空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应控制器设计

黄攀峰 [1,2] 胡永新 [1,2] 王东科 [1,2] 孟中杰 [1,2] 刘正雄 [1,2]

摘 要 针对空间绳系机器人 (Tethered space robot, TSR) 目标抓捕过程中的稳定控制问题, 建立空间绳系机器人系统模型, 根据阻抗控制原理, 设计基于位置的阻抗控制方法; 针对空间绳系机器人系统的模型不确定性问题, 利用神经网络对不确定性进行估计补偿, 设计鲁棒项对空间系绳干扰和神经网络估计误差的影响进行抑制, 在此基础上设计空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应稳定控制器, 并进行稳定性证明. 最后对设计的控制器进行仿真验证. 作为对比, 对无鲁棒项自适应的稳定控制器进行仿真. 仿真结果表明, 设计的基于阻抗控制的鲁棒自适应控制可以实现对空间绳系机器人目标抓捕过程中的稳定控制, 与无鲁棒项自适应的稳定控制器仿真结果相比, 本文采用的鲁棒自适应控制方法可以有效地对不确定性进行补偿, 控制过程中超调量更小, 收敛时间更短, 并且控制精度更高.

关键词 空间绳系机器人, 目标捕获, 阻抗控制, 鲁棒自适应控制

引用格式 黄攀峰, 胡永新, 王东科, 孟中杰, 刘正雄. 空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应控制器设计. 自动化学报, 2017, **43**(4): 538−547

DOI 10.16383/j.aas.2017.c150602

Capturing the Target for a Tethered Space Robot Using Robust Adaptive Controller

HUANG Pan-Feng[1,2] HU Yong-Xin[1,2] WANG Dong-Ke[1,2] MENG Zhong-Jie[1,2] LIU Zheng-Xiong[1,2]

Abstract Aimed at the problem of stabilization for a tethered space robot (TSR) capturing a target, a position-based impedance control is presented based on the model of a tethered space robot system. For the problem of model uncertainty of the tethered space robot system, an artificial neutral network (ANN) is used to estimate and compensate for the uncertainty, and a robust term is designed to repress the interference of tether and the effect of the estimation deviation by the ANN. Then a robust and adaptive controller for the TSR capturing a target is designed, and the stabilization of the controller is demonstrated. For the purpose of comparison, a simulation for an adaptive controller without the robust term is made, and the result shows that the controller designed in this paper can guarantee the stabilization during the TSR capturing a target. Compared to the adaptive controller without the robust term, the robust adaptive controller can compensate for the uncertainty effectively, with smaller overshoot, less convergence time, and higher control accuracy during the control process.

Key words Tethered space robot (TSR), target capturing, impedance control, robust adaptive control

Citation Huang Pan-Feng, Hu Yong-Xin, Wang Dong-Ke, Meng Zhong-Jie, Liu Zheng-Xiong. Capturing the target for a tethered space robot using robust adaptive controller. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(4): 538−547

空间绳系机器人 (Tethered space robot, TSR) 系统由空间绳系机器人、空间系绳和空间平台三部分构成, 是一种新型的空间在轨捕获工具[1], 空间绳系机器人对目标的抓捕任务主要分为逼近阶段、抓捕控制阶段和复合体稳定阶段. 由于系绳张力、传感器测量偏差、推力器执行偏差和模型偏差等因素的存在, 最终逼近段结束时, 空间绳系机器人和目标之间会存在残余的相对速度和相对角速度. 另外在手爪合拢过程中, 空间绳系机器人质量参数发生变化, 会对空间绳系机器人的自旋运动产生较大影响. 综合考虑这些因素, 抓捕过程中手爪和目标会产生一定程度的碰撞, 这种碰撞会使得目标逃出手爪抓捕包络进而导致抓捕失败. 因而对空间绳系机器人抓捕目标碰撞问题进行研究, 设计合适的目标抓捕控制算法十分必要. 目前针对空间绳系机器人的研究主要集中在动力学建模、释放/回收/逼近/拖曳变轨过程中的控制[2−7]. 文献 [2] 介绍了无质量轻质杆模型、珠子模型、牛顿–欧拉方法、Galerkin 法

收稿日期 2015-09-22 录用日期 2016-05-16
Manuscript received September 22, 2015; accepted May 16, 2016
国家自然科学基金 (11272256, 60805034, 61005062) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (11272256, 60805034, 61005062)
本文责任编委 孙富春
Recommended by Associate Editor SUN Fu-Chun
1. 西北工业大学航天学院智能机器人研究中心 西安 710072 2. 西北工业大学航天飞行动力学技术国家重点实验室 西安 710072
1. Research Center for Intelligent Robotics, School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710072 2. National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710072

和 Hamilton 力学变分法等空间系绳建模与求解方法. Williams[3] 基于切比雪夫多项式建立了离散系绳动力学方程, 提出一种有效的张力控制方法, 并给出了一种绳系卫星最优释放/回收方法. Wen 等[4] 提出一种通过调节系绳张力来稳定绳系空间机器人系运动的方法. Aslanov 等[5] 针对空间绳系机器人大型空间垃圾移除任务, 考虑大气影响以及目标自旋运动建立了空间绳系机器人系统面内运动精确模型. Chang 等[6] 提出了一种用于机器人系统的自适应协调控制策略, 将主动反馈的参数用于估计协调控制律中的调节参数, 机器人系统可以根据这种自适应协调控制方法协调控制自身的运动. Huang 等[7] 提出一种协调控制器实现轨迹和姿态跟踪, 该控制器由一个六自由度滑膜控制器和一个 PD 控制器构成, 其中 PD 控制器控制系绳收放, 六自由度滑膜控制控制系绳面内面外角和绳系机器人的姿态角.

空间绳系机器人系统与动力学高度耦合, 目标抓捕及抓捕后过程较为复杂. 徐秀栋等[8] 针对空间绳系机器人抓捕无控目标过程中的自身稳定控制问题, 提出一种操作机械臂主动阻尼控制与利用空间系绳和反作用轮进行基体姿态稳定控制相结合的协同稳定控制方法, 能很好地稳定操作机械臂和基体. 国内外学者对绳系机器人目标抓捕及抓捕后过程研究较少, 在传统空间机器人对目标抓捕过程中, 对目标抓捕及抓捕后控制问题是国内外学者研究的重要问题之一. Wang 等[9] 针对空间绳系机器人抓捕后复合体的姿态稳定问题, 介绍了一种新的控制方法, 通过协调空间绳系操作手, 系绳和推力器来实现抓捕后复合体的姿态稳定. 郭闻昊等[10] 针对碰撞引起机器人系统基座姿态变化的问题, 提出一种基于粒子群算法的碰撞前构型优化方法. 使碰撞对机器人系统角动量的影响尽量小. 陈钢等[11] 针对空间机器人目标捕获过程中的碰撞问题建立了碰撞动力学模型, 设计了空间机器人与目标物之间的碰撞检测算法, 并设计了碰撞发生后机器人的运动分析算法. Wee 等[12] 通过优化指标函数减小接触冲力的影响, 提出基于机器人构型控制策略, 达到碰撞冲击的最小化. 徐文福等[13] 提出了协调规划与控制的方法实现对目标的最优捕获, 设计了协调控制策略, 既考虑了整个空间机器人系统的控制性能, 又适应了当前的星载处理器的控制能力. Aghili[14] 针对目标动力学参数未知和控制力/控制力矩受限情况, 设计控制策略, 以较快的速度消除目标的转动动量和线动量, 实现空间机器人抓捕及抓捕后的稳定控制. Yoshida 等[15] 从复合体动量分配的角度分析了抓捕前后本体姿态的偏离最小问题, 利用抓捕过程中的阻抗控制, 抓捕后的动量分配控制, 给出了抓捕及抓捕后的控制策略. 文献 [16] 同样针对双臂机器人目标抓捕问题, 将角动量和线动量分开处理, 其中线动量用于设计平衡臂的构型和位置, 从而对本体的位置进行保持控制, 而角动量用于估计反作用轮产生的期望动量, 对本体的姿态进行保持控制; 文献 [17] 提出了基座自由漂浮下由空间机械臂自身的控制实现机械臂与基座协调运动的方法, 建立了基座自由运动和基座姿态稳定/调整下的目标抓捕、视觉监测、位置跟踪等不同需求下的统一的运动学模型, 采用分解运动速度的控制方法实现各种任务下的控制目标. Nakanishi 等[18−19] 研究了空间机器人抓捕过程中碰撞稳定控制问题, 设计了基于阻抗的控制方法. 魏承等[20] 研究了空间机器人捕获漂浮目标的抓取控制问题, 提出了 “动态抓取域” 用于机械臂抓取目标时的控制, 同时应用关节主动阻尼控制, 以减小抓取碰撞激振对空间机器人的影响.

通过以上研究可以发现, 对抓捕过程中的碰撞冲击进行抑制, 提高抓捕过程的快速性和稳定性以及本体姿态与位置的保持是抓捕控制问题的关键, 在抓捕控制过程中空间绳系机器人系统作为较为复杂的刚柔复合又面临着系绳所引入的新问题, 要求一方面要对碰撞力进行抑制, 另一方面要对系绳干扰以及模型不确定性的影响进行抑制, 因而对系绳干扰以及模型不确定性进行估计补偿, 并对估计误差的影响进行抑制, 进而设计了基于阻抗控制的空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应稳定控制器. 本文的结构如下: 第 1 节采用空间系绳珠子模型建立空间绳系机器人动力学模型, 第 2 节设计基于阻抗控制的空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应控制器, 第 3 节对设计的控制器的稳定性进行证明, 第 4 节对所设计的控制器进行仿真验证, 第 5 节对全文进行总结.

1　动力学模型建立

空间绳系机器人系统的相关定义如图 1 所示.

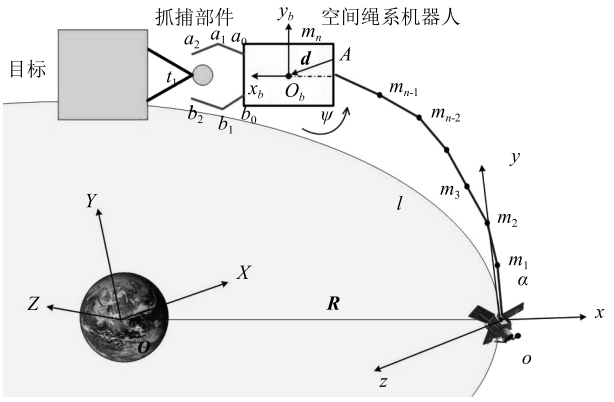


图 1　空间绳系机器人目标抓捕示意图

Fig. 1　Target capture of the TSR

图 1 中, $OXYZ$ 为惯性坐标系, $oxyz$ 为空间平台轨道坐标系, 其中 ox 沿地球半径方向向外, oy 沿轨道运动切线方向, ox、oy 和 oz 指向符合右手规则, 空间平台假设为质点, 位于 $oxyz$ 原点处. $o_bx_by_bz_b$ 为空间绳系机器人本体坐标系, 原点 o_b 位于空间绳系机器人质心处. A 为空间系绳与空间绳系机器人的系绳点, $\boldsymbol{d}$ 为系绳点向量.

采用空间系绳珠子模型进行空间绳系机器人系统动力学建模, 空间系绳由 n 段组成, 空间系绳质量分别集中在 n 个珠点处, 第 n 个珠点为空间绳系机器人. 设第 i $(i=1,2,\cdots,n)$ 段空间系绳长度为 l_i, 空间系绳面内角为 α_i, 空间系绳面外角为 β_i. 空间系绳与空间绳系机器人连接于 A 点, 偏置向量为 $\boldsymbol{d}$.

动力学建模之前, 考虑影响空间绳系机器人目标抓捕过程的主要因素, 在此基础上进行动力学建模.

1.1 基本假设

假设 1. 空间平台质量远大于空间绳系机器人和目标抓捕后复合体的质量, 忽略空间绳系机器人在目标抓捕及抓捕后阶段对空间平台姿轨的影响.

假设 2. 忽略空间系绳弹性的影响.

设 i 段空间系绳在空间平台轨道坐标系下的矢量为 $\boldsymbol{l}_i$, 则

$$\boldsymbol{l}_i=[l_i\cos\alpha_i\cos\beta_i,\ l_i\sin\alpha_i\cos\beta_i,\ l_i\sin\beta_i]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中, α_i 为面内角, β_i 为面外角, l_i 为第 i 段空间系绳的长度.

第 i $(i\le n-1)$ 个珠点在空间平台轨道坐标系下的位置可以表示为

$$\boldsymbol{r}_i=\sum_{j=1}^{i}\boldsymbol{l}_j \tag{2}$$

第 i $(i\le n-1)$ 个珠点的速度可以表示为

$$\boldsymbol{V}_i=\boldsymbol{V}_0+\dot{\boldsymbol{r}}_i+\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_i \tag{3}$$

其中, $\boldsymbol{V}_0$ 为空间平台的速度, 当 $i=n$ 时, $\boldsymbol{r}_n=\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{l}_j$ 表示的是空间系绳与空间绳系机器人的系绳连接点 A 的位置. 设 A 点到空间绳系机器人质心的偏置向量在空间平台轨道坐标系下矢量为 $\boldsymbol{d}$, 在空间绳系机器人本体坐标系下的向量为 $\boldsymbol{d}_b$.

则空间绳系机器人质心在空间平台轨道坐标系下可表示为

$$\boldsymbol{r}_b=\boldsymbol{r}_n+\boldsymbol{d} \tag{4}$$

空间绳系机器人质心相对地球质心在空间平台轨道坐标系下可表示为

$$\boldsymbol{R}_b=\boldsymbol{R}_0+\boldsymbol{r}_b \tag{5}$$

空间绳系机器人质心速度 $\boldsymbol{V}_b$ 可以表示为

$$\boldsymbol{V}_b=\boldsymbol{V}_0+\dot{\boldsymbol{r}}_b+\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_b \tag{6}$$

其中,

$$\dot{\boldsymbol{r}}_b=\dot{\boldsymbol{r}}_n+\dot{\boldsymbol{d}}=\sum_{i=1}^{n}\dot{\boldsymbol{l}}_i+\dot{\boldsymbol{d}} \tag{7}$$

其中, $\boldsymbol{\omega}$ 为轨道旋转角速度.

按照姿态运动学得到空间绳系机器人本体系下的角速度为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}_b=[&\dot\theta\sin\psi+\dot\varphi\cos\theta\cos\psi,\dot\theta\cos\psi-\\&\dot\varphi\cos\theta\sin\psi,\dot\varphi\sin\theta+\dot\psi]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{8}$$

其中, φ, θ, ψ 是旋转顺序为 123 的欧拉角.

1.2 系统动能

1) 空间平台动能为

$$T_p=\frac{1}{2}{\boldsymbol{V}_0}^{\mathrm{T}}M\boldsymbol{V}_0 \tag{9}$$

其中, M 为空间平台质量, 由于在抓捕及抓捕后阶段, 不需要大幅度地进行空间系绳的回收或者释放, 系绳长度变化相对较小, 因此忽略由于系绳释放或者回收导致的空间平台质量变化, 假设其为常值.

2) 第 i 个珠点的动能为

$$T_i=\frac{1}{2}{\boldsymbol{V}_i}^{\mathrm{T}}m_i\boldsymbol{V}_i$$

其中, m_i 为第 i 个珠点的质量. 则 $n-1$ 个珠点的总动能 T_l 可以表示为

$$T_l=\sum_{i=1}^{n-1}\boldsymbol{T}_i \tag{10}$$

3) 空间绳系机器人线动能为

$$T_r=\frac{1}{2}{\boldsymbol{V}_b}^{\mathrm{T}}m_n\boldsymbol{V}_b \tag{11}$$

其中, m_n 为空间绳系机器人的质量.

4) 空间绳系机器人转动动能为

$$T_a=\frac{1}{2}{\boldsymbol{\omega}_b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{\omega}_b \tag{12}$$

其中, $\boldsymbol{I}_x$, $\boldsymbol{I}_y$ 和 $\boldsymbol{I}_z$ 为空间绳系机器人转动惯量.

5) 空间绳系机器人系统总动能为

$$T=T_r+T_a+T_p+T_l \tag{13}$$

1.3 系统势能

1) 空间平台势能为

$$V_p = -\mu_e \frac{M}{|\boldsymbol{R}_0|} \tag{14}$$

2) 空间机器人势能为[21]

$$V_r = -\mu_e \frac{m}{|\boldsymbol{r}_b + \boldsymbol{R}_0|} - \frac{0.5\mu_e}{|\boldsymbol{r}_b + \boldsymbol{R}_0|^3}\mathrm{tr}(\boldsymbol{I}) + \frac{3\mu_e}{2|\boldsymbol{r}_b + \boldsymbol{R}_0|^3}\boldsymbol{c}_3{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{c}_3 \tag{15}$$

其中, μ_e 为地球引力常数, $\boldsymbol{I}$ 为空间绳系机器人转动惯量, $\boldsymbol{c}_3$ 是与重力的方向有关的向量.

对 $1/|\boldsymbol{r}_b + \boldsymbol{R}|$ 进行多项式展开, 忽略其高阶项, 结合式 (15), 可得

$$V_r \approx \frac{\mu m}{R_0}\left(1 - \frac{\boldsymbol{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_b}{R_0} + \frac{3(\boldsymbol{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_b)^2 - \boldsymbol{r}_b{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_b}{2R_0{}^2}\right) \tag{16}$$

3) 空间系绳势能为

$$V_l = \sum_{i=1}^{n-1}\left(-\mu_e \frac{m_i}{|\boldsymbol{r}_i + \boldsymbol{R}_0|}\right) \tag{17}$$

4) 空间绳系机器人系统总势能为

$$V = V_p + V_l + V_r \tag{18}$$

拉格朗日方程结合式 (13) 和式 (18), 可得空间绳系机器人系统动力学方程

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{q}} + \frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{q}} = \boldsymbol{Q}_q \tag{19}$$

其中, $\boldsymbol{q} = [l_k, \alpha_k, \beta_k, \varphi, \theta, \psi]^{\mathrm{T}}$.

2 基于阻抗控制的空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应控制器设计

由于在目标抓捕过程中, 空间系绳不需要较大长度的回收与释放, 因此, 目标抓捕过程中, 空间绳系机器人系统模型的珠点数不再增减, 且前 $n-1$ 段系绳长度不变, 空间绳系机器人抓捕过程中的位置变化通过第 n 段系绳的变化来体现. 令 $\boldsymbol{\xi} = [l_n, \alpha_n, \beta_n, \varphi, \theta, \psi]^{\mathrm{T}}$, 则空间绳系机器人系统矩阵形式的动力学方程为

$$M\ddot{\boldsymbol{\xi}} + N\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{G} = \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{\tau} \tag{20}$$

其中, M 为空间绳系机器人广义惯量矩阵; $\boldsymbol{G}$ 与轨道角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 有关, 为地球重力作用项; $\boldsymbol{Q}$ 为广义控制力向量, 是 6 行 1 列的向量, 前三项分别为对应 l_n, α_n 和 β_n 的控制力, 后三项分别为对应 φ, θ 和 ψ 的控制力矩. 其中 l_n, α_n 和 β_n 对应的广义控制力通过空间绳系机器人自身推力器实现; $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}(l_1, \cdots, l_{n-1}, \alpha_1, \cdots, \alpha_{n-1}, \beta_1, \cdots, \beta_{n-1})$ 为空间系绳对末端空间绳系机器人的干扰力/力矩向量.

通过对矩阵形式的空间绳系机器人系统动力学方程 (20) 的分析, 可以发现以下特点:

1) 空间绳系机器人系统广义惯量矩阵 M 是正定矩阵;

2) 矩阵 $\dot{M} - 2N$ 为斜对称矩阵, 且具有以下性质:

$$\boldsymbol{\chi}^{\mathrm{T}}(\dot{M} - 2N)\boldsymbol{\chi} = 0 \tag{21}$$

其中, $\boldsymbol{\chi}$ 为任意六维列向量.

阻抗控制是机器人操作控制中非常有效的一种控制方法, 目标是通过调解机器人的机械阻抗保持末端执行器的位置和末端执行器与环境之间的接触力的理想动态关系. 空间绳系机器人系统目标抓捕过程中, 需要所抓捕目标一直处于空间绳系机器人的抓捕包络中, 并且应尽量使抓捕目标处于抓捕包络的中心位置以减小目标与抓捕装置的碰撞. 根据以上需求, 决定采用基于位置的阻抗控制方法.

本文中的空间绳系机器人结构示意图如图 2 所示, 该抓捕机构有 6 个连杆, 外加前端面, 共装有 7 个薄膜压力传感器, 主要以空间目标上的杆状机构作为抓捕对象, 例如太阳帆板支架, 能对直径 0.01 ∼ 0.1 m 的杆状目标有效抓捕并锁死. 空间手爪对目标实施抓捕过程中, 通过空间手爪上的力/力矩传感器, 测量得到碰撞产生的碰撞力 $\boldsymbol{F}_e$, 并将该信息反馈给阻抗控制器, 阻抗控制器产生一个位置修正量 $\boldsymbol{e} = (\boldsymbol{e}_x, \boldsymbol{e}_y)^{\mathrm{T}}$, 空间绳系机器人操作手爪共有 7 个阻抗控制滤波器, 其采用的修正量满足

$$M_d\ddot{\boldsymbol{e}}_i + B_d\dot{\boldsymbol{e}}_i + K_d\boldsymbol{e}_i = -\boldsymbol{F}_{ei} \tag{22}$$

其中, $i = 1, 2, \cdots, 7$.

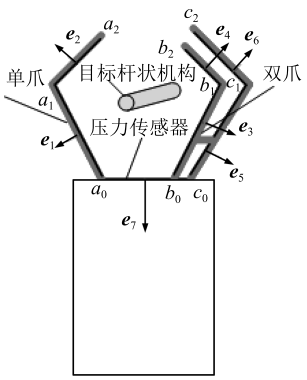


图 2　空间绳系机器人碰撞力示意图

Fig. 2　The collision force of the TSR

得到空间绳系机器人位置修正量 $\boldsymbol{e}_i$ 以后, 与预先设定的期望参考运动轨迹 $\boldsymbol{x}_r$ 相加, 可以得到修正后的期望参考运动轨迹 $\boldsymbol{x}_d$, 即

$$\boldsymbol{x}_d = \boldsymbol{x}_r + \sum_{i=1}^{7} \boldsymbol{e}_i \tag{23}$$

当空间绳系机器人未与待抓捕目标产生碰撞, 即 $\boldsymbol{F}_e = \boldsymbol{0}$ 时, $\boldsymbol{e}_i = \boldsymbol{0}$, 这时 $\boldsymbol{x}_d = \boldsymbol{x}_r$, 空间绳系机器人按照预先设定的期望参考运动轨迹运动.

基于位置的空间绳系机器人阻抗控制框图如图 3 所示.

在阻抗控制方法中, M_d 为空间绳系机器人理想的广义惯量矩阵, 对有大加速度的高速运动或会产生冲力的运动有较大作用; B_d 为空间绳系机器人理想阻尼矩阵, 对中速运动或存在较强干扰的运动有较大作用; K_d 为空间绳系机器人理想刚度矩阵, 对平衡状态附近的低速运动有较大作用.

空间绳系机器人从空间平台释放, 逼近至目标抓捕位置的过程中, 由于控制过程中的燃料消耗, 导致空间绳系机器人质量、转动惯量及质心位置等系统参数均发生了改变, 使得系统具有动力学模型的不确定性, 并且目标抓捕过程中系绳摆动对空间绳系机器人位置和姿态的影响是一个必须考虑的问题. 因此, 考虑到以上因素, 将针对空间绳系机器人进行目标抓捕稳定控制器设计.

空间绳系机器人动力学方程为

$$\begin{aligned}&(M_0 + \Delta M)\ddot{\boldsymbol{\xi}} + (N_0 + \Delta N)\dot{\boldsymbol{\xi}} + \\ &(\boldsymbol{G}_0 + \Delta \boldsymbol{G}) = \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{\tau}\end{aligned} \tag{24}$$

其中, M_0, N_0 和 $\boldsymbol{G}_0$ 为名义系统参数, ΔM, ΔN 和 $\Delta \boldsymbol{G}$ 为系统不确定性参数, 并且满足

$$\begin{cases} M = M_0 + \Delta M \\ N = N_0 + \Delta N \\ \boldsymbol{G} = \boldsymbol{G}_0 + \Delta \boldsymbol{G} \end{cases} \tag{25}$$

其中, M、N 和 $\boldsymbol{G}$ 为系统实际矩阵.

设空间绳系机器人状态跟踪误差为

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{\xi}_d - \boldsymbol{\xi} \tag{26}$$

其中, $\boldsymbol{\xi}_d$ 为期望的系统状态. 定义误差函数为

$$\boldsymbol{r} = \dot{\boldsymbol{e}} + \Lambda \boldsymbol{e} = \dot{\boldsymbol{\xi}}_d - \dot{\boldsymbol{\xi}} + \Lambda \boldsymbol{e} \tag{27}$$

其中, Λ 为对称正定矩阵. 则系统误差方程为

$$\begin{aligned} M_0\dot{\boldsymbol{r}} = {} & M_0(\ddot{\boldsymbol{e}} + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) = M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d - \ddot{\boldsymbol{\xi}} + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) = \\ & M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) + \Delta M\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \\ & N\dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{G} - \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{\tau} = \\ & M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) + N_0(\dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\boldsymbol{e}) - \\ & N_0(\dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\boldsymbol{e} - \dot{\boldsymbol{\xi}}) + \boldsymbol{G}_0 + \Delta M\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \\ & \Delta N\dot{\boldsymbol{\xi}} + \Delta\boldsymbol{G} - \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{\tau} = \\ & M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) + N_0(\dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\boldsymbol{e}) - \\ & N_0\boldsymbol{r} + \boldsymbol{G}_0 + \boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \tag{28}$$

系统误差动力学方程可写为

$$\begin{aligned} M_0\dot{\boldsymbol{r}} + N_0\boldsymbol{r} = {} & M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) + \\ & N_0(\dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\boldsymbol{e}) + \boldsymbol{G}_0 + \boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \tag{29}$$

其中, $\boldsymbol{\rho} = \Delta M\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \Delta N\dot{\boldsymbol{\xi}} + \Delta\boldsymbol{G}$ 为系统不确定项.

空间绳系机器人在执行任务过程中, 特别是抓捕任务中, 系绳需要进行微张力保持, 目的一方面是平台能够通过系绳及时对空间绳系机器人进行操控; 另一方面是确保系绳拉力不至于对绳系机器人产生太大干扰. 在抓捕过程中, 由于碰撞的影响系绳会出现一定程度的摆动, 导致系绳张力不确定. 另外在执行任务过程中由于推进剂的消耗, 会使得绳系机器人的质量参数发生一定的改变, 这对绳系机器人的姿轨控制也产生了一定的影响, 因而空间绳系机器人系统误差动力学方程含有不确定项, 需要对不确定项进行补偿控制, 提高系统的控制性能. 径向基函

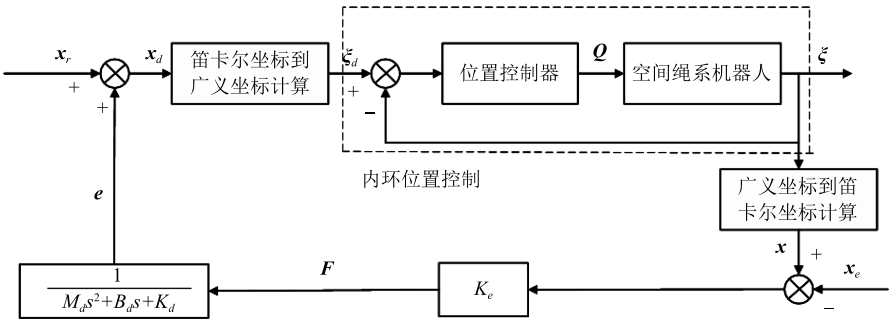


图 3 基于位置的空间绳系机器人阻抗控制

Fig. 3 Block diagram of the impedance controller based on position for the TSR

数 (Radial basis function, RBF) 神经网络具有良好的曲线拟合特性[19], 利用 RBF 神经网络逼近绳系机器人的非线性动力学, 设计的基于神经网络的鲁棒自适应控制器为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Q} = {} & K\boldsymbol{r} + M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) + \\ & N_0(\dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\boldsymbol{e}) + \boldsymbol{G}_0 + \hat{\boldsymbol{\rho}} + \boldsymbol{\eta}\end{aligned} \tag{30}$$

其中, $\hat{\boldsymbol{\rho}}$ 为空间绳系机器人系统模型不确定性估计, $\boldsymbol{\eta}$ 为系统的鲁棒项.

将控制器 (30) 代入系统误差动力学方程 (29), 则可得

$$M_0\dot{\boldsymbol{r}} = -N_0\boldsymbol{r} - K\boldsymbol{r} + \tilde{\boldsymbol{\rho}} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau} \tag{31}$$

其中, $\boldsymbol{\delta}$ 为神经网络自适应估计产生的误差, $\tilde{\boldsymbol{\rho}} = \boldsymbol{\rho} - \hat{\boldsymbol{\rho}}$.

由于 $\ddot{\boldsymbol{\xi}}$ 是系统状态 $\dot{\boldsymbol{\xi}}$ 和 $\boldsymbol{\xi}$ 的函数, 因此 $\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\rho}(\dot{\boldsymbol{\xi}}, \boldsymbol{\xi})$, 因为 RBF 神经网络的输入量为 $\dot{\boldsymbol{\xi}}$ 和 $\boldsymbol{\xi}$, $\boldsymbol{\rho}$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\rho}}$ 利用神经网络可以表示为

$$\hat{\boldsymbol{\rho}} = \hat{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}_\rho \tag{32}$$

其中, $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$ 为 RBF 神经网络输出权值, $\boldsymbol{\Phi}_\rho$ 为径向基函数输出值, 通常采用高斯函数作为径向基函数[22]

$$\boldsymbol{\Phi}_{\rho i}(\boldsymbol{Y})\exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{Y} - C_i\|^2}{2{\sigma_i}^2}\right) \tag{33}$$

设计的权值 $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$ 自适应更新律为[23]

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}} = \boldsymbol{F}_\rho\boldsymbol{\Phi}_\rho\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}} - k_\rho\boldsymbol{F}_\rho\|\boldsymbol{r}\|\hat{\boldsymbol{\Theta}} \tag{34}$$

其中, $\boldsymbol{F}_\rho$ 为任意正定矩阵, $k_\rho > 0$ 为设计参数. RBF 神经网络在对空间绳系机器人系统模型不确定性进行估计时, 存在估计误差 $\tilde{\boldsymbol{\rho}}$. 同时, 考虑到系绳干扰 $\boldsymbol{\tau}$ 的影响, 设计 $\boldsymbol{\eta}$ 对估计误差 $\tilde{\boldsymbol{\rho}}$ 和系绳干扰 $\boldsymbol{\tau}$ 的影响进行抑制, 设计 $\boldsymbol{\eta}$ 为

$$\boldsymbol{\eta} = (\eta_{\tilde{\rho}} + \eta_\tau)\mathrm{sgn}(\boldsymbol{r}) \tag{35}$$

其中, $\mathrm{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, $\eta_{\tilde{\rho}}$ 为 RBF 神经网络估计误差 $\tilde{\boldsymbol{\rho}}$ 的上界, η_τ 为空间系绳干扰 $\boldsymbol{\tau}$ 的上界.

为了减小控制器中符号函数存在产生的振动, 可采用以下函数

$$\mathrm{sat}(r_i, \varepsilon) = \begin{cases} 1, & r_i > \varepsilon \\ \dfrac{r_i}{\varepsilon}, & -\varepsilon < r_i \le \varepsilon \\ -1, & r_i \le -\varepsilon \end{cases} \tag{36}$$

其中, $i = 1, 2, 3$, ε 为一正小数, 在这里如果正小数太小, 减小抖振效果不明显, 太大则会造成较大的稳态偏差, 其大小的确定需要考虑稳态误差要求以及系统不确定性的大小.

以下将推导基于阻抗控制的空间绳系机器人期望轨迹的计算. 设平台轨道坐标系下的目标杆状待抓捕部位的位置为 $\boldsymbol{x}_r$, 速度为 $\dot{\boldsymbol{x}}_r$. 本文的控制目标为控制空间绳系机器人的位置, 使目标杆状待抓捕部位进入空间绳系机器人操作手爪抓捕包络, 最终与操作手爪抓捕中心重合, 完成对目标的有效抓捕合拢.

采用基于位置的阻抗控制方法, 可以得到利用阻抗控制方法修正后的目标杆状待抓捕部位的期望位置为 $\boldsymbol{x}_d$. 空间绳系机器人操作手爪的抓捕中心位置由空间系绳长度 l_n、面内角 α_n、面外角 β_n, 空间绳系机器人姿态角 φ、θ 和 ψ 决定. 因此, 首先根据抓捕任务的不同, 确定期望抓捕姿态角 φ_d、θ_d 和 ψ_d, 然后通过计算确定期望空间系绳长度 l_{nd}、面内角 α_{nd}、面外角 β_{nd}, 具体计算步骤如下:

设操作手爪抓捕中心与质心之间的相对位置在本体坐标系下可表示为 $\boldsymbol{h}$, 质心与空间绳系机器人系绳连接点的相对位置在本体坐标系下可表示为 $\boldsymbol{d}_b$, 则抓捕中心与系绳连接点在本体坐标下相对位置为 $\boldsymbol{d}_b + \boldsymbol{h}$. 则期望的抓捕中心位置 $\boldsymbol{x}_d$ 与 ψ_r、l_r 和 α_r 之间的关系可以表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}_d = {} & \boldsymbol{R}(\varphi_d, \theta_d, \psi_d)(\boldsymbol{d}_b + \boldsymbol{h}) + \\ & \boldsymbol{l}_{nd}(l_{nd}, \alpha_{nd}, \beta_{nd}) + \boldsymbol{r}_{n-1}\end{aligned} \tag{37}$$

由式 (37) 可以计算得到 $\boldsymbol{l}_{nd}$ 为

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{l}_{nd}(l_{nd}, \alpha_{nd}, \beta_{nd}) = \\ &\quad \boldsymbol{x}_d - \boldsymbol{R}(\varphi_d, \theta_d, \psi_d)(\boldsymbol{d}_b + \boldsymbol{h}) - \boldsymbol{r}_{n-1}\end{aligned} \tag{38}$$

空间系绳的位置 $\boldsymbol{l}_{nd}$ 可以表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{l}_{nd} = {} & [l_{nd}\cos\alpha_{nd}\cos\beta_{nd}, \\ & l_{nd}\sin\alpha_{nd}\cos\beta_{nd}, l_{nd}\sin\beta_{nd}]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{39}$$

则可以确定系绳长度与面内角的期望值为

$$\begin{aligned} l_{nd} &= \|\boldsymbol{l}_{nd}\| \\ \alpha_{nd} &= \arctan\left(\frac{l_{nd2}}{l_{nd1}}\right) \\ \beta_{nd} &= \arcsin\left(\frac{l_{nd3}}{l_{nd}}\right)\end{aligned}$$

其中, l_{nd1}, l_{nd2} 和 l_{nd3} 分别为 $\boldsymbol{l}_{nd}$ 的三个分量.

3　稳定性证明

选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}M_0\boldsymbol{r} + \frac{1}{2}\mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\right) \tag{40}$$

由于惯量矩阵 M_0 为正定矩阵, $\boldsymbol{F}_\rho$ 为选取的任意正定矩阵, 因此 $V \geq 0$.

对式 (40) 两边求导可得

$$\dot{V} = \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}} M_0 \dot{\boldsymbol{r}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\dot{M}_0\boldsymbol{r} + \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}}\right) \tag{41}$$

将式 (29) 和设计的控制器 (30) 代入式 (41) 可得

$$\begin{aligned}\dot{V} = {} & \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}} M_0 \dot{\boldsymbol{r}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\dot{M}_0\boldsymbol{r} + \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}}\right) = \\ & \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\Big\{ - N_0\boldsymbol{r} + M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) + N_0\left(\dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\boldsymbol{e}\right) + \\ & \boldsymbol{G}_0 + \boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{\tau}\Big\} + \frac{1}{2}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\dot{M}_0\boldsymbol{r} + \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}}\right) = \\ & \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(-N_0\boldsymbol{r} - K\boldsymbol{r} + \tilde{\boldsymbol{\rho}} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}) + \\ & \frac{1}{2}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\dot{M}_0\boldsymbol{r} + \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}}\right) = \\ & \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(-K\boldsymbol{r} + \tilde{\boldsymbol{\rho}} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}) + \\ & \frac{1}{2}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\dot{M}_0 - 2N_0)\boldsymbol{r} + \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}}\right)\end{aligned} \tag{42}$$

由于 $(\dot{M}_0 - 2N_0)$ 为斜对称矩阵, 因此 $(1/2)\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\dot{M}_0 - 2N_0)\boldsymbol{r} = 0$, 式 (42) 可以变为

$$\begin{aligned}\dot{V} = {} & \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(-K\boldsymbol{r} + \tilde{\boldsymbol{\rho}} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}) + \\ & \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}}\right)\end{aligned} \tag{43}$$

由于 $\tilde{\boldsymbol{\Theta}} = \boldsymbol{\Theta} - \hat{\boldsymbol{\Theta}}$, 因此有 $\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}} = \dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}}$, 代入式 (43), 可得

$$\begin{aligned}\dot{V} = {} & \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(-K\boldsymbol{r} + \tilde{\boldsymbol{\rho}} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}) + \\ & \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}}\right)\end{aligned} \tag{44}$$

将自适应估计律 (34) 代入式 (44), 可得

$$\begin{aligned}\dot{V} = {} & -\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}K\boldsymbol{r} + \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\tilde{\boldsymbol{\rho}} - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\tau}) - \\ & \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho{}^{-1}(\boldsymbol{F}_\rho\boldsymbol{\Phi}_\rho\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}} - k_\rho\boldsymbol{F}_\rho\|\boldsymbol{r}\|\hat{\boldsymbol{\Theta}})\right) = \\ & -\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}K\boldsymbol{r} + \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\tilde{\boldsymbol{\rho}} - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\tau}) - \\ & \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\Phi}_\rho\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}} - k_\rho\|\boldsymbol{r}\|\hat{\boldsymbol{\Theta}})\right) = \\ & -\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}K\boldsymbol{r} + \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\tilde{\boldsymbol{\rho}} - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\tau}) - \\ & \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}_\rho\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\right) - \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}(-k_\rho\|\boldsymbol{r}\|\hat{\boldsymbol{\Theta}})\right) = \\ & -\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}K\boldsymbol{r} + \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\tilde{\boldsymbol{\rho}} - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\tau}) - \\ & \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}_\rho\right) + \mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}(k_\rho\|\boldsymbol{r}\|\hat{\boldsymbol{\Theta}})\right) = \\ & -\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}K\boldsymbol{r} + \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\tau}) + \\ & k_\rho\|\boldsymbol{r}\|\mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\Theta} - \tilde{\boldsymbol{\Theta}})\right)\end{aligned} \tag{45}$$

$\mathrm{tr}(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_\rho^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}})$ 满足以下性质:

$$\begin{aligned}\mathrm{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\Theta} - \tilde{\boldsymbol{\Theta}})\right) = {} & (\tilde{\boldsymbol{\Theta}}, \boldsymbol{\Theta})_{\boldsymbol{F}} - \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}^2 \leq \\ & \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}\|\boldsymbol{\Theta}\|_{\boldsymbol{F}} - \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}^2 \leq \\ & \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}\left(\boldsymbol{\Theta}_{\max} - \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}\right)\end{aligned} \tag{46}$$

考虑到鲁棒项 (35) 有

$$\begin{aligned}\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\tau}) = {} & \\ \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(-(\eta_\delta + \eta_\tau)\mathrm{sgn}(\boldsymbol{r}) + \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\tau}) \leq 0 & \end{aligned} \tag{47}$$

将式 (46) 和式 (47) 代入式 (45), 可得

$$\dot{V} \leq -K_{\max}\|\boldsymbol{r}\|^2 + k_\rho\|\boldsymbol{r}\|\|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}(\boldsymbol{\Theta}_{\max} - \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}) \tag{48}$$

若 $\dot{V} \leq 0$, 需要满足

$$K_{\max}\|\boldsymbol{r}\| \geq k_\rho\|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}(\boldsymbol{\Theta}_{\max} - \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}})$$

由于

$$\begin{aligned}\|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}(\boldsymbol{\Theta}_{\max} - \|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}}) = {} & \\ -\left(\|\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\|_{\boldsymbol{F}} - 0.5\boldsymbol{\Theta}_{\max}\right)^2 + & \\ 0.25{\boldsymbol{\Theta}_{\max}}^2 \leq 0.25{\boldsymbol{\Theta}_{\max}}^2 & \end{aligned} \tag{49}$$

只需要满足 $K_{\max}\|\boldsymbol{r}\| \geq 0.25k_\rho{\boldsymbol{\Theta}_{\max}}^2$, 选取合适的参数 K 和 k_ρ, 即可满足 $\dot{V} \leq 0$, 因此, 设计的空间绳系机器人控制器 (30) 可保证目标抓捕过程中的稳定控制. 空间绳系机器人内环位置控制器如图 4 所示.

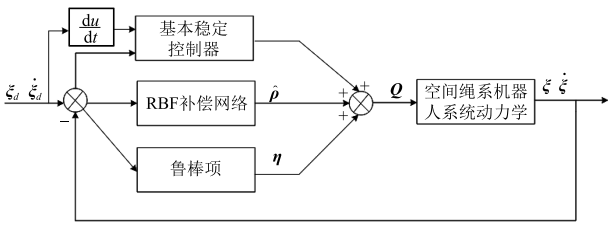


图 4 空间绳系机器人内环位置控制器框图

Fig. 4 Block diagram of the inner loop position controller for the TSR

4 仿真算例

仿真初始条件为: 以空间绳系机器人轨道面内目标抓捕对设计的抓捕稳定控制器进行验证. 空间平台运行于圆轨道上, 轨道角速度为 $\omega = 0.001033\,\mathrm{rad/s}$, 空间绳系机器人名义质量为 25 kg, 实际质量为 20 kg, 名义转动惯量为 $0.36\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2$ (绕 z 轴), 实际转动惯量为 $0.3\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2$, 系绳连接点位置量名义值为 0.3 m, 实际值为 0.25 m. 待抓捕目标质量为 $m_t = 500\,\mathrm{kg}$, 转动惯量为 $40\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2$ (绕 z 轴).

初始时刻, 待抓捕目标位于空间平台前 $(0, 202.4)\,\mathrm{m}$ 处, 初始姿态角为 $-33°$, 初始姿态角速度为 $0.02\,\mathrm{rad/s}$, 即以 $1°/\mathrm{s}$ 慢速自旋, 待抓捕杆状部位位于后方 $(0.005, -2)\,\mathrm{m}$ 处, 直径 $= 0.1\,\mathrm{m}$. 空间绳系机器人初始姿态角 $\psi = 90°$, 初始角速度 $\dot{\psi} = 0.2°/\mathrm{s}$; 空间系绳段数 $n = 16$, 初始系绳长度 $l_n = 12.5\,\mathrm{m}$, 绳长变化率 $\dot{l} = 0.01\,\mathrm{m/s}$; 初始面内角 $\alpha_n = 90°$, 面内角速度 $\dot{\alpha} = 0°/\mathrm{s}$. 空间绳系机器人沿 y 轴方向, 位于目标后方, 沿 $-$V-bar 方向对目标进行抓捕.

空间绳系机器人操作手长度 $l_1 = l_3 = 0.25\,\mathrm{m}$, $l_2 = l_4 = 0.20\,\mathrm{m}$, 初始时刻操作手爪角度为 $\gamma_1 = \gamma_3 = 120°$, $\gamma_2 = \gamma_4 = 120°$, 抓捕过程中, 关节角度 γ_1 和 γ_3 以 $2°/\mathrm{s}$ 的速度合拢至 $58°$, 而 γ_2 和 γ_4 保持不变. 碰撞过程中, 接触碰撞刚性系数 $k_g = 500\,\mathrm{N/m}$, 接触碰撞阻尼系数 k_c 取为 0.

对设计的目标抓捕过程稳定控制器 (30) 进行仿真验证, 并去除式 (30) 中的鲁棒及自适应项的控制器, 即 $\boldsymbol{Q} = K\boldsymbol{r} + M_0(\ddot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\dot{\boldsymbol{e}}) + N_0(\dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \Lambda\boldsymbol{e}) + \boldsymbol{G}_0$ 进行仿真对比, 两种仿真的初始条件与控制器参数均相同. 详细仿真结果如图 5 ~ 9 所示.

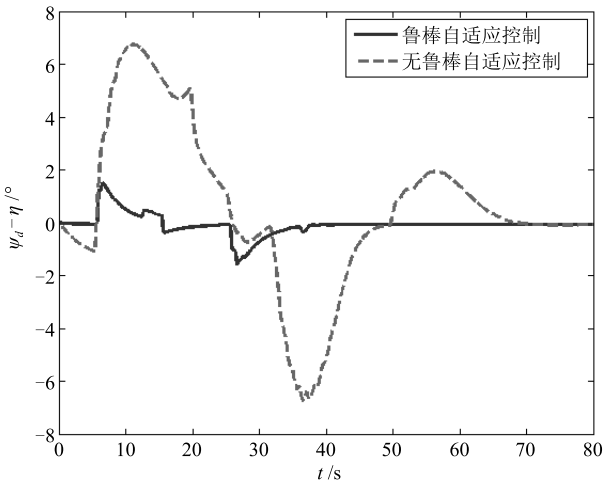


图 5　姿态角跟踪误差变化曲线

Fig. 5　The tracking deviation of the attitude angle

从图 5 可以看出, 两种控制方法均能实现对目标的跟踪控制, 其中鲁棒自适应稳定控制的收敛时间大概为 40 s, 而无鲁棒自适应控制收敛时间大概为 70 s, 收敛时间比前者多 30 s, 鲁棒自适应稳定控制的最大偏差为 1.8°, 而无鲁棒自适应控制的最大偏差达到 6.7°, 比前者大 4.9°, 并且在控制过程中, 姿态的震荡比前者更加剧烈.

从图 6 可以看出, 鲁棒自适应稳定控制能够实现对期望面内角的跟踪, 而无鲁棒自适应控制未能收敛至期望值附近, 存在较大的跟踪误差. 鲁棒自适

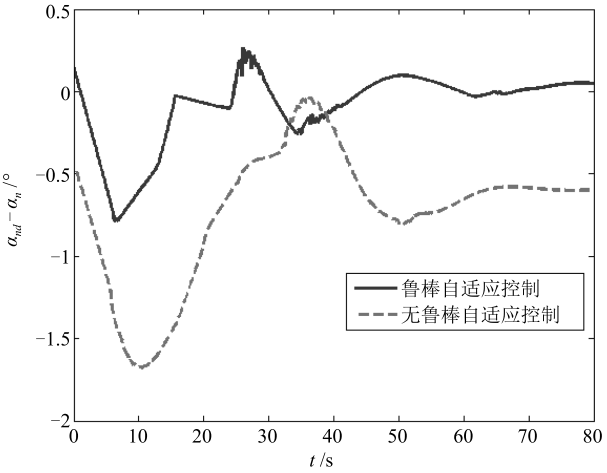


图 6　面内角跟踪误差变化曲线

Fig. 6　The tracking deviation of the in-plane angle

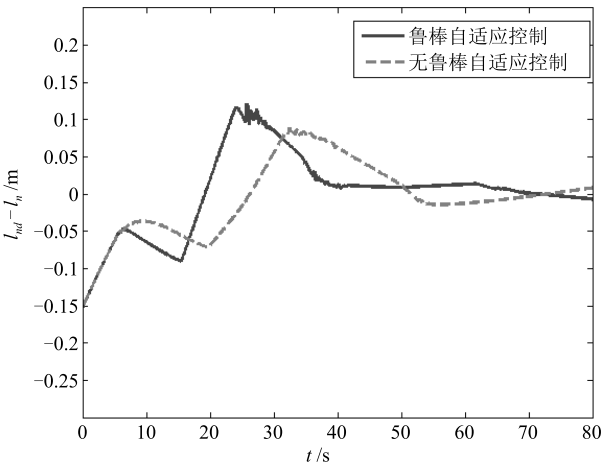


图 7　系绳长度跟踪误差变化曲线

Fig. 7　The tracking deviation of the tether length

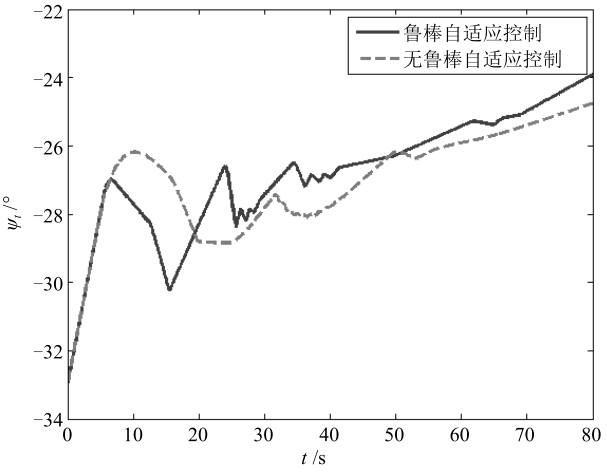


图 8　抓捕目标欧拉姿态角变化曲线

Fig. 8　The Eular attitude angle of the target

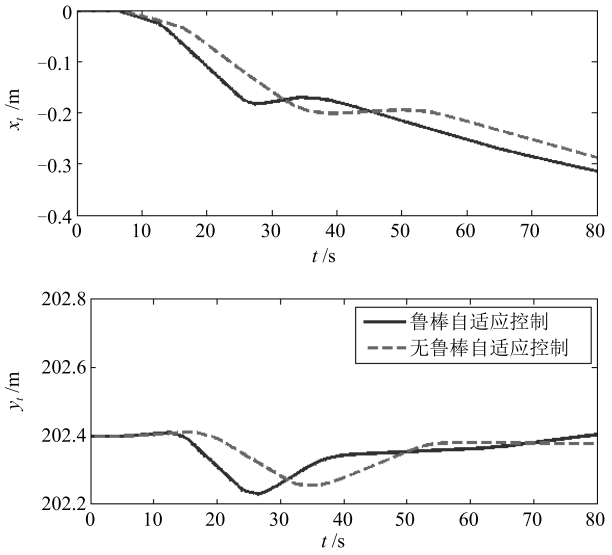


图 9 抓捕目标位置变化曲线

Fig. 9 The position of the target

应稳定控制的收敛时间大概为 60 s, 误差最终保持在 $\pm 0.1^\circ$ 以内, 对于本仿真算例中采用的操作手爪是可以接受的; 而无鲁棒自适应控制最终存在大概 0.6° 的较大稳态误差.

从图 7 可以看出, 两种控制方法均能实现对 l_n 的跟踪控制, 收敛时间基本一致, 大约为 70 s, l_n 的跟踪误差最终保持在 ± 2 cm 以内, 对于本仿真算例中采用的操作手爪是可以接受的.

从图 8 和图 9 可以看出, 抓捕控制后, 抓捕复合体的姿态和位置仍然发生变化, 可见抓捕后复合体会存在旋转角速度和线速度.

5 结论

针对空间绳系机器人目标抓捕稳定控制问题, 考虑到目标抓捕过程中的碰撞, 以及空间系绳干扰、模型不确定性等因素, 以目标抓捕阻抗控制器作为外环, 鲁棒自适应位置控制器作为内环, 设计了基于阻抗控制的目标抓捕鲁棒自适应控制器. 从仿真结果可以看出, 设计的控制器在控制过程中收敛时间较短, 并且控制精度较高, 能够满足操作手爪对目标抓捕要求. 而对目标完成抓捕后, 空间绳系机器人与目标组成的复合体存在旋转角速度和线速度, 如果不施加控制, 空间系绳与目标可能会发生系绳缠绕等不利现象, 严重时会威胁空间平台的安全, 由于抓捕后复合体存在的旋转角速度和线速度均会严重影响后续回收或者拖曳变轨等操作的顺利进行, 因此, 后续任务进行前需要对抓捕后复合体姿态进行稳定控制.

References

1 Huang P F, Wang D K, Meng Z J, Zhang F. Adaptive post-capture backstepping control for tumbling tethered space robot-target combination. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2016, **39**(1): 150−156

2 Huang Pan-Feng, Meng Zhong-Jie. *Techniques in the Tethered Space Robot*. Beijing: China Aerospace Press, 2014. 91−139
(黄攀峰, 孟中杰. 空间绳系机器人技术. 北京: 中国宇航出版社, 2014. 91−139)

3 Williams P. Deployment/retrieval optimization for flexible tethered satellite systems. *Nonlinear Dynamics*, 2008, **52**(1−2): 159−179

4 Wen H, Zhu Z H, Jin D P, Hua H Y. Constrained tension control of a tethered space-tug system with only length measurement. *Acta Astronautica*, 2016, **119**, 110−117

5 Aslanov V S, Ledkov A S. Dynamics of towed large space debris taking into account atmospheric disturbance. *Acta Mechanica*, 2014, **225**(9): 2685−2697

6 Chang I, Chung S J. Bio-inspired adaptive cooperative control of heterogeneous robotic networks. In: Proceedings of the 2009 AIAA Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. Chicago, USA: AIAA, 2009. 1−20

7 Huang P F, Zhang F, Xu X D, Meng Z J, Liu Z X, Hu Y X. Coordinated coupling control of tethered space robot using releasing characteristics of space tether. *Advances in Space Research*, 2016, **57**(7): 1528−1542

8 Xu Xiu-Dong, Huang Pan-Feng, Meng Zhong-Jie. Coordinated stability control of tethered space robot for capturing the target. *Robot*, 2014, **36**(1): 100−110
(徐秀栋, 黄攀峰, 孟中杰. 空间绳系机器人抓捕目标过程协同稳定控制. 机器人, 2014, **36**(1): 100−110)

9 Wang D K, Huang P F, Meng Z J. Coordinated stabilization of tumbling targets using tethered space manipulators. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, **51**(3): 2420−2432

10 Guo Wen-Hao, Wang Tian-Shu. Pre-impact configuration optimization for a space robot capturing target satellite. *Journal of Astronautics*, 2015, **36**(4): 390−396)
(郭闻昊, 王天舒. 空间机器人抓捕目标星碰撞前构型优化. 宇航学报, 2015, **36**(4): 390−396)

11 Chen Gang, Jia Qing-Xuan, Sun Han-Xu, Hong Lei. Analysis on impact motion of space robot in the object capturing process. *Robot*, 2010, **32**(3): 432−438
(陈钢, 贾庆轩, 孙汉旭, 洪磊. 空间机器人目标捕获过程中碰撞运动分析. 机器人, 2010, **32**(3): 432−438)

12 Wee L B, Walker M W. On the dynamics of contact between space robots and configuration control for impact minimization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, **9**(5): 581−591

13 Xu Wen-Fu, Li Cheng, Liang Bin, Liu Yu, Qiang Wen-Yi. Coordinated planning and control method of space robot for capturing moving target. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(9): 1216−1225
(徐文福, 李成, 梁斌, 刘宇, 强文义. 空间机器人捕获运动目标的协调规划与控制方法. 自动化学报, 2009, **35**(9): 1216−1225)

14 Aghili F. Pre- and post-grasping robot motion planning to capture and stabilize a tumbling/drifting free-floater with uncertain dynamics. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013. 5461−5468

15 Yoshida K, Dimitrov D, Nakanishi H. On the capture of tumbling satellite by a space robot. In: Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006. 4127−4132

16 Xu W F, Liu Y, Xu Y S. The coordinated motion planning of a dual-arm space robot for target capturing. *Robotica*, 2012, **30**(5): 755−771

17 Xu Wen-Fu, Meng De-Shan, Xu Chao, Liang Bin. Coordinated control of a free-floating space robot for capturing a target. *Robot*, 2013, **35**(5): 559−567
(徐文福, 孟得山, 徐超, 梁斌. 自由漂浮空间机器人捕获目标的协调控制. 机器人, 2013, **35**(5): 559−567)

18 Nakanishi H, Yoshida K. Impedance control for free-flying space robots-basic equations and applications. In: Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006. 3137−3142

19 Yoshida K, Nakanishi H, Ueno H, Inaba N, Nishimaki T, Oda M. Dynamics, control and impedance matching for robotic capture of a non-cooperative satellite. *Advanced Robotics*, 2004, **18**(2): 175−198

20 Wei Cheng, Zhao Yang, Tian Hao. Grasping control of space robot for capturing floating target. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, **31**(3): 632−637
(魏承, 赵阳, 田浩. 空间机器人捕获漂浮目标的抓取控制. 航空学报, 2010, **31**(3): 632−637)

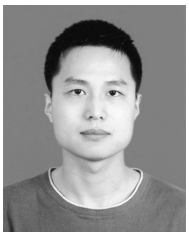
21 Leamy M J, Noor A K, Wasfy T M. Dynamic simulation of a tethered satellite system using finite elements and fuzzy sets. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, **190**(37−38): 4847−4870

22 Wu Yu-Xiang, Wang Cong. Deterministic learning based adaptive network control of robot in task space. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 806−815
(吴玉香, 王聪. 基于确定学习的机器人任务空间自适应神经网络控制. 自动化学报, 2013, **39**(6): 806−815)

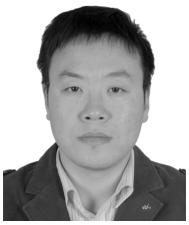
23 Xu W K, Cai C X, Zou Y. Neural-network-based robot time-varying force control with uncertain manipulator-environment system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2014, **36**(8): 999−1009

黄攀峰 西北工业大学航天学院教授. 主要研究方向为空间机器人, 绳系空间机器人, 智能控制, 机器视觉, 空间遥操作. 本文通信作者.
E-mail: pfhuang@nwpu.edu.cn
(**HUANG Pan-Feng** Professor at the School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers space robotics, tethered space robotics, intelligent control, machine vision, and space teleoperation. Corresponding author of this paper.)

胡永新 西北工业大学航天学院博士研究生. 主要研究方向为空间绳系机器人动力学与控制, 空间绳系装置对非合作目标抓捕控制.
E-mail: hu.yongxin@163.com
(**HU Yong-Xin** Ph. D. candidate at the School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers dynamic and control of tethered space robot, and control of the uncooperative target captured via tethered device.)



王东科 西北工业大学博士. 主要研究方向为空间绳系系统动力学建模, 非线性系统自适应控制.
E-mail: wdkly.student@gmail.com
(**WANG Dong-Ke** Ph. D. at Northwestern Polytechnical University. His research interest covers dynamic modeling for space tethered system, and adaptive control for nonlinear systems.)



孟中杰 博士, 西北工业大学航天学院副教授. 主要研究方向为空间绳系机器人动力学与控制, 智能飞行器系统.
E-mail: mengzhongjie@nwpu.edu.cn
(**MENG Zhong-Jie** Ph. D., associate professor at the School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers dynamics and control of tethered space robots, and intelligent spacecraft system.)

刘正雄 博士, 西北工业大学航天学院讲师. 主要研究方向为空间遥操作, 多体动力学和人机交互.
E-mail: liuzhengxiong@nwpu.edu.cn
(**LIU Zheng-Xiong** Ph. D., lecturer at the School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers space teleoperation, multi-body dynamics, and man-machine interaction.)