏感的情形，并满足在线控制快速性要求，新的估计准则函数如下：

$$J(\varphi(k)) = \left[\begin{aligned} &(q_c(k) - q(k-1) - \varphi(k) \Delta u(k-1))^2 + \\ &\mu_k (\varphi(k) - \hat{\varphi}(k-1))^2 \end{aligned} \right] \quad (5)$$

式中： $q_c(k)$ 一系统真实输出， μ_k 一关于参数估计变化量的权重因子矩阵，用以限制非线性系统进行线性替代的范围， $\mu_k (\varphi(k) - \hat{\varphi}(k-1))^2$ 项的引入限制了 φ 的变化。

本研究通过变分原理和极小化推导过程，得到如下伪偏导数估计算法：

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu_k + \Delta u(k-1) \Delta u(k-1)^T} \quad (6)$$

$$(\Delta q(k) - \hat{\varphi}(k-1) \Delta u(k-1))^T$$

式中： ρ_k, η_k 一步长矩阵； μ_k 一权重因子矩阵； ε 一充分小的正数； $\hat{\varphi}(k)$ 一 $\varphi(k)$ 的在线实时估值； $\hat{\varphi}(1) - \hat{\varphi}(k)$ 的初值； $\rho_1(k), \rho_2(k), \dots, \rho_r(k), \eta_1(k), \eta_2(k), \dots, \eta_r(k) \in (0, 2)$ 。

为满足定理1的条件且使参数估计算法具有更强的时变参数跟踪能力， $\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(1)$ ， $\|\hat{\varphi}(k)\| \leq \varepsilon$ 或 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 。

该控制方案比传统的方案在线调整参数少，计算量小^[7]，系统伪偏导数是唯一在线调整的参数，因此能适应系统快速性要求，易于实现。

3 MFA 控制算法实现及仿真分析

3.1 控制流程

机器人系统在接收到期望输出值 q_r 信号后，设定坐标系，确定当前位置。该系统通过测速模块与方位测量模块获得当前速度与方位角，通过倾角传感模块获得当前倾角并判断机器人是否为防止后翻而改变速度大小；计算真实输出与期望输出值间的偏差，并判断是否为0。若偏差不为0，则通过DSP过程处理单元计算产生左、右两轮电机PWM信号，通过无模型自适应控制单元产生新的真实输出^[8]，通过相应的传感模块测得当前输出值并继续计算偏差是否满足要求，直到偏差为0。其流程图如图4所示。

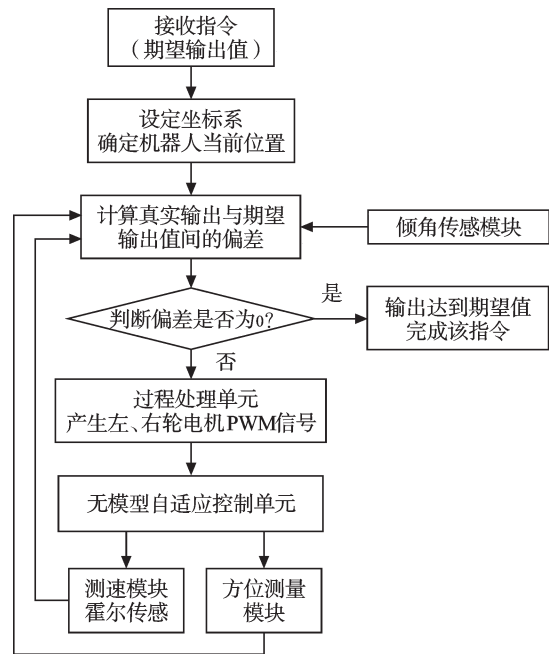


图4 模块化机器人控制流程示意图

3.2 算法实现

该系统输入有参考速度 v_r 、参考方位角 θ_r ，左、右轮电机PWM占空比信号 pl 、 pr ，还有倾角 α ，因 α 只用来防止机器人后翻，在控制算法实现中可暂不考虑。该系统的参考速度、参考方位角即为系统的期望输出，且在接收该指令时已为确定值。该系统的输出为真实速度 v_c 、真实方位角 θ_c 。由此可知要实现无模型自适应算法的系统为两输入/两输出。

3.3 仿真研究与稳定性分析

为简化计算，该系统仿真初值设为 $u(1) = u(2) = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix}$ ， $q(1) = q(2) = \begin{bmatrix} 30 \\ 2 \end{bmatrix}$ ， $\varphi(1) = \varphi(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，期望输出 $q_r = \begin{bmatrix} 500 \\ 30 \end{bmatrix}$ ，步长矩阵 $\rho_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ， $\eta_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

如果本研究设置权重因子矩阵 $\mu_k = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$, $\lambda_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 对MFA与PID控制进行比较, Matlab仿真结果如图5~8所示。

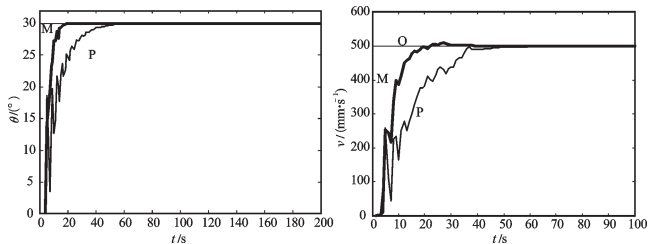


图5 MFA与PID控制比较下的方位角变化图 图6 MFA与PID控制比较下的速度变化图

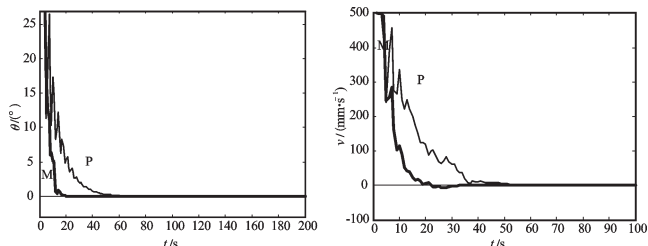


图7 MFA与PID控制比较下的方位角偏差图 图8 MFA与PID控制比较下的速度偏差图

在本研究中, PID方法采用的方式是根据只含比例控制的闭环特性来决定。PID参数由下式决定:

$$K_p = 0.6K_u, T_i = 0.5T_u, T_d = 0.25T_i \quad (7)$$

式中: K_u 、 T_u —在比例控制下闭环系统处于临界状态时的比例增益和振荡周期。

由于微分(D)控制有负载效应和增益损失, 该系统采用PI调节器进行仿真。仿真中参数整定采用试凑法, 且控制参数已调整到最佳。

从图中比较结果可以看出, 采用PID方法时, 在控制初始阶段振荡较大, 采用无模型自适应控制方案后, 系统的振荡得到了较好的控制, 系统输出的跟踪速度明显提高。

在以上仿真中, 当初始条件或者期望输出值发生变化时, 采用无模型自适应控制时, 无须对参数加以调整 ($\lambda_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mu_k = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$), 而采用PID控制时

必须对控制参数重新进行整定 ($K_p = 0.01$, $T_i = 2$)。采用无模型自适应控制时, 控制参数的小范围变化不会对控制效果产生比较大的不良影响, 而PID控制下, 控制参数的轻微变化都有可能

导致系统输出发生大幅度振荡甚至完全发散。当无模型自适应控制参数变为 $\lambda_k = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ 0 & 0.9 \end{bmatrix}$, $\mu_k = \begin{bmatrix} 0.09 & 0 \\ 0 & 0.09 \end{bmatrix}$, PID控制参数变为 $K_p = 0.02$, $T_i = 2$, 仿真结果如图9~10所示。

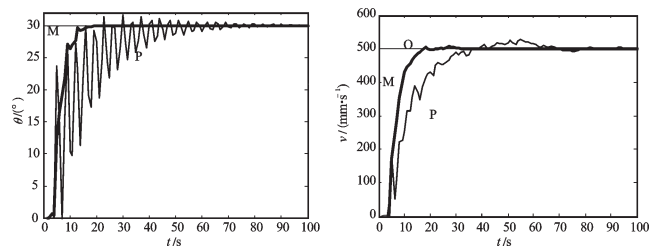


图9 参数发生变化后MFA与PID控制方位角变化图 图10 参数发生变化后MFA与PID控制速度变化图

4 结束语

本研究将无模型自适应控制应用于模块化移动机器人的运动控制当中, 并取得了比较满意的控制效果。从仿真结果可以看出MFA控制比PID控制更能有效减少振荡, 且能较快地达到稳定, MFA控制性能要优于PID控制。尽管PID控制结构简单、稳定性好、可靠性高, 但其过分依赖控制对象的模型参数、鲁棒性差。对于模型参数大范围变化且具有较强非线性环节的系统, PID调节难以满足高精度、快响应的控制要求, 且常量参数的选取有一定的难度。而MFA控制不依赖对象的数学模型, 鲁棒性强的优点, 能够很好地克服系统中的模型参数变化以及和非线性等不确定因素。

参考文献 (References):

- [1] CHAKRABORTY N, GHOSAL A. Kinematics of wheeled mobile robots on uneven terrain[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2004, 39(12): 1273-1287.
- [2] JIANG Ai-ping, LI Xiu-ying, HAN Zhi-gang. From PID to model-free controller[J]. *Control Engineering of China*, 2005, 17(3): 751-754.
- [3] BROCKETT R W. Asymptotic Stability and Feedback Stabilization [C]// *Differential Geometric Control Theory*. Boston: Birkhauser, 1983: 181-191.
- [4] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 102-152.
- [5] ZENG Qing-guo, XING Gui-ju, WANG Zhong-chu. Research and application of mode free adaptive control[J]. *Industrial Control Computer*, 2009, 22(6): 49-50.
- [6] 司震鹏, 曹西京, 姜小放. 4自由度模块化机器人的设计[J]. *轻工机械*, 2009, 27(4): 39-42.
- [7] HOU Zhong-sheng. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 586-592.
- [8] CHENG Shu-xing. Model-free Adaptive Control Theory and Applications [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1996.