

外部扰动下空间机器人基于扰动观测器的鲁棒控制*

尤鑫焯 陈力†

(福州大学 机械工程及自动化学院,福州 350116)

摘要 针对参数不确定及存在外部扰动的情况下,载体位置不控、姿态受控的漂浮基空间机器人末端抓手轨迹跟踪控制问题,提出了一种基于扰动观测器的鲁棒控制方法.结合动量守恒定律,采用拉格朗日第二类方程建立了系统动力学方程.假设外部扰动是随时间变化的未知量,设计了扰动观测器估计由外部干扰和参数不确定构成的总扰动,并基于估计的总扰动引入扰动补偿项,保证了系统的控制性能.根据 Lyapunov 稳定性理论,证明了文中所提出控制律的稳定性.该控制律能补偿由于参数不确定和外部扰动引起的总扰动,从而提高了系统的轨迹跟踪性能.所提出的控制方案与传统鲁棒控制方案相比,具有控制器结构简单,不需要测量机械臂角加速度及基座的位置、移动速度、移动加速度,系统所需的传感器数量少等优点.最后通过数值仿真模拟,验证了上述控制方案的有效性.

关键词 空间机器人, 外部扰动, 扰动观测器, Lyapunov 函数, 鲁棒控制

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-071

引言

空间机器人在空间站建设、航天器维护延寿、太空垃圾回收等任务中发挥重要作用,空间机器人具备在对人类生命构成巨大威胁的环境中执行任务的能力,降低了宇航员面临的风险,并提高了执行任务的效率.目前空间机器人的研究受到国内外学者的广泛重视^[1-3],空间机械臂系统的基体处于自由漂浮状态,为了保证与地面装置的通信工作正常,一般也会采用反应轮控制载体姿态角^[4,5].空间机器人系统动力学方程遵循动量守恒定律,空间机器人各关节存在强耦合作用,末端执行器的运动影响航天器的运动,反之亦然.近年来,自适应控制,滑模控制,鲁棒控制逐渐应用于空间机器人的控制中,并取得一定效果^[2,6,7].在太空环境中,存在各种各样的外部扰动,例如:稀薄空气,摩擦力,空间机器人载体液体燃料晃动等.因此在设计控制器时,要考虑系统不确定性和外部扰动产生的影响,空间机器人在太空实际运行时,存在由参数化和非参数化的系统不确定性.

Kostas 等^[4]研究了关节空间和笛卡尔空间下角动量控制的自由浮动空间机械臂系统,提出了类似

于重力补偿的控制器,验证所提出控制器的渐近稳定性,并通过仿真证明了所提出的控制器可以使机械臂末端运动到指定的位置.程靖等^[8]针对载体位置不控、姿态受控的情况,基于模糊控制理论及 H_∞ 控制技术,提出了自适应模糊控制方案.Ohnishi 等^[9]研究的扰动观测器无需力传感器测量关节力矩,基于该扰动观测器的控制器成功应用于地面机械臂的独立关节控制.Cocuzza 等^[11]研究了空间机器人基于最小二乘法的空间反应控制.Yoshisada 等^[12]结合 ETS-7 任务,研究了自由飞行空间机器人柔性机械臂的轨迹控制问题.Yu 等^[13]研究了自由飞行柔性空间机械臂的奇异摄动自适应控制及振动抑制.近年来,有大量学者研究了柔性空间机器人模型的控制问题,并提出了各具特色的控制方案^[14-19],董富祥等^[20]对柔性航天器的空间碎片拖动问题进行了研究,通过集中参数法建立了绳索的动力学模型,为空间碎片清理提供了参考依据.

针对参数不确定及存在外部扰动的情况下,载体位置不控、姿态受控的漂浮基空间机器人末端抓手轨迹跟踪控制问题,提出了一种基于扰动观测器的鲁棒控制方法.本文重点研究了基于扰动观测器的控制方法.假设角度位移和角速度可用于反馈环

2019-10-15 收到第 1 稿,2019-11-24 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11372073,11072061);福建省工业机器人基础部件技术重大研发平台资助项目(2014H21010011).

† 通讯作者 E-mail: chnle@fzu.edu.cn

节,设计了扰动观测器估计由外部干扰和参数不确定构成的总扰动,并基于估计的总扰动引入扰动补偿项,保证了系统的控制性能.最后通过计算机数值仿真,验证了该控制方法的有效性.

1 系统动力学分析

不失一般性,考虑做平面运动的自由漂浮空间机器人系统,结构如图1所示.空间机器人系统由自由漂浮载体空间机器人系统由自由漂浮载体 B_0 ,两个刚性臂 B_1, B_2 组成.其中, O_0 为载体质心, O_1, O_2 分别为臂杆关节的旋转副中心.设 OXY 为惯性坐标系, $O_i X_i Y_i (i = 0, 1, 2)$ 分别为各臂 B_i 的主轴连体坐标. O_{c0}, O_{c1}, O_{c2} 分别为各部件质心, $e_i (i = 0, 1, 2)$ 为沿各主轴方向的单位向量.

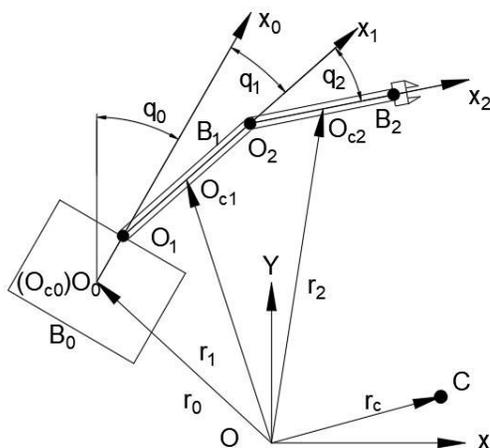


图1 自由漂浮空间机器人系统

Fig.1 Free-floating space robot system

不计微弱的重力因素、载体姿态受控位置不控的漂浮基两杆空间机器人系统满足动量守恒定律,不失一般性,设系统初始动量为0,由拉格朗日方程,可推导出此类空间机器人的系统动力学方程:

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} = \tau + \tau_d \quad (1)$$

其中, $D(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 是对称、正定质量矩阵, $H(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为包含科氏力及离心力的矢量, $q = [q_0 \ q_1 \ q_2]^T$ 为系统广义坐标组成的列向量. q_0 为载体姿态角, q_1, q_2 为臂杆的关节转角, $\tau \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为载体姿态控制力矩及关节控制力矩构成的矢量, τ_d 为载体姿态角干扰力矩及关节扰动力矩构成的扰动力矩列向量.

2 扰动观测器及控制律设计

设空间机器人系统的输入参考信号为 $q_r =$

$[q_{r0} \ q_{r1} \ q_{r2}]^T, q_{ri} (i = 0, 1, 2)$ 分别为载体姿态角及臂杆关节转角的期望值,定义跟踪误差如式(2):

$$e = q - q_r \quad (2)$$

理想状态下,标称空间机器人系统动力学方程如(3)式所示:

$$\bar{D}(q)\ddot{q} + \bar{H}(q, \dot{q})\dot{q} = \tau_r \quad (3)$$

其中, $\bar{D}(q)$ 和 $\bar{H}(q, \dot{q})\dot{q}$ 分别为标称系统的对称、正定质量矩阵及包含科氏力及离心力的矢量, τ_r 为标称控制力矩.由计算力矩法^[10]标称系统控制力矩如(4)式所示:

$$\tau_r = \bar{D}(q)(\ddot{q}_r + K_p e + K_d \dot{e}) + \bar{H}(q, \dot{q})\dot{q} \quad (4)$$

其中, $K_p = \text{diag}(k_{11}, k_{12}, k_{13})$ 为对称正定矩阵, $K_d = \text{diag}(k_{21}, k_{22}, k_{23})$ 为对称正定矩阵.由(1), (3)两式定义系统总扰动项如(5)式所示:

$$d = \tau_d - (D(q) - \bar{D}(q))\ddot{q} - (H - \bar{H})\dot{q} \quad (5)$$

其中,控制力矩 $\tau = -\hat{d} + \tau_r$, \hat{d} 为总扰动 d 的估计值, τ_r 由(4)式给出, H 为 $H(q, \dot{q})$ 缩写, \bar{H} 为 $\bar{H}(q, \dot{q})$ 缩写.

引入如图2所示由Ohnishi提出的扰动观测器^[8]:

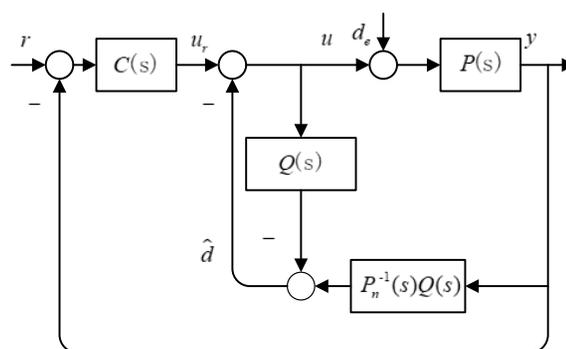


图2 基于扰动观测器的控制器

Fig.2 Disturbance observer-based controller

其中, $P(s)$ 表示具有不确定性的系统模型, $P_n(s)$ 为标称系统模型, $Q(s)$ 为低通滤波器, $C(s)$ 表示外环控制器, r 为参考输入时域信号.通过选择合适的滤波器 $Q(s)$,则由外部扰动 d_e 和系统模型不确定性组成的总扰动表示为: $\hat{d} = P_n^{-1}Q(s)y(s) - Q(s)u(s)$, $P_n^{-1}(s)Q(s)y(s)$ 项表示 $u + d_e$ 的估计值.

由(5)式定义的总扰动,结合(3)式标称系统动力学方程,则(1)式中的空间机器人动力学方程可写为下式:

$$\bar{D}(q)\ddot{q} + \bar{H}(q, \dot{q})\dot{q} = \tau + d \quad (6)$$

若实际系统的角加速度 \ddot{q} 已知,测得系统的 q 和 \dot{q} ,

即可算出 $\tau + d$ 项. 考虑实际系统角加速度 \ddot{q} 难以直接测得, 由 $\dot{\zeta}$ 替代 \ddot{q} 有:

$$\dot{\zeta} = -\frac{1}{\mu} \Gamma_{\zeta} (\zeta - \dot{q}), \zeta(0) = \dot{q}(0) \quad (7)$$

其中, Γ_{ζ} 为对称正定矩阵, $\mu > 0$ 为设计给定值. \dot{q} 到 ζ 传递函数 $Q_{\zeta}(s) = (\mu s I_n + \Gamma_{\zeta})^{-1} \Gamma_{\zeta}$ 对应图2中 $Q(s)$, $\tau + d$ 项估计值对应图2中 $P_n^{-1}(s) Q(s) Y(s)$ 项.

设 $\hat{\tau}_p$ 为 $\tau + d$ 的估计值, 则式(6)可写为如下所示:

$$\hat{\tau}_p = \bar{D}(q) \dot{\zeta} + \bar{H}(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (8)$$

计算系统总扰动估计值 \hat{d} 如下式:

$$\hat{d} = \hat{\tau}_p - \bar{D}(q) Q_{\chi}(s) (\bar{D}^{-1}(q) \tau) \quad (9)$$

考虑如下滤波器 $Q_{\chi}(s) = (\mu s I_n + \Gamma_{\chi})^{-1} \Gamma_{\chi}$, 其中,

$$\dot{\chi} = -\frac{1}{\mu} \Gamma_{\chi} (\chi - \bar{D}^{-1}(q) \tau), \chi \in R^n \quad (10)$$

则系统总扰动项表示如下:

$$\hat{d} = \bar{D}(q) \left(-\frac{1}{\mu} \Gamma_{\zeta} (\zeta - \dot{q}) - \chi \right) + \bar{H}(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (11)$$

基于式(4)、式(7)、式(11), 给出空间机器人系统控制器结构图如图3所示, 控制律如下:

$$\tau = -\hat{d} + \tau_r = \bar{D}(q) \left(-\frac{1}{\mu} \Gamma_{\zeta} (\zeta - \dot{q}) - \chi \right) + \bar{H}(q, \dot{q}) \dot{q} + \tau_r \quad (12)$$

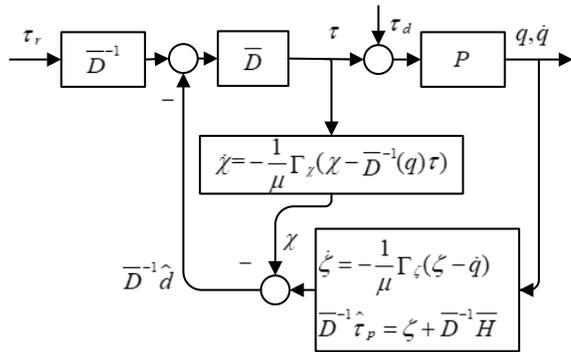


图3 空间机器人的控制器结构图

Fig.3 Structure of space robot controller

证明: 对闭环系统在控制律(12)作用下的稳定性分析如下.

$$(e, \xi, \chi) = (e, \frac{1}{\mu} (\zeta - \dot{q}), \chi)$$

闭环系统的坐标可写为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= \ddot{q} - D^{-1}(F - H\dot{q} - \bar{H}\dot{q} + \tau_r + \tau_d) \\ \mu \dot{\xi} &= -(I + D^{-1} \bar{D}) \Gamma_{\zeta} \xi - D^{-1} M \\ \mu \dot{\chi} &= \Gamma_{\chi} \Gamma_{\zeta} \xi + \Gamma_{\chi} \bar{D}^{-1} (\tau_r - \bar{H}) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $M = (\bar{D} \chi - H - \bar{H} + \tau_r + \tau_d)$, $F = \bar{D} (\Gamma_{\zeta} \xi + \chi)$. 则由式(12), 式(6)可推导出 \ddot{q} 如式(14)所示:

$$\ddot{q} = \bar{D}^{-1}(q) (D(q) (\Gamma_{\zeta} \xi + \chi) - N_1) \quad (14)$$

其中 $N_1 = H\dot{q} - \bar{H}\dot{q} + \tau_r + \tau_d$, 动力学表达式(13)为标准奇异摄动形式, μ 为时间间隔参数. 故存在充分小非负数 μ , 使变量 ξ 和 χ 达到它们的准稳态 ξ^* 和 χ^* . 当 $\mu = 0$ 时, 计算平衡点 ξ 和 χ 如(15)式所示:

$$\begin{aligned} \xi^* &= \Gamma_{\zeta}^{-1} \bar{D}^{-1}(q) (\bar{H}\dot{q} - \tau_r) \\ \chi^* &= \bar{D}^{-1}(q) D(q) (\bar{D}^{-1}(q) (\tau_r - \bar{H}\dot{q})) + N_2 \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $N_2 = D^{-1}(q) (\bar{H}\dot{q} - \tau_d)$. 定义 $\hat{\xi} = \xi - \xi^*$, $\hat{\chi} = \chi - \chi^*$, 则跟踪误差:

$$\dot{e} = A_e e + B_e [\hat{\xi}; \hat{\chi}] \quad (16)$$

其中 $\hat{\xi}(0) = \xi^*(0)$, A_e, B_e 表示如下

$$\begin{aligned} A_e &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}, \\ B_e &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\bar{D}^{-1}(q) D(q) \Gamma_{\zeta} & -\bar{D}^{-1}(q) D(q) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

设 P_e 为 $P_e A_e + A_e^T P_e = -I$ 的解, 选定如下函数作为 Lyapunov 函数:

$$V(e, \hat{\xi}, \hat{\chi}) = e^T P_e e + \frac{1}{2} \hat{\xi}^T \hat{\xi} + \frac{1}{2} \alpha U \quad (17)$$

其中, $U = (\hat{\chi} + \Gamma_{\zeta} \hat{\xi})^T (\hat{\chi} + \Gamma_{\zeta} \hat{\xi})$, α 为常数, 由式(18)给出

$$\alpha > \frac{(\alpha_1 + \alpha_0 \|\Gamma_{\zeta}\|)^2}{4\lambda_{\min}(\Gamma_{\zeta})\alpha_2} \quad (18)$$

其中, 上式中 $\alpha_0 > 0$, $\alpha_1 \geq \max \lambda_{\max}(\bar{D}^{-1}(q) D(q))$, $0 < \alpha_2 < \min \lambda_{\min}(\Gamma_{\zeta} \bar{D}^{-1}(q) D(q))$. 定义 $\psi = [\hat{\xi}; \hat{\chi} + \Gamma_{\zeta} \hat{\xi}]$, $\psi^* = [\xi^*; \chi^* + \Gamma_{\zeta} \xi^*]$ 由 A_e 和 B_e 推导得对应 A_{ψ} 和 B_{ψ} , V 对时间求导得式(19):

$$\dot{V} = G_1 + 2G_2 + \frac{1}{\mu} G_3 + \psi^T P_{\psi} (\dot{\psi}^*) \leq G_4 \quad (19)$$

其中, $G_1 = e^T (P_e A_e + A_e^T P_e) e$, $G_2 = e^T P_e A B_{\psi} \psi$,

$$G_4 = -\|e\|^2 + K_1 \|e\| \|\psi\| + \frac{1}{\mu} \psi^T P_{\psi} A_{\psi} \psi + K_2 \|\psi\|,$$

$$G_3 = \psi^T P_{\psi} A_{\psi} \psi, P_{\psi} = \text{diag}\{I, \alpha I\},$$

$$K_1 = \max \|2P_e B_{\psi}\|, K_2 = \max \|P_{\psi} (\dot{\psi}^*)\|.$$

易证, 存在 $K_3 > 0$, 使 $\psi^T P_{\psi} A_{\psi} \psi \leq K_3 \|\psi\|^2$ 成立, 式(19)可写成:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \|e\|^2 - \frac{\max\{1, \alpha\}}{4\lambda_{\max}(P_e)} \|\psi\|^2 + \varepsilon K_2^2 \quad (20)$$

其中 ε 为任意大于0常数.

控制目标为对于给定充分小 $\varepsilon > 0, t \rightarrow +\infty$ 时有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e\| \leq \varepsilon$ 成立. 由式(19)可见, 若按式(17)选取系数, 则 \dot{V} 为 e 的负定函数, 且 V 为正定函数. 由于 $\dot{V} \leq 0$, 且 V 有下界, 则当 $t \rightarrow +\infty$ 时, V 趋于某一正常数. 且 D 为对称正定矩阵, 则 e 有界, 故 \dot{V} 在区间 $t \in [0, +\infty)$ 内一致连续; 由 $V > 0$ 有界及 $\dot{V} \leq 0$ 可知, 系统大范围渐近稳定, $t \rightarrow +\infty$ 时, $e \rightarrow 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e} = 0$.

3 数值仿真

以图1所示平面两杆空间机器人系统为例, 进行数值仿真, 选取系统惯性参数如下: $m_0 = 40\text{kg}$, $m_1 = 2\text{kg}$, $m_2 = 1\text{kg}$, $J_1 = 1.5\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $J_2 = 0.75\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $J_0 = 34.17\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $l_0 = 1.5\text{m}$, $l_1 = 3\text{m}$, $l_2 = 3\text{m}$, 如图1所示, 各部件质心到 $O_i (i = 0, 1, 2)$ 的距离 $d_0 = 0\text{m}$, $d_1 = 1.5\text{m}$, $d_2 = 1.5\text{m}$. 设外部扰动为作用于末端的载荷, 其质量 m_p 为不确定参数.

为了验证所提出扰动观测器及鲁棒控制方案的有效性, 设末端载荷实际值 $m_p = 4\text{kg}$, 末端载荷到 O_{c0} 惯量矩 $J_3 = 21\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 载体姿态初始值 $q_0(0) = 90^\circ$, 载体姿态期望值 $q_0 = 0$, 各关节初始值 $q_1(0) = -12^\circ$, $q_2(0) = -84^\circ$, 各关节角度期望值由运动雅可比矩阵反解末端期望轨迹给出^[10], 末端执行器在惯性空间期望轨迹为:

$$x_d = 4.2 - 0.6\cos(1.5t)$$

$$y_d = 4 + 0.6\sin(1.5t)$$

图4为采用基于扰动观测器的鲁棒控制方法得到末端实际轨迹与期望轨迹的比较, 图5为载体姿态角及臂杆关节角的变化情况. 可以看出, 通过适当的选取控制器参数, 提出的基于扰动观测器的鲁棒控制方法能够使空间机器人系统较好地跟踪期望惯性空间轨迹, 其载体姿态角趋近期望的载体姿态角, 实现了载体姿态可控的目标.

4 结论

本文采用基于扰动观测器的鲁棒控制方法, 对具有外部扰动的不确定空间机器人系统的关节协调运动问题进行了研究. 该控制方法能补偿由于参数不确定和外部扰动引起的总扰动, 从而提高了系统的轨迹跟踪性能.

相比于 Ohnishi 所提出的扰动观测器, 本文将参数不确定和外部扰动作为总扰动项进行观测, 使

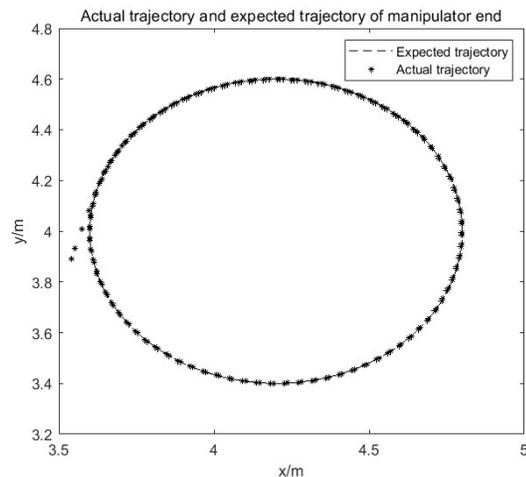


图4 末端执行器实际轨迹与期望轨迹

Fig.4 The actual trajectory and expected trajectory of the end-effector

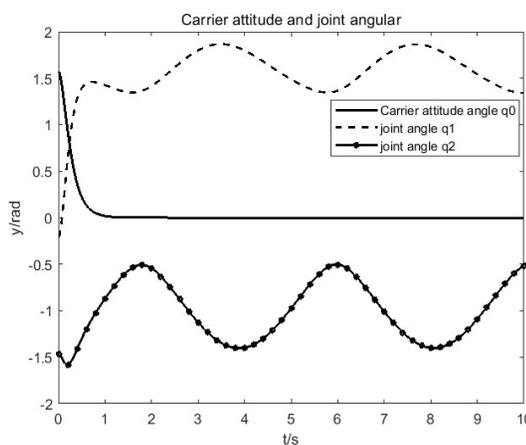


图5 载体姿态及关节角轨迹

Fig.5 The trajectory of carrier attitude and joint angular

所提出的控制器与传统鲁棒控制器相比, 具有控制器结构简单, 不需要测量机械臂角加速度及基座的位置、移动速度、移动加速度, 系统所需的传感器数量少的优点, 提高了系统的可靠性. 数值仿真证明该方案能够有效地控制空间机器人系统, 稳定地跟踪惯性空间期望轨迹. 本文进行了刚性模型的空间机器人外部扰动下的控制研究, 因此, 考虑系统柔性的扰动观测器控制问题是需要进一步研究的内容.

参 考 文 献

- 1 Dodiya A K. Reducing RF blackout during re-entry of the re-usable launch vehicle. *Aerospace conference*, IEEE, 2009:1 ~ 15
- 2 Reynier P, Evans D. Postflight analysis of inflatable reentry and descent technology blackout during Earth reentry.

- Journal of Spacecraft and Rockets*, 2009, 46(4): 800 ~ 809
- 3 Somov Ye, Butyrin S, Somova T, et al. Control of a free-flying robot at preparation for capturing a passive space vehicle. *IFAC Papers On Line*, 2018, 51(30): 72 ~ 76
 - 4 Nanos K, Papadopoulos E G. On the dynamics and control of flexible joint space manipulators. *Control Engineering Practice*, 2015, 45(12): 230 ~ 243
 - 5 Kelly R. Global positioning of robot manipulators via PD control plus a class of nonlinear integral actions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 43(7): 934 ~ 938
 - 6 马保离, 霍伟. 空间机器人系统的自适应控制. 控制理论与应用, 1996, 7(6): 828 ~ 835 (Ma B L, Huo W. Adaptive control of space robot system. *Control Theory and Application*, 1996, 7(6): 828 ~ 835 (in Chinese))
 - 7 Hartunian R A, Stewart G E, Curtiss T J, et al. Implications and mitigation of radio frequency blackout during reentry of reusable launch vehicles. In: AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, August 2007: 20 ~ 23, Hilton Head, South Carolina
 - 8 程靖, 陈力. 不确定空间机器人自适应模糊 H_∞ 控制. 载人航天, 2015, 21(6): 564 ~ 568 (Chen J, Chen L. Adaptive fuzzy H_∞ control of uncertain space robot. *Manned Space Flight*, 2015, 21(6): 564 ~ 568 (in Chinese))
 - 9 Ohnishi K, Ohde H. Collision and force control for robot manipulator without force sensor. In: Proceedings of IECON'94-20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 1994: 766 ~ 771
 - 10 陈力, 刘延柱. 空间机器人姿态与末端抓手协调运动的鲁棒自适应控制. 工程力学, 2002, 19(2): 167 ~ 172 (Chen L, Liu Y Z. Robust adaptive control of coordinated motion of space robot attitude and end grab. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(2): 167 ~ 172 (in Chinese))
 - 11 Cocuzza S, Pretto I, Debei S. Least-squares-based reaction control of space manipulators. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2012, 35(3): 976 ~ 986
 - 12 Yoshisada M, Showzow T S, Kei S, et al. Trajectory control of flexible manipulators on a free-flying space robot. *IEEE Control Systems*, 1992, 12(3): 51 ~ 57
 - 13 Yu X Y, Chen L. Singular perturbation adaptive control and vibration suppression of free-flying flexible space manipulators. *IMechE Part C-Mechanical Engineering Science*, 2015, 229(11): 1989 ~ 1997
 - 14 Joono C H, Wan K Y, Youngil Y. Fast suppression of vibration for multi-link flexible robots using parameter adaptive control. In: Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui, Hawaii, USA: IEEE, 2000: 913 ~ 918
 - 15 Yu X Y, Chen L, Xie L M. Observer-based two time control of free-flying flexible space manipulator. In: Proceedings of 64th International Astronautical Congress Beijing, China, September, France: International Astronautical Federation, 2013, 8: 6361 ~ 6369
 - 16 梁捷, 陈力. 基座弹性影响下空间站柔性关节机械臂的鲁棒自适应滑模控制及双重弹性振动主动抑制. 载人航天, 2016, 22(6): 788 ~ 796 (Liang J, Chen L. Robust adaptive sliding mode control and dual vibration suppression in flexible joint manipulator of space station with elastic foundation. *Manned Space Flight*, 2016, 22(6): 788 ~ 796 (in Chinese))
 - 17 Asada H, Ma Z D, Tokumaru H. Closure to discussion of "Inverse dynamics of flexible robot arms: modeling and computation for trajectory control". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1991, 113(1): 192 ~ 193
 - 18 Baruh H, Tadikonda S S K. Issues in the dynamics and control of flexible robot manipulators. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1989, 12(5): 659 ~ 671
 - 19 Book W J. Recursive Lagrangian dynamics of flexible manipulator arms via transformation matrices. *Computer Aided Design of Multivariable Technological Systems*, 1983, 3(3): 5 ~ 17
 - 20 董富祥, 周志成, 曲广吉. 柔性航天器拖拽空间碎片动力学与控制仿真研究. 动力学与控制学报, 2018, 16(2): 73 ~ 78 (Dong F X, Zhou Z C, Qu G J. Dynamics and control simulation of space debris towed by flexible spacecraft. *Journal of Dynamics and Control*, 2018, 16(2): 73 ~ 78 (in Chinese))

ROBUST CONTROL OF SPACE ROBOT BASED ON DISTURBANCE OBSERVER UNDER EXTERNAL DISTURBANCE *

You Xinye Chen Li[†]

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract A disturbance observer based robust control method is proposed to solve the trajectory tracking problem of the terminal grasp of a floating-based space robot with uncertain parameters and external disturbances. Based on the law of conservation of momentum, the second Lagrange equation is used to establish the dynamic equation of the system. Assuming that the external disturbance is an unknown time-varying variable, a disturbance observer is designed to estimate the total disturbance consisting of external disturbance and parameter uncertainty. Based on the estimated total disturbance, a disturbance compensation term is introduced to guarantee the control performance of the system. The stability of the proposed control law is proved. The control law can compensate the total disturbance caused by parameter uncertainties and external disturbances, thus improving the trajectory tracking performance of the system. Compared with the traditional robust control scheme, the proposed control scheme has various advantages including a simple controller structure, no need to measure the hinge acceleration and the position, moving speed and acceleration of the base of the manipulator, and less sensors needed in the system. Finally, the effectiveness of the above control scheme is verified by numerical simulation.

Key words space robot, external disturbance, disturbance observer, Lyapunov function, robust control

Received 15 October 2019, revised 24 November 2019.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11372073, 11072061)

[†] Corresponding author E-mail: chnle@fzu.edu.cn