

基于无源性的全方位移动机器人自抗扰控制

马书根, 赵珈靛, 任超[†]

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对全方位移动机器人轨迹跟踪控制中存在的外界干扰和系统参数不确定性问题, 提出基于无源性的自抗扰控制方法. 该方法通过扩张状态观测器对系统扰动进行估计, 并在基于无源性的控制器中加入扰动补偿项以减小外界干扰和参数不确定性对系统的影响; 进而, 利用系统的无源特性和Lyapunov理论证明在该控制器作用下闭环系统有界输入有界输出稳定. 仿真结果表明, 所提出的控制方法响应速度较快, 控制精度较高, 对系统外扰和模型参数不确定性具有较强的鲁棒性.

关键词: 移动机器人; 自抗扰控制; 轨迹跟踪; 无源性

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Passivity-based active disturbance rejection control of an omni-directional mobile robot

MA Shu-gen, ZHAO Jia-liang, REN Chao[†]

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to solve the problem of external disturbances and system parameter uncertainties in the trajectory tracking of an omni-directional mobile robot, a passivity-based active disturbance rejection control method is proposed. Firstly, the system disturbances are estimated by the extended state observer, then the disturbance compensations are added in an controller to eliminate the influence of external disturbances and parameter uncertainties in the system. By using the passivity theory and Lyapunov theory, it is proved that the closed-loop system is a bounded input, bounded output stable system. The simulation results show that the proposed control method has fast response speed, high control precision and strong robustness to external disturbances and uncertainties of model parameters.

Keywords: mobile robot; active disturbance rejection control; trajectory tracking; passivity

0 引言

全方位移动机器人具有平面运动的全部3个自由度, 能够向任意方向运动而不需要改变机器人姿态, 在空间狭小的场合(如医院等), 得到了越来越广泛的应用^[1-3]. 在实际应用过程中, 全方位移动机器人容易受到外界环境的影响, 如外力扰动等. 另外, 模型不确定性、系统参数变化等, 也增大了全方位移动机器人的控制难度. 如何实现良好的轨迹跟踪成为全方位移动机器人控制中的一个难点.

文献[4]提出了模糊PID控制算法, 但模糊规则的确立需要较多工程知识, 缺乏泛化能力; 文献[5]对模糊PID算法加以改进, 提出了模糊自适应PID算法, 但系统参数发生改变时, 参数整定需要较长时间; 文

献[6]提出了一种分解加速度控制器(RAC), 该控制器对传统PID进行了改进, 但RAC算法对扰动较为敏感; 针对抗扰问题, 文献[7]提出了鲁棒控制算法, 该算法对外界扰动具有一定鲁棒性, 但采用平衡点线性化的方法, 对参数变化较为敏感; 针对参数变化问题, 文献[8]提出了一种基于无源性控制方法, 该方法通过状态观测器对系统状态进行估计, 不依赖于精确的模型信息, 提升了对参数的鲁棒性; 文献[9]对上述观测器加以改进, 提出了基于无源性的扰动观测器, 但观测器结构复杂, 适用范围受限.

近年来, 自抗扰控制方法在机器人领域取得了显著成效. 该方法的核心在于扰动的实时估计以及补偿功能, 通过扩张状态观测器对系统总扰动进行估

收稿日期: 2017-02-08; 修回日期: 2017-07-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(F030603); 天津市科技支撑计划重点项目(15ZCZDZX00810).

责任编委: 程龙.

作者简介: 马书根(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事仿生机器人、水下机器人、移动机械手等研究; 赵珈靛(1992-), 男, 硕士生, 从事全方位移动机器人的研究.

[†]通讯作者. E-mail: renchao@tju.edu.cn

计,并在控制器中加入扰动补偿项,提升了系统的抗扰能力.全方位移动机器人具有无源特性,其无源特性在控制器设计及稳定性分析上具有一定优势.针对上述问题以及全方位移动机器人的特点,本文采用基于无源性的自抗扰控制方法对全方位移动机器人进行轨迹跟踪控制研究.

1 全方位移动机器人系统建模

1.1 动力学建模

本文以三轮全方位移动机器人为研究对象,建立系统模型.坐标系如图1所示:以机器人移动中心为坐标原点的移动坐标系 $\{M\}$ 和世界坐标系 $\{W\}$.

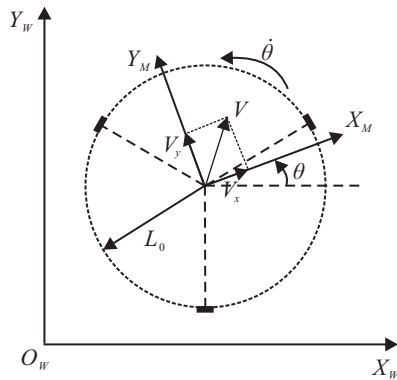


图1 全方位移动机器人坐标系

图1中,从 $\{M\}$ 坐标系到 $\{W\}$ 坐标系的坐标变换矩阵为

$${}^W_M \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

因此,可以得到 $\{W\}$ 坐标系下机器人状态变量与 $\{M\}$ 坐标系下机器人变量之间的转换关系

$$\dot{\mathbf{q}} = {}^W_M \mathbf{R} \mathbf{V}_M. \quad (2)$$

其中: $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$ 为 $\{W\}$ 坐标系下机器人位姿, $\mathbf{V}_M = [V_x \ V_y \ \dot{\theta}]^T$ 为 $\{M\}$ 坐标系下机器人速度.

根据文献[10]可以得到 $\{M\}$ 坐标系下机器人动力学方程

$$\mathbf{M}_0 \dot{\mathbf{V}}_M + \mathbf{C}_0 \mathbf{V}_M = \mathbf{B}_0 \mathbf{u}. \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{M}_0 = \frac{1}{p_2} \begin{bmatrix} (3/2)p_0 + m & 0 & 0 \\ 0 & (3/2)p_0 + m & 0 \\ 0 & 0 & (3/2)p_0 L_0^2 + I_v \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_0 = \frac{1}{p_2} \begin{bmatrix} (3/2)p_1 & -m\dot{\theta} & 0 \\ m\dot{\theta} & (3/2)p_1 & 0 \\ 0 & 0 & 3p_1 L_0^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} -(1/2) & -(1/2) & 1 \\ (\sqrt{3}/2) & -(\sqrt{3}/2) & 0 \\ L_0 & L_0 & L_0 \end{bmatrix},$$

$$p_0 = \frac{n^2 I_0}{r^2}, p_1 = \frac{n^2}{r^2} \left(b_0 + \frac{k_t k_b}{R_a} \right), p_2 = \frac{n k_t}{r R_a}.$$

表1 机器人模型参数

机器人参数	参数含义
$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T$	电机输入电压
m	机器人质量
I_v	以机器人质心为轴的转动惯量
I_0	电机、齿轮传动链和轮子的综合转动惯量
r	全方位轮半径
L_0	全方位轮与机器人质心间距离
b_0	电机、齿轮传动链和轮子的综合粘滞摩擦系数
k_b	电机反向电动势
k_t	电机电矩常数
R_a	电机电阻
n	齿轮减速比

将式(1)~(3)联立,可以得到 $\{W\}$ 坐标系下的机器人动力学方程

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{B}_1 \mathbf{u}. \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_0 {}^W_M \mathbf{R}^T, \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_0,$$

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{M}_0 {}^W_M \dot{\mathbf{R}}^T + {}^W_M \mathbf{R}^T \mathbf{C}_0 {}^W_M \mathbf{R}^T.$$

1.2 无源性分析

将式(4)左乘 ${}^W_M \mathbf{R}$,可得

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{B} \mathbf{u}. \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{M} = {}^W_M \mathbf{R} \mathbf{M}_1, \mathbf{C} = {}^W_M \mathbf{R} \mathbf{C}_1, \mathbf{B} = {}^W_M \mathbf{R} \mathbf{B}_1.$$

令 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B} \mathbf{u}$,可得

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau}. \quad (6)$$

由式(6)可知,系统的虚拟输入 $\boldsymbol{\tau}$ 与被控量 $\dot{\mathbf{q}}$ 之间具有无源性,并且是输出严格无源的.具体证明过程见文献[10].

2 控制系统的设计

上述建模过程中未考虑系统外扰,也未考虑参数不确定性等因素.在实际应用中,全方位移动机器人会受到周围环境影响,模型参数也会发生改变.本文将环境影响等因素当作系统外扰,将参数不确定性等当作系统内扰,并将系统外扰和系统内扰用总扰动 \mathbf{f} 表示.因此,系统模型(6)可以改写为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{f} = \boldsymbol{\tau}, \quad (7)$$

其中 $\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ f_\theta]^T$.

2.1 观测器设计

在自抗扰控制算法中, 扩张状态观测器能够对扩张状态变量进行估计, 从而得到系统的总扰动^[11]. 本文采用线性扩张状态观测器(LESO)对系统总扰动进行估计, 根据改写后的全方位移动机器人的动力学模型(7)设计如下观测器:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 \tilde{q}, \\ \dot{z}_2 = z_3 + M^{-1}(\tau - C\dot{q}) + \beta_2 \tilde{q}, \\ \dot{z}_3 = \beta_3 \tilde{q}. \end{cases} \quad (8)$$

其中: z_1, z_2, z_3 分别为 q, \dot{q} 和 f 的估计值; \tilde{q} 为 q 的估计误差, $\tilde{q} = q - \hat{q}$, \hat{q} 定义如表2所示; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为观测器增益.

为保证观测器稳定和参数整定方便, 本文采用带宽化方式^[12]设定观测器增益, 即

$$\beta_1 = \begin{bmatrix} 3\omega_o & 0 & 0 \\ 0 & 3\omega_o & 0 \\ 0 & 0 & 3\omega_o \end{bmatrix}, \beta_2 = \begin{bmatrix} 3\omega_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & 3\omega_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & 3\omega_o^2 \end{bmatrix},$$

$$\beta_3 = \begin{bmatrix} \omega_o^3 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_o^3 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_o^3 \end{bmatrix},$$

其中 ω_o 为观测器带宽且 $\omega_o > 0$.

表2 相关变量

参数定义	参数名称
q_d	机器人参考位姿
\hat{q}	机器人位姿估计值
$e = q - q_d$	控制误差
$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda_1 e$	辅助变量
$\dot{q}_0 = \dot{\hat{q}} - \Lambda_2 \tilde{q}$	辅助变量
$\Lambda_1 = \Lambda_1^T > 0$	定常矩阵
$\Lambda_2 = \Lambda_2^T > 0$	定常矩阵

2.2 控制器设计

控制器的设计分为扰动补偿部分和无源性控制器部分. 通过LESO对总扰动进行估计, 得到扰动补偿量为

$$U_1 = -Mz_3. \quad (9)$$

对经典无源性控制器进行改进, 得到如下控制器:

$$U_2 = M\ddot{q}_r + C\dot{q}_r - K_d(\dot{q}_0 - \dot{q}_r). \quad (10)$$

其中 q_0 和 q_r 为辅助变量, 定义如表2所示.

将式(9)和(10)联立, 可以得到控制律

$$\tau = U_1 + U_2 = M\ddot{q}_r + C\dot{q}_r - K_d(\dot{q}_0 - \dot{q}_r) - Mz_3. \quad (11)$$

因此, 可以得到控制输入

$$u = B^{-1}\tau = B^{-1}[M\ddot{q}_r + C\dot{q}_r - K_d(\dot{q}_0 - \dot{q}_r) - Mz_3]. \quad (12)$$

3 稳定性分析

定理1 假设总扰动的一阶导数 \dot{f} 是有界的, 则对于任意的 $\omega_o > 0$, 观测误差 \tilde{q}_i 是有界的, 也即存在常数 $\sigma_i > 0$, 使得在有限时间内 \tilde{q}_i 中的每个元素 $\tilde{q}_{ij}(t)$ 满足 $|\tilde{q}_{ij}(t)| \leq \sigma_i, i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$.

证明 将式(7)与(8)联立, 可得系统的估计误差方程

$$\begin{cases} \dot{\tilde{q}} = \tilde{q}_2 - 3\omega_o \tilde{q}, \\ \dot{\tilde{q}}_2 = \tilde{q}_3 - 3\omega_o^2 \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}}_3 = \dot{f} - \omega_o^3 \tilde{q}. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\tilde{q}_2 = q_2 - z_2$ 为速度估计误差, $q_2 = \dot{q}$ 为机器人实际速度, $\tilde{q}_3 = f - z_3$ 为扰动估计误差.

令 $\varepsilon_i = \tilde{q}_i / \omega_o^{i-1}$, 则式(13)可写为

$$\dot{\varepsilon} = \omega_o A_l \varepsilon + \frac{B_l \dot{f}(t)}{\omega_o^2}. \quad (14)$$

其中

$$A_l = \begin{bmatrix} -3\mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ -3\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \\ -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}, B_l = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix},$$

\mathbf{I}_3 表示3阶单位阵, $\mathbf{0}_3$ 表示3阶零矩阵.

解方程(14), 可以得到

$$\varepsilon(t) = e^{\omega_o A_l t} \varepsilon(0) + \int_0^t e^{\omega_o A_l (t-\tau)} B_l \frac{\dot{f}(\tau)}{\omega_o^2} d\tau. \quad (15)$$

因为 $\dot{f}(t)$ 是有界的, 所以 $\dot{f}(t)$ 中所有元素都是有界的, 并设 $|\dot{f}_{ij}(t)| \leq \delta_i (i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3)$, 其中 $\delta = [\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3]^T$ 为定常向量. 令

$$k(t) = \int_0^t e^{\omega_o A_l (t-\tau)} B_l \frac{\dot{f}(\tau)}{\omega_o^2} d\tau,$$

由文献[12]可知, $|k_{ij}(t)|$ 有界, 并且有

$$|k_{ij}(t)| \leq \frac{\delta v}{\omega_o^9} + \frac{\delta \gamma}{\omega_o^{18}}, \quad (16)$$

其中 v 和 γ 为常数.

令 $\varepsilon_{\text{sum}}(0) = |\varepsilon_{i1}(0)| + \dots + |\varepsilon_{ij}(0)|$, 因此有

$$|[e^{\omega_o A_l t} \varepsilon(0)]_{ij}| \leq \frac{\varepsilon_{\text{sum}}(0)}{\omega_o^9}. \quad (17)$$

将式(15)、(16)和(17)联立, 可得

$$|\varepsilon_{ij}(t)| \leq |[e^{\omega_o A_l t} \varepsilon(0)]_{ij}| + |k_{ij}(t)|. \quad (18)$$

由 $\varepsilon_i = \tilde{q}_i / \omega_o^{i-1}$ 可得

$$|\tilde{q}_{ij}(t)| \leq \frac{\tilde{q}_{\text{sum}}(0)}{\omega_o^9} + \frac{\delta v}{\omega_o^{10-i}} + \frac{\delta \gamma}{\omega_o^{19-i}} = \sigma_i. \quad (19)$$

其中: $\tilde{q}_{\text{sum}}(0) = |\tilde{q}_{i1}(0)| + \dots + |\tilde{q}_{ij}(0)|, i = 1, 2, 3, j =$

1, 2, 3. 因此, ESO的估计误差是有界的, 并且随观测器带宽的增大而减小, 观测器带宽越大, 估计精度越高. \square

定理2 假设总扰动的一阶导数 \dot{f} 是有界的, 则控制误差 e 是有界的, 系统为有界输入有界输出稳定.

证明 将式(7)与(11)联立, 可得闭环系统的控制误差方程为

$$M\dot{s}_1 + Cs_1 + K_d s_1 = K_d s_2 + M\tilde{q}_3. \quad (20)$$

其中: $s_1 = \dot{q} - \dot{q}_r = \dot{e} + \Lambda_1 e$, $s_2 = \dot{q} - \dot{q}_0 = \ddot{q} + \Lambda_2 \tilde{q}$.

令 $w = K_d s_2 + M\tilde{q}_3$, 则方程(20)可改写为

$$M\dot{s}_1 + Cs_1 + K_d s_1 = w. \quad (21)$$

取Lyapunov为

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{1}{2} s_1^T M s_1, \\ \dot{V}_s &= s_1^T M \dot{s}_1 = \\ & s_1^T w - s_1^T K_d s_1 - s_1^T C s_1. \end{aligned} \quad (22)$$

根据文献[13], 机器人的参数矩阵 $M(q)$ 具有如下性质:

$$0 < M_m \leq \|M(q)\| \leq M_M.$$

其中: $\|M\| = \sqrt{\lambda_{\max}(M^T M)}$, $\lambda_{\max}(\cdot)$ 为最大特征值, M_m 、 M_M 分别为矩阵 $M(q)$ 的最小和最大特征值.

因为 $s_2 = \ddot{q} + \Lambda_2 \tilde{q}$, 其中向量范数定义为 $\|x\| = \sqrt{x^T x}$, 由定理1可知, s_2 是有界的. 设 $\|s_2\| \leq K_1$, \tilde{q}_3 也是有界的, 设 $\|\tilde{q}_3\| \leq K_2$. 因此, 有如下关系:

$$\|w\| \leq \lambda_{\max}(K_d) K_1 + M_M K_2. \quad (23)$$

又因为

$$\dot{V}_s \leq -\lambda_{\min}(K_d) \|s_1\|^2 + \|s_1\| \|w\| - s_1^T C s_1, \quad (24)$$

由1.2节无源性分析可知, $-s_1^T C s_1 \leq 0$. 所以, 要使 $\dot{V}_s \leq 0$, 只需满足

$$(\lambda_{\min}(K_d) \|s_1\| - \|w\|) \geq 0. \quad (25)$$

对于系统是否满足式(25)条件, 讨论以下3种情况.

1) $\|s_1\|$ 有界, 且 $\|s_1\| \leq 1/\lambda_{\min}(K_d) \|w\|$.

因为 $\|s_1\| \leq 1/\lambda_{\min}(K_d) \|w\|$, 所以不满足式(25), 于是 $\dot{V}_s > 0$. 此时系统能量不断增长^[14], 一定有 $\|s_1\| \geq 1/\lambda_{\min}(K_d) \|w\|$, 与假设矛盾, 不成立.

2) $\|s_1\|$ 有界, 且 $\|s_1\| \geq 1/\lambda_{\min}(K_d) \|w\|$.

因为 $\|s_1\| \geq 1/\lambda_{\min}(K_d) \|w\|$, 所以满足式(25)条件, $\dot{V}_s \leq 0$, 此时 V_s 停止增长, $\|s_1\|$ 趋于有界,

假设成立.

3) $\|s_1\|$ 无界.

因为 $\|s_1\|$ 无界, 所以一定有 $\|s_1\| \geq 1/\lambda_{\min}(K_d) \|w\|$, 此时满足式(25)条件, $\dot{V}_s \leq 0$, $\|s_1\|$ 趋于有界, 与假设矛盾, 不成立.

通过上述分析可知, 所设计的控制系统中 $\|s_1\|$ 一定有界, 进而控制误差 e 是有界的^[15], 并且随着 K_d 的增大而减小. K_d 越大, 控制精度越高. 综上, 系统为有界输入有界输出稳定. \square

4 仿真实例

为验证所设计控制器的有效性, 本文从系统的抗扰特性以及参数鲁棒性两方面进行仿真. 仿真设置的机器人参数如下: $m = 10 \text{ kg}$, $I_v = 0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_0 = 1.47 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $r = 0.05 \text{ m}$, $L_0 = 0.2425 \text{ m}$, $k_t = 0.02078 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, $k_b = 0.02076 \text{ V}/\text{rpm}$, $n = 71$, $R_a = 2.53 \Omega$, $b_0 = 1 \times 10^{-4} (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}$.

将基于无源性的自抗扰控制器(PADRC)控制效果与RAC控制器^[6]、基于扩张状态观测器的分解加速度控制器(Extended state observer based resolved acceleration controller)进行对比, 并且两次仿真中所用控制器参数一致.

参考轨迹信息为

$$\begin{cases} x = 0.5 \sin(0.05\pi t), \\ y = 0.5 \sin(0.1\pi t), \\ \theta = 0.36t. \end{cases}$$

PADRC控制器参数为

$$\omega_o = 20,$$

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 16 & 0 & 0 \\ 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 16 \end{bmatrix}, K_d = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix}.$$

RAC + ESO控制器参数为:

$\omega_o = 20 \text{ rad/s}$, $K_p = A_1$, K_d 的值与PADRC算法中设置的相同.

RAC控制器参数为:

K_p 和 K_d 的值与RAC + ESO算法中设置的相同.

为进一步评价算法性能, 这里定义评价指标: 累积绝对跟踪误差 $T(e)$, 有

$$\begin{cases} T(e_{xy}) = \int_0^t (|e_x| + |e_y|) dt, \\ T(e_\theta) = \int_0^t |e_\theta| dt, \end{cases} \quad (26)$$

其中 e_x 、 e_y 、 e_θ 为控制误差.

4.1 抗扰能力验证

本文仿真时间为60s,在 $t = 15\text{ s}$ 和 $t = 30\text{ s}$ 时分别在Y方向和X方向加入阶跃扰动,扰动大小为轨迹半径的5%(0.025 m). 仿真结果如图2~图4以及表3所示.

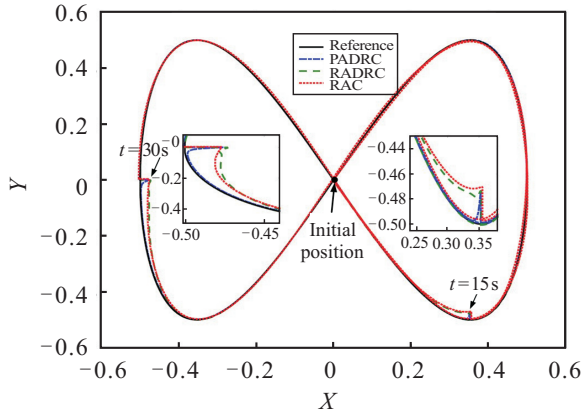


图2 XY平面轨迹跟踪曲线

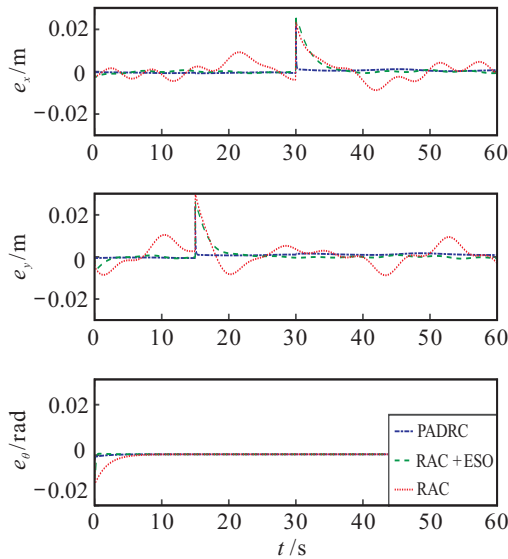


图3 控制误差e曲线

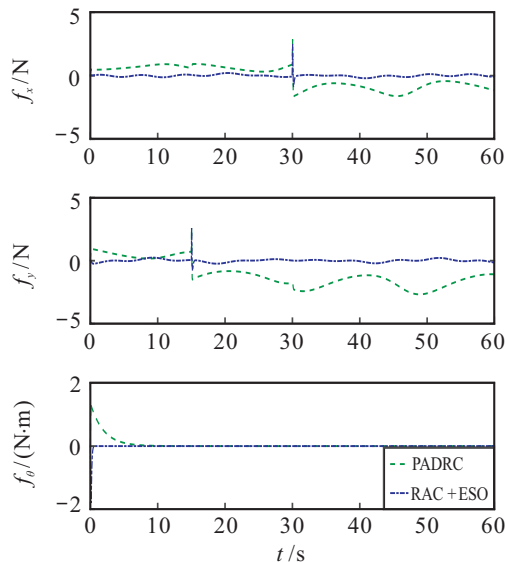


图4 扰动f估计曲线

表3 评价指标

算法	$T(e_{xy})$	$T(e_{\theta})$
PADRC	0.094 1	0.020 7
RAC+ESO	0.144 7	0.023 4
RAC	0.463 2	0.030 7

由图2、图3和表3可以看出,外扰作用后PADRC控制效果较好,抗扰能力较强,并且优于RAC算法和RAC+ESO算法. 其优势主要体现在以下两个方面:

1) 控制效果较好. 初始时刻PADRC算法超调量较小,系统响应速度较快. 达到稳态后,稳态误差较小,误差波动较小,控制精度较高,控制过程较为平稳. 累积绝对跟踪误差较小,PADRC算法的 $T(e_{xy})$ 比RAC+ESO算法小35%,比RAC算法小79.7%. PADRC算法的 $T(e_{\theta})$ 比RAC+ESO算法小11.5%,比RAC算法小32.6%.

2) 抗扰能力较强. 扰动作用后,PADRC算法的响应速度明显优于RAC+ESO算法和RAC算法,并且最大超调量较小,趋于稳态的过程中无振荡.

此外,由图4可以看出,当阶跃扰动作用时,观测器响应速度较快. 虽然PADRC算法的扰动估计值较大,但PADRC算法的控制误差较小,这说明PADRC算法对扰动有较强的抑制作用.

4.2 参数鲁棒性验证

全方位移动机器人在运动过程中系统参数会发生改变,本文以机器人质量 m 和综合粘滞摩擦系数 b_0 为仿真对象,先后进行两项仿真. 首先,仿真30s后将机器人质量 m 设置为原来的20倍, b_0 保持不变;然后,将质量 m 设置为初值,并将综合粘滞摩擦系数 b_0 设置为原来的5倍,比较3种算法的控制效果. 仿真结果如图5和表4所示.

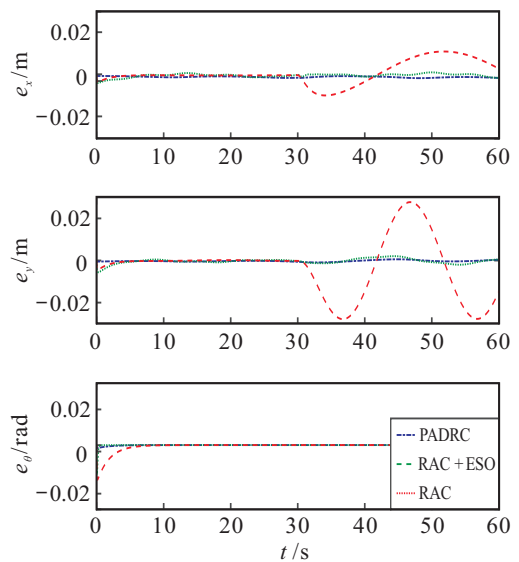


图5 m改变时控制误差e曲线

表4 评价指标

评价指标	m 改变			b_0 改变		
	PADRC	RAC+ESO	RAC	PADRC	RAC+ESO	RAC
$T(e_{xy})$	0.5594	0.5084	0.6829	0.0379	0.0795	0.6256
$T(e_\theta)$	0.0207	0.0235	0.0374	0.0205	0.0229	0.0374

由图5和表4可知,当系统参数发生改变时,PADRC算法控制效果较好,其优势主要体现在两个方面:

1) 受参数变化影响较小. m 和 b_0 改变前后,误差波动较小,对参数变化具有较强的鲁棒性.

2) 控制过程较为平稳. 控制误差波动较小,累积绝对误差较小,轨迹跟踪效果较好.

此外,当 m 增幅超过20倍, b_0 增幅超过4倍时,电机输入电压过大,执行器出现饱和(执行器饱和现象不在本文研究范围内). 在上述过程中电机输入电压全部维持在 $-50 \sim +50$ V 之间.

5 结论

本文考虑全方位移动机器人在轨迹跟踪控制过程中受到外力干扰以及系统参数发生改变的问题,提出了基于无源性的自抗扰控制方法. 该方法首先通过扩张状态观测器对系统总扰动进行估计;其次,通过基于无源性的控制器对扰动进行补偿,得到控制律;再次,利用机器人无源特性和Lyapunov理论给出了系统有界输入有界输出稳定的定理及证明;最后,通过仿真验证了所提出控制方法具有较强的抗扰特性,对参数变化具有较强的鲁棒性.

参考文献(References)

- [1] 叶长龙, 马书根, 回丽. 一种全方位移动机器人[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(2): 181-189.
(Ye C L, Ma S G, Hui L. An omni directional mobile robot[J]. Science China: Information Science, 2011, 41(2): 181-189.)
- [2] 邓旭玥, 易建强, 赵冬斌. 一种全方位移动机器人的运动学分析[J]. 机器人, 2004, 26(1): 49-53.
(Deng X Y, Yi J Q, Zhao D B. Kinematic analysis of an omnidirectional mobile robot[J]. Robot, 2004, 26(1): 49-53.)
- [3] 熊蓉, 张翮, 褚健, 等. 四轮全方位移动机器人的建模和最优控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 93-98.
(Xiong R, Zhang H, Zhu J, et al. Modeling and optimal control of omni-directional mobile robots[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 93-98.)
- [4] 田琦, 李琪, 姚鹏, 等. 基于模糊PID的全方位移动机器

人运动控制[J]. 电子科技, 2011, 24(9): 131-133.

- (Tian Q, Li Q, Yao P, et al. Motion control of omni-directional robot based on fuzzy PID control[J]. Electronic Science & Technology, 2011, 24(9): 131-133.)
- [5] 吴定会, 黄旭东, 纪志成. 全方位移动机器人模糊自适应PID控制[J]. 微特电机, 2007, 35(11): 32-34.
(Wu D H, Huang X D, Ji Z C. Velocity control of an omnidirectional mobile robot based on fuzzy adaptive PID[J]. Small & Special Electrical Machines, 2007, 35(11): 32-34.)
 - [6] Watanabe K, Shiraishi Y, Tang J. Feedback control of an omnidirectional autonomous platform for mobile service Robots[J]. J of Intelligent & Robotic Systems, 1998, 22(3): 315-330.
 - [7] 许巍丽, 孙茂相. 全方位移动机器人鲁棒控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(3): 312-316.
(Xu W L, Sun M X. Robust control of omni-direction wheeled mobile robot[J]. J of Shenyang University of Technology, 2007, 29(3): 312-316.)
 - [8] Berghuis H, Nijmeijer H. A passivity approach to controller-observer design for robots[J]. IEEE Trans on Robotics & Automation, 1994, 9(6): 740-754.
 - [9] Bickel R, Tomizuka M. Passivity-based versus disturbance observer based robot control: Equivalence and stability[J]. J of Dynamic Systems Measurement & Control, 1998, 121(1): 41-47.
 - [10] Ren C, Ma S G. Passivity-based model free control of an omnidirectional mobile robot[C]. Int Conf on Mechatronics. Japan: IEEE, 2015: 262-267.
 - [11] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 243-287.
(Han J Q. Active disturbance rejection control technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 243-287.)
 - [12] Zheng Q, Gao L Q, Gao Z Q. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics[C]. IEEE Conf on Decision & Control. New Orleans, 2007: 3501-3506.
 - [13] Arteaga-Pérez M. On the GPI approach with unknown inertia matrix in robot manipulators[J]. Int J of Control, 2014, 87(4): 844-860.
 - [14] 李殿璞. 非线性控制系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 94-175.
(Li D P. Nonlinear control systems[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009: 94-175.)
 - [15] Dixon W, Dawson D. Nonlinear control of wheeled mobile robots[M]. Germany: Springer, 2001: 154-157.

(责任编辑: 李君玲)