

文章编号:1006-2467(2020)06-0615-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.184

# 主从机械手遥操作双边自适应阻抗控制策略

张建军<sup>1</sup>, 吴中华<sup>1</sup>, 刘群坡<sup>1</sup>, 王红旗<sup>1</sup>, 刘卫东<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;

2. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘要:**在主从机械手遥操作实现力、位移协同一致跟踪控制过程中,存在着机械手关节摩擦以及外部不确定干扰引起的模型不确定的问题,针对此问题提出了双边自适应阻抗控制策略.通过设计两种非线性模型参考自适应控制器,设计基于滑模函数的鲁棒自适应控制律补偿机械手模型不确定误差;利用自适应律估计外界干扰的上界,保证了主从机械手闭环动态方程与参考阻抗模型动态方程相一致,实现了主从机械手末端对参考阻抗模型输出的期望位置误差渐进收敛于零.通过李雅普诺夫函数证明了跟踪性能与全局稳定性,在 MATLAB/Simulink 平台上实现了二自由度机械手遥操作仿真实验.结果表明:整体控制在模型不确定及外部干扰条件下具有很好的力-位置跟踪渐进收敛能力,整体系统具有稳定性和较高的透明性,并且具有鲁棒性及较小的稳态误差,具有自适应控制能力.

**关键词:**遥操作;阻抗控制;力-位置跟踪;鲁棒性;自适应律

**中图分类号:** TP 242

**文献标志码:** A

## Bilateral Adaptive Impedance Control Scheme in Master-Slave Manipulator Teleoperation System

ZHANG Jianjun<sup>1</sup>, WU Zhonghua<sup>1</sup>, LIU Qunpo<sup>1</sup>, WANG Hongqi<sup>1</sup>, LIU Weidong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University,

Jiaozuo 454000, Henan, China; 2. School of Marine Science and Technology,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In the process of force-displacement tracking control in the bilateral teleoperation system, there are uncertainties caused by the joint friction and external uncertainty disturbance in the manipulator model. Therefore, a bilateral adaptive impedance control strategy is proposed for the problems in the teleoperation system. A robust adaptive control law based on sliding mode function is designed to compensate the uncertain errors of the manipulator model, and two kinds of non-linear model reference adaptive controller are designed. The adaptive law is employed to estimate the upper bound of the external disturbance, which ensures that the closed-loop dynamic equations of the master and slave robots are consistent with the dynamic equations of the reference impedance model, and realizes that the expected position error of the reference impedance model output and the end-effector position of the master and slave robots asymptotically converge to zero. The Lyapunov function is employed to prove the tracking performance and

收稿日期:2018-06-08

基金项目:国家自然科学基金(61903126),河南省高等学校重点科研项目(20A590001),国家重点研发计划(2016YFC0301700)资助项目

作者简介:张建军(1983-),男,河南省周口市人,讲师,主要从事水下机械手遥操作及力觉感知研究.

通信作者:吴中华,男,讲师,电话(Tel.):0391-3987550;E-mail: wuzhonghua@hpu.edu.cn.

global stability. A 2 degree of freedom (DOF) teleoperation simulation is achieved on the MATLAB/Simulink platform, and the force-position tracking asymptotic convergence ability is verified. The results show that the overall controller has a good force-position tracking ability under the conditions of model uncertainty and external disturbances. The overall system has stability and a high transparency, and it has robustness and small steady-state error with adaptive control capability.

**Key words:** teleoperation; impedance control; force-position tracking; robustness; adaptive law

主从机械手遥操作双边系统解决了因距离限制使操作者直接处于危险区域的问题,实现了人机智能交互<sup>[1]</sup>.从机械手位于工作区域直接与操作对象交互,跟踪主机械手的运动信号并将与环境交互力信号传送至本地主机械手,使操作者在操作本地主机械手的同时能够感知从机械手传至本地的力信息<sup>[2]</sup>.然而,主从机械手具有非线性特征、参数的不确定性<sup>[3]</sup>、关节摩擦<sup>[4]</sup>、外部干扰以及通讯时延问题<sup>[5]</sup>.此外,操作者和远端环境分别与主从机械手交互影响机械手数学模型.远端从机械手运动过程受到阻力等不确定扰动,难以获得机器人数学模型,且无法通过线性系统的伺服控制理论设计控制器.不确定遥操作控制在保证整体系统稳定性的前提下,提高透明性及鲁棒性,将位置、力信号同步地在主、从机械手上复现,依然是整体控制目标<sup>[6]</sup>.

假设操作者与被操作对象无源,主从遥操作系统可以看作外环、实现主手(全文主手即主机械手)力跟踪、内环从手位置跟踪的双闭环控制系统.其控制主要有基于力反馈<sup>[7]</sup>以及位置反馈<sup>[8]</sup>两种反馈方式,实现主手与从手(全文从手即从机械手)力和位置的协同一致.为了解决遥操作控制中存在的模型不确定及外部干扰等问题,国内外很多学者提出了不同的控制方法<sup>[9-10]</sup>.针对机械手双边遥操作系统从手不确定干扰问题,Park等<sup>[11-12]</sup>提出了从手阻抗控制与积分滑模消除从手不确定干扰问题并实现了力位移跟踪,但未考虑主手关节摩擦以及外部不确定问题.郭语等<sup>[13]</sup>针对主手的不确定问题,提出了主手端扰动观测器的双边阻抗控制下的自适应控制.然而其控制律设计以质量-阻尼线性系统为基础,对于二维竖直平面受到重力影响存在控制不确定性.Sharifi等<sup>[14-15]</sup>在主从机器人考虑非线性动力学模型,针对关节摩擦引起的模型不确定问题,提出了自适应双边控制方法并应用到康复训练遥操作过程中,但是没考虑外部干扰引起的不确定问题.针对速度不可测以及不确定动态方程问题,Yang<sup>[16]</sup>提出了基于速度观测器的神经网络不确定补偿的鲁棒滑模控制,实现了主从手力位置同步.

通讯时延是影响遥操作控制性能的关键问题,很多学者对固定时延以及可变时延做了深入研究.然而,对于如排雷排爆、水下遥操作、核辐射区遥操作等双边遥操作系统,由于距离较近通讯时延影响可以忽略不计,此时模型不确定性以及外部干扰引起的问题更为明显.本文针对主从机械手双边遥操作过程中动态模型不确定及外部干扰问题,提出了双边自适应阻抗控制策略.通过建立线性二阶微分方程的参考阻抗模型,将主从手参考阻抗模型的动态响应期望位置作为主从机械手末端的操作空间下的位置跟踪目标,并且设计了主从手控制律.通过自适应调节补偿参数的不确定性,针对外部干扰,设计了自适应上界估计率,利用基于滑模控制的自适应律来抑制不确定误差及外部干扰作用,实现了模型不确定性及外部干扰下的鲁棒性能.所设计的控制律无需获知双机械手的准确数学模型以及主从机械手的不确定干扰上界,只需要保证主从手力测量的准确性,主从机械手位置和关节长度的准确测量,即可实现主从手力位移跟踪渐进收敛特征.

## 1 数学模型及基本属性

$n$  自由度主从机械手关节空间非线性动力学模型为<sup>[17]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m)\ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)\dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m) + \\ \mathbf{F}_m(\dot{\mathbf{q}}_m) = \boldsymbol{\tau}_m + \mathbf{d}_m - \mathbf{J}_m^T(\mathbf{q}_m)\mathbf{F}_h \\ \mathbf{M}_s(\mathbf{q}_s)\ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{C}_s(\mathbf{q}_s, \dot{\mathbf{q}}_s)\dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{g}_s(\mathbf{q}_s) + \\ \mathbf{F}_s(\dot{\mathbf{q}}_s) = \boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{d}_s - \mathbf{J}_s^T(\mathbf{q}_s)\mathbf{F}_e \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $i=m,s$ ,分别表示主、从机械手标识. $\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i, \ddot{\mathbf{q}}_i$ 分别为主、从机械手关节的位置,速度和加速度; $\mathbf{M}_i(\mathbf{q}_i), \mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i), \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i), \mathbf{F}_i(\dot{\mathbf{q}}_i), \mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i)$ 分别为主、从机械手的惯性量,离心力与哥氏力的和,重力项,摩擦力矩以及雅克比矩阵.设 $\mathbf{F}_i(\dot{\mathbf{q}}_i)$ 主要来自于内部关节之间的摩擦, $\mathbf{F}_i(\dot{\mathbf{q}}_i) = \mathbf{D}_i\dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{N}_i\text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}_i)$ , $\mathbf{D}_i$ 和 $\mathbf{N}_i$ 分别为黏滞系数和库伦摩擦系数; $\boldsymbol{\tau}_i$ 为控制输入转矩,即机械手关节转动的驱动力; $\mathbf{d}_i$ 为未知有界干扰转矩; $\mathbf{F}_h$ 为操作者施加力; $\mathbf{F}_e$ 为从机械手与抓

取目标的接触力,  $\boldsymbol{F}_h$ 、 $\boldsymbol{F}_e$  可通过触觉力传感器测得. 主从机械手操作空间与关节空间的换算为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{x}_i &= \boldsymbol{\Omega}_i(\boldsymbol{q}_i) \\ \dot{\boldsymbol{x}}_i &= \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}_i)\dot{\boldsymbol{q}}_i \\ \ddot{\boldsymbol{x}}_i &= \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}_i)\ddot{\boldsymbol{q}}_i + \dot{\boldsymbol{J}}_i(\boldsymbol{q}_i)\dot{\boldsymbol{q}}_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $\boldsymbol{\Omega}_i(\boldsymbol{q}_i)$  为关节空间下关节位置  $\boldsymbol{q}_i$  与操作空间下末端位置  $\boldsymbol{x}_i$  的函数关系. 设  $\boldsymbol{x}_i$  与  $\boldsymbol{q}_i$  同维, 即设机械手为非冗余,  $\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}_i) = \text{d}\boldsymbol{\Omega}_i(\boldsymbol{q}_i)/\text{d}\boldsymbol{q}_i$  为非奇异矩阵. 将式(2)代入式(1), 整理可得机械手在操作空间的动力学方程:

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{M}_{\text{xm}}(\boldsymbol{q}_m)\ddot{\boldsymbol{x}}_m + \boldsymbol{C}_{\text{xm}}(\boldsymbol{q}_m, \dot{\boldsymbol{q}}_m)\dot{\boldsymbol{x}}_m + \boldsymbol{g}_{\text{xm}}(\boldsymbol{q}_m) + \boldsymbol{F}_{\text{xm}}(\dot{\boldsymbol{q}}_m) &= \boldsymbol{\tau}_{\text{xm}} + \boldsymbol{d}_{\text{xm}} - \boldsymbol{F}_h \\ \boldsymbol{M}_{\text{xs}}(\boldsymbol{q}_m)\ddot{\boldsymbol{x}}_s + \boldsymbol{C}_{\text{xs}}(\boldsymbol{q}_m, \dot{\boldsymbol{q}}_m)\dot{\boldsymbol{x}}_s + \boldsymbol{g}_{\text{xs}}(\boldsymbol{q}_m) + \boldsymbol{F}_{\text{xs}}(\dot{\boldsymbol{q}}_m) &= \boldsymbol{\tau}_{\text{xs}} + \boldsymbol{d}_{\text{xs}} - \boldsymbol{F}_e \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

结合式(1)与(3)可得:

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{M}_{\text{xi}}(\boldsymbol{q}_i) &= \boldsymbol{J}_i^{-\text{T}}\boldsymbol{M}_i(\boldsymbol{q}_i)\boldsymbol{J}_i^{-1} \\ \boldsymbol{C}_{\text{xi}}(\boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i) &= \boldsymbol{J}_i^{-\text{T}}[\boldsymbol{C}_i(\boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i) - \boldsymbol{M}_i(\boldsymbol{q}_i)\boldsymbol{J}_i^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}]\boldsymbol{J}_i^{-1} \\ \boldsymbol{g}_{\text{xi}}(\boldsymbol{q}_i) &= \boldsymbol{J}_i^{-\text{T}}\boldsymbol{g}_i(\boldsymbol{q}_i) \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{xi}} &= \boldsymbol{J}_i^{-\text{T}}\boldsymbol{\tau}_i \\ \boldsymbol{d}_{\text{xi}} &= \boldsymbol{J}_i^{-\text{T}}\boldsymbol{d}_i \\ \boldsymbol{F}_{\text{xi}}(\dot{\boldsymbol{q}}_i) &= \boldsymbol{J}_i^{-\text{T}}\boldsymbol{F}_i(\dot{\boldsymbol{q}}_i) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上述非线性机械手系统具有以下属性<sup>[18-19]</sup>:

**属性 1** 机械手惯性矩阵  $\boldsymbol{M}_i(\boldsymbol{q}_i)$  与  $\boldsymbol{M}_{\text{xi}}(\boldsymbol{q}_i)$  正定, 且有上下界.

**属性 2**  $\dot{\boldsymbol{M}}_i(\boldsymbol{q}_i) - 2\boldsymbol{C}_i(\boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i)$  与  $\dot{\boldsymbol{M}}_{\text{xi}}(\boldsymbol{q}_i) - 2\boldsymbol{C}_{\text{xi}}(\boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i)$  分别为斜对称矩阵.

**属性 3** 雅可比矩阵  $\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}_i)$  及其逆矩阵  $\boldsymbol{J}_i^{-1}(\boldsymbol{q}_i)$

始终有界, 即分别存在正实数  $\mu_1$  与  $\mu_2$ , 满足  $\|\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}_i)\| \leq \mu_1$  与  $\|\boldsymbol{J}_i^{-1}(\boldsymbol{q}_i)\| \leq \mu_2$ .

**属性 4** 根据未知参数不同, 机械手动力学模型可以线性化为

$$\boldsymbol{M}_i(\boldsymbol{q}_i)\boldsymbol{\varphi}_{i1} + \boldsymbol{C}_i(\boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i)\boldsymbol{\varphi}_{i2} + \boldsymbol{g}_i(\boldsymbol{q}_i) + \boldsymbol{F}_i(\dot{\boldsymbol{q}}_i) = \boldsymbol{Y}_i(\boldsymbol{\varphi}_{i1}, \boldsymbol{\varphi}_{i2}, \boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i)\boldsymbol{\theta}_i \quad (5)$$

式中:  $\boldsymbol{\varphi}_{i1}, \boldsymbol{\varphi}_{i2}$  为任意已知向量;  $\boldsymbol{Y}_i(\boldsymbol{\varphi}_{i1}, \boldsymbol{\varphi}_{i2}, \boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i)\boldsymbol{\theta}_i$  为系统已知坐标变量及其导数组成的系统回归矩阵,  $\boldsymbol{\theta}_i$  为包含机械手数学模型未知参数信息的常数向量. 设主从机械手外部未知干扰项有上界, 根据属性 3 有:  $\|\boldsymbol{d}_{\text{mx}}\| = \|\boldsymbol{J}_m^{-\text{T}}\boldsymbol{d}_m\| \leq \Theta_{m0}, \|\boldsymbol{d}_{\text{sx}}\| = \|\boldsymbol{J}_s^{-\text{T}}\boldsymbol{d}_s\| \leq \Theta_{s0}$ .  $\Theta_{m0}, \Theta_{s0}$  为主从机械手外部干扰在操作空间的上界,  $\|\cdot\|$  表示向量的 Euclid 范数.

2 整体控制策略

本文提出的基于参考阻抗模型的自适应双边控制框图如图 1 所示.  $\boldsymbol{x}_{\text{imm}}, \boldsymbol{x}_{\text{ims}}$  分别为主、从机械手阻抗模型输出的期望位置. 为了实现主机械手上的人机交互以及从机械手目标抓取过程交互, 设计了两种阻抗模型. 在该控制方案中, 主手通过操作者作用力与环境力建立阻抗模型获取期望的主手位置, 通过鲁棒自适应控制律及外部误差上界估计实现基于阻抗模型的期望位置跟踪. 从手通过环境力与主手位置建立期望的阻抗模型, 通过鲁棒自适应调节控制律及自适应上界估计实现从手对从手期望阻抗位置跟踪. 基于阻抗模型的参考自适应阻抗控制的目标是基于关节摩擦及外部干扰等引起数学模型不确定的前提下, 保证主从手力-位置跟踪的稳定性及收敛性.

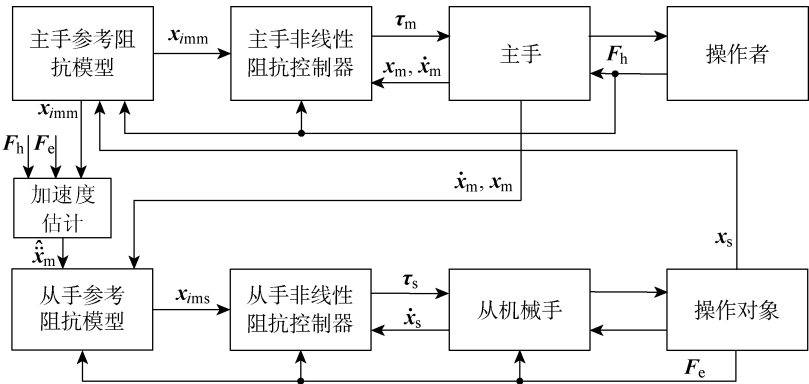


图 1 遥操作双边自适应阻抗控制结构图

Fig. 1 Structure of adaptive impedance control of teleoperation system

3 控制器设计

阻抗控制通过调节用户设定的目标阻抗模型使

机器人末端实现柔顺性运动, 将阻抗控制加入自适应特征, 使在外界不确定条件下主机械手触觉力跟踪从手触觉力信号具有鲁棒性能. 在自适应阻抗控

制实现过程中,将设计的阻抗控制模型作为参考模型,通过设计控制器和自适应律使被控对象闭环动态模型逼近参考模型.在提出的阻抗遥操作系统中,定义了两种阻抗模型根据主手上与人的交互以及从手与环境的交互过程,主从机械手期望阻抗模型设计如下<sup>[20]</sup>:

$$\mathbf{M}_{\text{md}}\ddot{\mathbf{x}}_{\text{imm}} + \mathbf{B}_{\text{md}}\dot{\mathbf{x}}_{\text{imm}} = \mathbf{F}_{\text{h}} - \mathbf{F}_{\text{e}} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{\text{sd}}\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ims}} + \mathbf{B}_{\text{sd}}\dot{\mathbf{x}}_{\text{ims}} + \mathbf{K}_{\text{sd}}\mathbf{x}_{\text{ims}} = -\mathbf{F}_{\text{e}} \quad (7)$$

式(6)为主机械手建立基于主手操作力与环境力差的阻抗模型,其中 $\mathbf{M}_{\text{md}}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{md}}$ 是主机械手阻抗模型虚拟惯性和阻尼,为正定对角矩阵.式(7)为基于机械手末端位置与期望位置误差与从手抓取目标力之间的阻抗模型,其中 $\mathbf{M}_{\text{sd}}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{sd}}$ 及 $\mathbf{K}_{\text{sd}}$ 是从机械手阻抗模型虚拟惯性、阻尼及刚度,分别为正定对角矩阵.主从机械手期望阻抗模型参数选择的是正定矩阵,主从机械手是正定的二阶微分参考阻抗模型.从机械手阻抗模型输出设计为期望阻抗模型输出位移与主机械手位移之差,即可得从机械手的期望位置为: $\mathbf{x}_{\text{ims}} = \bar{\mathbf{x}}_{\text{ims}} + \mathbf{x}_{\text{m}}$ .根据主从机械手设定的期望阻抗模型,设计非线性双边模型参考自适应阻抗控制律.为了实现主从机械手末端位置对期望阻抗模型输出的期望位置跟踪,建立基于位置误差和速度误差的滑模面函数,分别设计为<sup>[21]</sup>

$$\mathbf{s}_{\text{m}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{m}} + \lambda_{\text{m}}\bar{\mathbf{x}}_{\text{m}} \quad (8)$$

$$\mathbf{s}_{\text{s}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{s}} + \lambda_{\text{s}}\bar{\mathbf{x}}_{\text{s}} \quad (9)$$

式中: $\bar{\mathbf{x}}_{\text{m}}$ 、 $\bar{\mathbf{x}}_{\text{s}}$ 与 $\dot{\mathbf{x}}_{\text{m}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}_{\text{s}}$ 分别为主从机械手末端位置跟踪期望阻抗响应的位置和速度误差.即 $\bar{\mathbf{x}}_{\text{m}} = \mathbf{x}_{\text{m}} - \mathbf{x}_{\text{imm}}$ , $\bar{\mathbf{x}}_{\text{s}} = \mathbf{x}_{\text{s}} - \mathbf{x}_{\text{ims}}$ ;  $\lambda_{\text{m}}$ 、 $\lambda_{\text{s}}$ 分别为正定对角矩阵.

定义主从机械手的参考变量 $\mathbf{r}_{\text{m}}$ 和 $\mathbf{r}_{\text{s}}$ 为: $\dot{\mathbf{r}}_{\text{m}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{imm}} - \lambda_{\text{m}}\bar{\mathbf{x}}_{\text{m}}$ , $\dot{\mathbf{r}}_{\text{s}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{ims}} - \lambda_{\text{s}}\bar{\mathbf{x}}_{\text{s}}$ .根据滑模方程与参考变量,可得滑模面函数 $\mathbf{s}_{\text{m}}$ 、 $\mathbf{s}_{\text{s}}$ 与 $\mathbf{r}_{\text{m}}$ 、 $\mathbf{r}_{\text{s}}$ 的关系为: $\mathbf{s}_{\text{m}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{m}} - \dot{\mathbf{r}}_{\text{m}}$ , $\mathbf{s}_{\text{s}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{s}} - \dot{\mathbf{r}}_{\text{s}}$ .针对式(8)和(9)求一阶导数,分别左乘 $\mathbf{M}_{\text{xm}}$ 与 $\mathbf{M}_{\text{xs}}$ ,将机械手操作空间下的动态模型式(3)分别代入可得

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{xm}}\dot{\mathbf{s}}_{\text{m}} &= \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\ddot{\mathbf{x}}_{\text{m}} - \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\ddot{\mathbf{x}}_{\text{imm}} + \\ &\lambda_{\text{m}}\mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\dot{\mathbf{x}}_{\text{m}} = \\ &-\lambda_{\text{m}}\mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}} - \mathbf{C}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}} + \\ &\mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})(\lambda_{\text{m}}\mathbf{s}_{\text{m}} - \ddot{\mathbf{r}}_{\text{m}}) - \mathbf{C}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{m}})\dot{\mathbf{r}}_{\text{m}} - \\ &\mathbf{g}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) - \mathbf{F}_{\text{xm}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{m}}) + \boldsymbol{\tau}_{\text{xm}} + \mathbf{d}_{\text{xm}} - \mathbf{F}_{\text{h}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{xs}}\dot{\mathbf{s}}_{\text{s}} &= \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\ddot{\mathbf{x}}_{\text{s}} - \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ims}} + \lambda_{\text{s}}\mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\dot{\mathbf{x}}_{\text{s}} = \\ &-\lambda_{\text{s}}\mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}} - \mathbf{C}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}} + \\ &\mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})(\lambda_{\text{s}}\mathbf{s}_{\text{s}} - \ddot{\mathbf{r}}_{\text{s}}) - \mathbf{C}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}})\dot{\mathbf{r}}_{\text{s}} - \\ &\mathbf{g}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) - \mathbf{F}_{\text{xs}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{s}}) + \boldsymbol{\tau}_{\text{xs}} + \mathbf{d}_{\text{xs}} - \mathbf{F}_{\text{e}} \end{aligned} \quad (11)$$

**定理1** 假设 $n$ 自由度主从机械手动态方程,即式(1)的 $\mathbf{M}_{\text{xi}}(\mathbf{q}_i)$ 、 $\mathbf{C}_{\text{xi}}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$ 、 $\mathbf{g}_{\text{xi}}(\mathbf{q}_i)$ 及 $\mathbf{F}_{\text{xi}}(\dot{\mathbf{q}}_i)$ 已知,外部干扰项 $\mathbf{d}_{\text{xi}}$ 已知,终端滑模面设计为式(8)、(9),主从手控制律设计为式(12)、(13),则主从手遥操作闭环系统信号有界并且主从手力-位移跟踪误差渐进收敛于0.此时对应的控制量为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{meq}} &= \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})(\ddot{\mathbf{r}}_{\text{m}} - \lambda_{\text{m}}\mathbf{s}_{\text{m}}) + \mathbf{C}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{m}})\dot{\mathbf{r}}_{\text{m}} + \\ &\mathbf{g}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) + \mathbf{F}_{\text{xm}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{m}}) - \mathbf{d}_{\text{xm}} + \mathbf{F}_{\text{h}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{seq}} &= \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})(\ddot{\mathbf{r}}_{\text{s}} - \lambda_{\text{s}}\mathbf{s}_{\text{s}}) + \mathbf{C}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}})\dot{\mathbf{r}}_{\text{s}} + \\ &\mathbf{g}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) + \mathbf{F}_{\text{xs}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{s}}) - \mathbf{d}_{\text{xs}} + \mathbf{F}_{\text{e}} \end{aligned} \quad (13)$$

**证明:**选取李雅普诺夫函数为

$$V_0 = \frac{1}{2}[\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}}\mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}}\mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}}] \quad (14)$$

由于 $\mathbf{M}_{\text{xm}}$ 、 $\mathbf{M}_{\text{xs}}$ 正定,很显然 $V_0 > 0$ .对式(14)求 $V_0$ 关于时间的一阶导数,将式(10)、(11)及相应控制律(12)、(13)代入,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \frac{1}{2}\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}}\dot{\mathbf{M}}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}} + \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}}\mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\dot{\mathbf{s}}_{\text{m}} + \\ &\frac{1}{2}\mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}}\dot{\mathbf{M}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}}\mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\dot{\mathbf{s}}_{\text{s}} = \\ &\frac{1}{2}\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}}\dot{\mathbf{M}}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}} + \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}}[-\lambda_{\text{m}}\mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}} - \\ &\mathbf{C}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}}] + \frac{1}{2}\mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}}\dot{\mathbf{M}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}} + \\ &\mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}}[-\lambda_{\text{s}}\mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}} - \mathbf{C}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}}] = \\ &-\lambda_{\text{m}}\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}}\mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{s}_{\text{m}} - \lambda_{\text{s}}\mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}}\mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})\mathbf{s}_{\text{s}} \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

定理1证明完毕.然而,实际应用中主从机械手控制器无法保证动态方程参数以及外部干扰信号全部已知,基于 $\boldsymbol{\tau}_{\text{meq}}$ 、 $\boldsymbol{\tau}_{\text{seq}}$ 设计不确定条件下的主从手操作空间控制律为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{xm}} &= \hat{\mathbf{M}}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}})(\ddot{\mathbf{r}}_{\text{m}} - \lambda_{\text{m}}\mathbf{s}_{\text{m}}) + \hat{\mathbf{C}}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{m}})\dot{\mathbf{r}}_{\text{m}} + \\ &\hat{\mathbf{g}}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) + \hat{\mathbf{F}}_{\text{xm}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{m}}) + \boldsymbol{\tau}_{\text{xm}0} + \mathbf{F}_{\text{h}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{xs}} &= \hat{\mathbf{M}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}})(\ddot{\mathbf{r}}_{\text{s}} - \lambda_{\text{s}}\mathbf{s}_{\text{s}}) + \hat{\mathbf{C}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}})\dot{\mathbf{r}}_{\text{s}} + \\ &\hat{\mathbf{g}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) + \hat{\mathbf{F}}_{\text{xs}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{s}}) + \boldsymbol{\tau}_{\text{xs}0} + \mathbf{F}_{\text{e}} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\hat{\mathbf{M}}_{\text{xi}}(\mathbf{q}_i)$ 、 $\hat{\mathbf{C}}_{\text{xi}}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$ 、 $\hat{\mathbf{g}}_{\text{xi}}(\mathbf{q}_i)$ 及 $\hat{\mathbf{F}}_{\text{xi}}(\dot{\mathbf{q}}_i)$ 分别为对应参数的估计值; $\boldsymbol{\tau}_{\text{xm}0}$ 、 $\boldsymbol{\tau}_{\text{xs}0}$ 分别为处理外部干扰控制律,分别设计为: $\boldsymbol{\tau}_{\text{xm}0} = -K_{\text{pm}}\mathbf{s}_{\text{m}} - \mathbf{s}_{\text{m}}\Theta_{\text{m}}/(\|\mathbf{s}_{\text{m}}\| + e^{-a_{\text{m}}t})$ , $\boldsymbol{\tau}_{\text{xs}0} = -K_{\text{ps}}\mathbf{s}_{\text{s}} - k_{\text{es}}\text{sgn}(\mathbf{s}_{\text{s}}) - \mathbf{s}_{\text{s}}\Theta_{\text{s}}/(\|\mathbf{s}_{\text{s}}\| + e^{-a_{\text{s}}t})$ ,其中 $K_{\text{pm}}$ 、 $K_{\text{ps}}$ 分别为逼近误差鲁棒控制项系数, $\Theta_{\text{m}}$ 、 $\Theta_{\text{s}}$ 为未知干扰上界估计, $a_{\text{m}}$ 、 $a_{\text{s}}$ 为正常数; $t$ 为时间.根据机器人操作空间与关节空间的转换关系,式(16)~(17)变换为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{m}} &= \hat{\mathbf{M}}_{\text{m}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{J}_{\text{m}}^{-1}(\ddot{\mathbf{r}}_{\text{m}} - \lambda_{\text{m}}\mathbf{s}_{\text{m}}) + [\hat{\mathbf{C}}_{\text{m}}(\mathbf{q}_{\text{m}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{m}}) - \\ &\hat{\mathbf{M}}_{\text{m}}(\mathbf{q}_{\text{m}})\mathbf{J}_{\text{m}}^{-1}\dot{\mathbf{J}}_{\text{m}}]\mathbf{J}_{\text{m}}^{-1}\dot{\mathbf{r}}_{\text{m}} + \hat{\mathbf{g}}_{\text{m}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) + \hat{\mathbf{F}}_{\text{m}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{m}}) - \end{aligned}$$

$$K_{pm}s_m - s_m\Theta_m/(\|s_m\| + e^{-a_m t}) + J_m^T(q_m)F_h \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \tau_s = & \hat{M}_s(q_s)J_m^{-1}(\ddot{r}_s - \lambda_s s_s) + [\hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s) - \\ & \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}\dot{J}_s]J_s^{-1}\dot{r}_s + \hat{g}_s(q_s) + \hat{F}_s(\dot{q}_s) - \\ & K_{ps}s_s - k_{es}\operatorname{sgn}(s_s) - s_s\Theta_s/(\|s_s\| + e^{-a_s t}) + \\ & J_s^T(q_s)F_e \end{aligned} \quad (19)$$

在计算从机械手参考位置  $\ddot{r}_s$  时需  $\ddot{x}_m$ , 加速度项难以精确测量, 根据主机械手操作空间跟踪期望位置特征, 设计  $\ddot{x}_m$  的估计值计算式为

$$\hat{\ddot{x}}_m = M_{md}^{-1}(F_h - F_e - B_{md}\dot{x}_{imm}) \quad (20)$$

根据加速度估计项, 则从机械手期望轨迹

$$\ddot{x}_{imps} = \ddot{x}_m + \ddot{\hat{x}}_{imps}, \hat{\ddot{x}}_{imps} \text{ 可表示为}$$

$$\begin{aligned} \hat{\ddot{x}}_{imps} = & \hat{\ddot{x}}_m + \ddot{\hat{x}}_{imps} = \\ & \ddot{x}_m + \hat{\ddot{x}}_m + \Delta\ddot{x}_m = \ddot{x}_{imps} + \Delta\ddot{x}_m \end{aligned} \quad (21)$$

式中:  $\Delta\ddot{x}_m = \hat{\ddot{x}}_m - \ddot{x}_m$  为加速度估计值与实际值之间的误差. 根据主机械手估计值  $\hat{\ddot{x}}_m$ , 则  $\ddot{r}_s = \ddot{x}_{ims} - \lambda_s \dot{x}_s$  可以重新表示为  $\hat{\ddot{r}}_s = \hat{\ddot{x}}_{ims} - \lambda_s \dot{x}_s$ , 则从机械手控制律重新设计为

$$\begin{aligned} \tau_s = & \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}(\hat{\ddot{r}}_s - \lambda_s s_s) + [\hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s) - \\ & \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}\dot{J}_s]J_s^{-1}\dot{r}_s + \hat{g}_s(q_s) + \\ & \hat{F}_s(\dot{q}_s) - K_{ps}s_s - k_{es}\operatorname{sgn}(s_s) - \\ & s_s\Theta_s/(\|s_s\| + e^{-a_s t}) + J_s^T(q_s)F_e = \\ & \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}(\ddot{r}_s - \lambda_s s_s) + [\hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s) - \\ & \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}\dot{J}_s]J_s^{-1}\dot{r}_s + \hat{g}_s(q_s) + \\ & \hat{F}_s(\dot{q}_s) - K_{ps}s_s - k_{es}\operatorname{sgn}(s_s) + \\ & \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}\Delta\ddot{x}_m - s_s\Theta_s/ \\ & (\|s_s\| + e^{-a_s t}) + J_s^T(q_s)F_e \end{aligned} \quad (22)$$

式中: 设计  $k_{es}\operatorname{sgn}(s_s)$  项是为了消除  $\ddot{x}_m$  有界估计误差的鲁棒控制项, 为从机械手控制系统提供鲁棒性能. 根据属性 4, 控制律式(18)、(22)可变换为

$$\begin{aligned} \tau_m = & \hat{M}_m(q_m)\eta_{m1} + \hat{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\eta_{m2} + \\ & \hat{g}_m(q_m) + \hat{F}_m(\dot{q}_m) - J^m(q_m)K_{pm}s_m - \\ & J^m(q_m)s_m\Theta_m/(\|s_m\| + e^{-a_m t}) + J_m^T(q_m)F_h = \\ & Y_m(\eta_{m1}, \eta_{m2}, q_m, \dot{q}_m)\hat{\alpha}_m - J_m^T(q_m)K_{pm}s_m - \\ & J_m^T(q_m)s_m\Theta_m/(\|s_m\| + e^{-a_m t}) + J_m^T(q_m)F_h \quad (23) \\ \tau_s = & \hat{M}_s(q_s)\eta_{s1} + \hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\eta_{s2} + \hat{g}_s(q_s) + \\ & \hat{F}_s(\dot{q}_s) - J_s^T(q_s)K_{ps}s_s - \\ & J_s^T(q_s)k_{es}\operatorname{sgn}(s_s) + \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}\Delta\ddot{x}_m - \\ & J_s^T(q_s)s_s\Theta_s/(\|s_s\| + e^{-a_s t}) + J_s^T(q_s)F_e = \\ & Y_s(\eta_{s1}, \eta_{s2}, q_s, \dot{q}_s)\hat{\alpha}_s - J_s(q_s)K_{ps}s_s - \end{aligned}$$

$$k_{es}J_s^T(q_s)\operatorname{sgn}(s_s) + \hat{M}_s(q_s)J_s^{-1}\Delta\ddot{x}_m - J_s^T(q_s)s_s\Theta_s/(\|s_s\| + e^{-a_s t}) + J_s^T(q_s)F_e \quad (24)$$

式中:  $\hat{\alpha}_m, \hat{\alpha}_s$  为不确定项的估计值;  $Y_i(\eta_{i1}, \eta_{i2}, q_i, \dot{q}_i)$  为线性回归矩阵;  $\eta_{m1}, \eta_{m2}, \eta_{s1}$  及  $\eta_{s2}$  为主从机械手控制律参数, 可以分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \eta_{m1} &= J_m^{-1}(\ddot{r}_m - \lambda_m s_m - \dot{J}_m J_m^{-1} \dot{r}_m) \\ \eta_{m2} &= J_m^{-1} \dot{r}_m \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_{s1} &= J_s^{-1}(\ddot{r}_s - \lambda_s s_s - \dot{J}_s J_s^{-1} \dot{r}_s) \\ \eta_{s2} &= J_s^{-1} \dot{r}_s \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

主从机械手的自适应律设计为

$$\dot{\hat{\alpha}}_m = -P_m Y_m^T J_m^{-1} s_m, \quad \dot{\Theta}_m = \frac{\|s_m\|^2}{\|s_m\| + e^{-a_m t}} \quad (27)$$

$$\dot{\hat{\alpha}}_s = -P_s Y_s^T J_s^{-1} s_s, \quad \dot{\Theta}_s = \frac{\|s_s\|^2}{\|s_s\| + e^{-a_s t}} \quad (28)$$

式中:  $P_m, P_s$  为正定对角矩阵.

## 4 稳定性证明

**定理 2** 假设式(1)的  $M_{xi}(q_i), C_{xi}(q_i, \dot{q}_i), g_{xi}(q_i)$  及  $F_{xi}(\dot{q}_i)$  未知, 外部干扰项  $d_{xi}$  未知, 终端滑模面设计为式(9)、(10), 主从手控制律设计为式(23)、(24), 自适应律设计为式(27)、(28), 则主从手遥操作闭环系统信号有界并且主从手力-位移跟踪误差渐进收敛于 0.

**证明:** 选取李雅普诺夫函数为

$$V_1 = V_m + V_s \quad (29)$$

$$\begin{aligned} V_m = & \frac{1}{2}(s_m^T M_{xm}(q_m)s_m + \tilde{\alpha}_m^T P_m^{-1} \tilde{\alpha}_m) + \\ & \frac{1}{2}(\Theta_m - \Theta_{m0})^2 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} V_s = & \frac{1}{2}(s_s^T M_{xs}(q_s)s_s + \tilde{\alpha}_s^T P_s^{-1} \tilde{\alpha}_s) + \\ & \frac{1}{2}(\Theta_s - \Theta_{s0})^2 \end{aligned} \quad (31)$$

式(30)、(31)中:  $\tilde{\alpha}_m = \hat{\alpha}_m - \alpha_m, \tilde{\alpha}_s = \hat{\alpha}_s - \alpha_s$ , 分别表示主机械手和从机械手的不确定部分实际参数与估计参数的误差.  $P_m, P_s$  为正定矩阵, 故  $V_m, V_s$  为正. 很显然,  $V_1 > 0$ , 分别对  $V_m, V_s$  求关于时间的一阶导数, 分别代入主、从机械手控制律和自适应律, 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_m = & \frac{1}{2}s_m^T \dot{M}_{xm}(q_m)s_m + s_m^T M_{xm}(q_m)\dot{s}_m + \\ & \tilde{\alpha}_m^T P_m^{-1} \tilde{\alpha}_m + (\Theta_m - \Theta_{m0})\dot{\Theta}_m = \\ & \frac{1}{2}s_m^T \dot{M}_{xm}(q_m)s_m + s_m^T [-\lambda_m M_{xm}(q_m)s_m - \\ & C_{xm}(q_m, \dot{q}_m)s_m + M_{xm}(q_m)(\lambda_m s_m - \ddot{r}_m) - \\ & C_{xm}(q_m, \dot{q}_m)\dot{r}_m - g_{xm}(q_m) - F_{xm}(\dot{q}_m) + \tau_{xm} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \mathbf{d}_{\text{xm}} - \mathbf{F}_{\text{h}}] + \dot{\tilde{\mathbf{a}}}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{P}_{\text{m}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_{\text{m}} + (\Theta_{\text{m}} - \Theta_{\text{m}0}) \dot{\Theta}_{\text{m}} = \\
& \frac{1}{2} \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} [\dot{\mathbf{M}}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) - 2\mathbf{C}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{m}})] \mathbf{s}_{\text{m}} - \\
& \boldsymbol{\lambda}_{\text{m}} \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) \mathbf{s}_{\text{m}} + \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{J}_{\text{m}}^{-\text{T}} \mathbf{Y}_{\text{m}}(\hat{\mathbf{a}}_{\text{m}} - \boldsymbol{\alpha}_{\text{m}}) + \\
& \dot{\tilde{\mathbf{a}}}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{P}_{\text{m}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_{\text{m}} + \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \left( -\mathbf{K}_{\text{pm}} \mathbf{s}_{\text{m}} - \frac{\mathbf{s}_{\text{m}}}{\|\mathbf{s}_{\text{m}}\| + e^{-a_{\text{m}}t}} \Theta_{\text{m}} + \right. \\
& \left. \mathbf{d}_{\text{xm}} \right) + (\Theta_{\text{m}} - \Theta_{\text{m}0}) \frac{\|\mathbf{s}_{\text{m}}\|^2}{\|\mathbf{s}_{\text{m}}\| + e^{-a_{\text{m}}t}} = \\
& -\boldsymbol{\lambda}_{\text{m}} \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) \mathbf{s}_{\text{m}} - \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{pm}} \mathbf{s}_{\text{m}} + \\
& \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{d}_{\text{xm}} - \Theta_{\text{m}0} \frac{\|\mathbf{s}_{\text{m}}\|^2}{\|\mathbf{s}_{\text{m}}\| + e^{-a_{\text{m}}t}} \quad (32)
\end{aligned}$$

由于  $\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{d}_{\text{xm}} \leq \|\mathbf{s}_{\text{m}}\| \Theta_{\text{m}0}^{[22,23]}$ , 代入式(30)可得

$$\dot{V}_{\text{m}} \leq -\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{pm}} \mathbf{s}_{\text{m}} - \boldsymbol{\lambda}_{\text{m}} \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) \mathbf{s}_{\text{m}} + \Theta_{\text{m}0} e^{-a_{\text{m}}t} \quad (33)$$

$$\dot{V}_{\text{s}} = \frac{1}{2} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \dot{\mathbf{M}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \dot{\mathbf{s}}_{\text{s}} +$$

$$\begin{aligned}
& \dot{\tilde{\mathbf{a}}}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{P}_{\text{s}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_{\text{s}} + (\Theta_{\text{s}} - \Theta_{\text{s}0}) \dot{\Theta}_{\text{s}} = \\
& \frac{1}{2} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \dot{\mathbf{M}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} [-\boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} - \\
& \mathbf{C}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} + \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) (\boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} \mathbf{s}_{\text{s}} - \ddot{\mathbf{r}}_{\text{s}}) - \\
& \mathbf{C}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}}) \dot{\mathbf{r}}_{\text{s}} - \mathbf{g}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) - \mathbf{F}_{\text{xs}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{s}}) + \boldsymbol{\tau}_{\text{xs}} + \\
& \mathbf{d}_{\text{xs}} - \mathbf{F}_{\text{e}}] + \dot{\tilde{\mathbf{a}}}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{P}_{\text{s}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_{\text{s}} + (\Theta_{\text{s}} - \Theta_{\text{s}0}) \dot{\Theta}_{\text{s}} = \\
& \frac{1}{2} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} [\dot{\mathbf{M}}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) - 2\mathbf{C}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{s}})] \mathbf{s}_{\text{s}} - \\
& \boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{J}_{\text{s}}^{-\text{T}} \mathbf{Y}_{\text{s}}(\hat{\mathbf{a}}_{\text{s}} - \boldsymbol{\alpha}_{\text{s}}) + \dot{\tilde{\mathbf{a}}}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{P}_{\text{s}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_{\text{s}} + \\
& \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \left( -\mathbf{K}_{\text{ps}} \mathbf{s}_{\text{s}} - \frac{\mathbf{s}_{\text{s}}}{\|\mathbf{s}_{\text{s}}\| + e^{-a_{\text{s}}t}} \Theta_{\text{s}} + \mathbf{d}_{\text{xs}} \right) + \\
& (\Theta_{\text{s}} - \Theta_{\text{s}0}) \frac{\|\mathbf{s}_{\text{s}}\|^2}{\|\mathbf{s}_{\text{s}}\| + e^{-a_{\text{s}}t}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} (-k_{\text{es}} \text{sgn}(\mathbf{s}_{\text{s}}) + \\
& \mathbf{J}_{\text{s}}^{-\text{T}} \hat{\mathbf{M}}_{\text{s}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{J}_{\text{s}}^{-1} \Delta \ddot{\mathbf{x}}_{\text{m}}) = -\boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} - \\
& \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{ps}} \mathbf{s}_{\text{s}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{d}_{\text{xs}} - \Theta_{\text{s}0} \frac{\|\mathbf{s}_{\text{s}}\|^2}{\|\mathbf{s}_{\text{s}}\| + e^{-a_{\text{s}}t}} + \\
& \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} (-k_{\text{es}} \text{sgn}(\mathbf{s}_{\text{s}}) + \mathbf{J}_{\text{s}}^{-\text{T}} \hat{\mathbf{M}}_{\text{s}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{J}_{\text{s}}^{-1} \Delta \ddot{\mathbf{x}}_{\text{m}}) \quad (34)
\end{aligned}$$

当  $k_{\text{es}}$  满足  $k_{\text{es}} \geq \|\mathbf{J}_{\text{s}}^{-\text{T}} \hat{\mathbf{M}}_{\text{s}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{J}_{\text{s}}^{-1} \Delta \ddot{\mathbf{x}}_{\text{m}}\|_{\infty}$  时满足

$$\mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} (-k_{\text{es}} \text{sgn}(\mathbf{s}_{\text{s}}) + \mathbf{J}_{\text{s}}^{-\text{T}} \hat{\mathbf{M}}_{\text{s}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{J}_{\text{s}}^{-1} \Delta \ddot{\mathbf{x}}_{\text{m}}) \leq 0. \text{ 其中 } \|\cdot\|_{\infty} \text{ 表示无穷范数. 由于 } \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{d}_{\text{xs}} \leq \|\mathbf{s}_{\text{s}}\| \Theta_{\text{s}0}, \text{ 代入式 (32) 可得}$$

$$\dot{V}_{\text{s}} \leq -\mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{ps}} \mathbf{s}_{\text{s}} - \boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} + \Theta_{\text{s}0} e^{-a_{\text{s}}t} \quad (35)$$

由式(33)、(35)与(29)可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 & \leq -\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{pm}} \mathbf{s}_{\text{m}} - \boldsymbol{\lambda}_{\text{m}} \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) \mathbf{s}_{\text{m}} - \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{ps}} \mathbf{s}_{\text{s}} - \\
& \boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}} + \Theta_{\text{m}0} e^{-a_{\text{m}}t} + \Theta_{\text{s}0} e^{-a_{\text{s}}t} \quad (36)
\end{aligned}$$

对式(36)不等式两端积分可得

$$\begin{aligned}
V_1(t) - V_1(0) & \leq -\int_0^t [\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{pm}} \mathbf{s}_{\text{m}} + \boldsymbol{\lambda}_{\text{m}} \mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xm}}(\mathbf{q}_{\text{m}}) \mathbf{s}_{\text{m}} + \\
& \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{ps}} \mathbf{s}_{\text{s}} + \boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{M}_{\text{xs}}(\mathbf{q}_{\text{s}}) \mathbf{s}_{\text{s}}] dt +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \Theta_{\text{m}0} \int_0^t e^{-a_{\text{m}}t} dt + \Theta_{\text{s}0} \int_0^t e^{-a_{\text{s}}t} dt \leq \\
& -\int_0^t (\mathbf{s}_{\text{m}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{pm}} \mathbf{s}_{\text{m}} + \mathbf{s}_{\text{s}}^{\text{T}} \mathbf{K}_{\text{ps}} \mathbf{s}_{\text{s}}) dt + \\
& \Theta_{\text{m}0} \int_0^t e^{-a_{\text{m}}t} dt + \Theta_{\text{s}0} \int_0^t e^{-a_{\text{s}}t} dt \quad (37)
\end{aligned}$$

$V_1(t) \geq 0$  且  $\int_0^t e^{-a_{\text{m}}t} dt \leq \infty$  与  $\int_0^t e^{-a_{\text{s}}t} dt \leq \infty$ , 则:

$$\begin{aligned}
\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t (\mathbf{K}_{\text{pm}} \|\mathbf{s}_{\text{m}}\|^2 + \mathbf{K}_{\text{ps}} \|\mathbf{s}_{\text{s}}\|^2) dt & \leq \\
(V_1(0) + \Theta_{\text{m}0} \int_0^t e^{-a_{\text{m}}t} dt + \\
\Theta_{\text{s}0} \int_0^t e^{-a_{\text{s}}t} dt) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} & = 0 \quad (38)
\end{aligned}$$

因此, 当  $t \rightarrow \infty$  时, 有  $\mathbf{s}_{\text{m}} \rightarrow \mathbf{0}$  与  $\mathbf{s}_{\text{s}} \rightarrow \mathbf{0}$ ,  $\ddot{\mathbf{x}}_{\text{m}} \rightarrow \mathbf{0}$ ,

$\ddot{\mathbf{x}}_{\text{s}} \rightarrow \mathbf{0}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}_{\text{m}} \rightarrow \mathbf{0}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}_{\text{s}} \rightarrow \mathbf{0}$ , 保证了主从手位置跟踪渐进阻抗模型期望位置  $\mathbf{x}_{\text{m}} \rightarrow \mathbf{x}_{\text{imm}}$  与  $\mathbf{x}_{\text{s}} \rightarrow \mathbf{x}_{\text{ims}}$ . 从手控制器根据参数不确定性及外部干扰引起的跟踪误差通过自适应律得到补偿, 并且通过滑模鲁棒控制与自适应律使控制器具有鲁棒自适应特征.

## 5 仿真与验证

从机械手跟踪主机械手运动过程中, 分为自由空间运动以及与环境接触约束运动<sup>[24,25]</sup>. 建立从机械手抓取目标的受力模型, 只考虑运动位置对  $F_{\text{e}}$  的影响, 从机械手在与环境接触时, 环境受力看成无源的线性弹簧, 一维空间下, 接触力  $F_{\text{e}}$  可以表示为

$$F_{\text{e}} = \begin{cases} k_{\text{e}}(x_{\text{s}} - x_{\text{e}}), & x_{\text{s}} \geq x_{\text{e}} \\ 0, & x_{\text{s}} < x_{\text{e}} \end{cases} \quad (39)$$

式中:  $x_{\text{e}}$  为一维空间下, 从机械手与接触环境的位置;  $k_{\text{e}}$  为抓取目标的刚度系数.  $x_{\text{s}} < x_{\text{e}}$  时, 主从机械手处于自由运动状态;  $x_{\text{s}} \geq x_{\text{e}}$  时, 主从机械手与环境接触, 产生触觉力. 根据主从机械手的系统模型以及控制要求, 在 MATLAB/Simulink 做二自由度机械手数学实验仿真. 只考虑机械手动力学模型不确定及外部干扰问题, 不考虑从机械手载体对姿态影响, 设主从机械手在竖直平面运动. 二自由度遥操作系统结构如图 2 所示.

参考文献[26]与[27]的数学模型, 主机械手阻抗模型参数设计为:  $\mathbf{M}_{\text{md}} = \text{diag}(1, 1)$ ,  $\mathbf{B}_{\text{md}} = \text{diag}(10, 10)$ ,  $\boldsymbol{\lambda}_{\text{m}} = \text{diag}(30, 30)$ ,  $\mathbf{P}_{\text{m}} = \text{diag}(1, 1, 1)$ ; 主机械手质量  $m_1 = 0.1 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 0.1 \text{ kg}$ , 主机械手关节长度  $l_1 = 0.1 \text{ m}$ ,  $l_2 = 0.1 \text{ m}$ . 主机械手初始参数:  $q_{\text{m}1} = \pi/3 \text{ rad}$ ,  $q_{\text{m}2} = \pi/6 \text{ rad}$ ,  $\dot{q}_{\text{m}1} = 0 \text{ rad/s}$ ,  $\dot{q}_{\text{m}2} = 0 \text{ rad/s}$ .

从机械手阻抗模型参数设计为:  $\mathbf{M}_{\text{sd}} = \text{diag}(1, 1)$ ,  $\mathbf{B}_{\text{sd}} = \text{diag}(10, 10)$ ,  $\mathbf{K}_{\text{sd}} = \text{diag}(1, 1)$ ,  $\boldsymbol{\lambda}_{\text{s}} = \text{diag}$

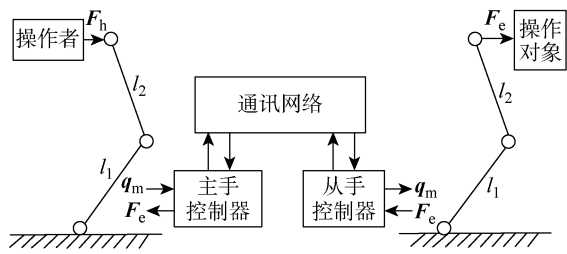


图 2 遥操作机械手结构示意图

Fig. 2 Structure of teleoperation manipulator

$(30, 30)$ ,  $\mathbf{P}_s = \text{diag}(1, 1, 1)$ ; 从机械手质量  $m_1 = 0.1$  kg,  $m_2 = 0.1$  kg,  $l_1 = 0.1$  m,  $l_2 = 0.1$  m. 从机械手初始参数:  $q_{s1} = \pi/3$  rad,  $q_{s2} = \pi/6$  rad,  $\dot{q}_{s1} = 0$  rad/s,  $\dot{q}_{s2} = 0$  rad/s.

主、从机械手关节摩擦转矩方程为:  $\mathbf{F}_m(\dot{\mathbf{q}}_m) = \mathbf{D}_m \dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{N}_m \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}_m)$ ,  $\mathbf{F}_s(\dot{\mathbf{q}}_s) = \mathbf{D}_s \dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{N}_s \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}_s)$ . 其中,  $\mathbf{D}_m = \mathbf{D}_s = \text{diag}(30, 30)$ ,  $\mathbf{N}_m = \mathbf{N}_s = \text{diag}(10, 10)$ . 主、从机械手外部不确定干扰转矩为:  $\mathbf{d}_m = [0.6(\text{rand} - 0.5) \quad 0.6(\text{rand} - 0.5)]^T$ ;  $\mathbf{d}_s = [2(\text{rand} - 0.5) \quad 2(\text{rand} - 0.5)]^T$ , rand 表示随机生成  $[0 \quad 1]$  区间内的随机数函数. 设不确定干扰自适应律参数为  $a_m = a_s = 2$ , 主、从手不确定干扰初始设定值为:  $\Theta_{m0} = \Theta_{s0} = 0.7$ , 从机械手消除估计误差  $k_{es} = 1.8$ ,  $K_{pm} = K_{ps} = 10$ .

设操作者只在操作空间  $x$  轴方向施加作用力,  $x$  轴方向刚度系数  $k_e = 100$  N/m,  $y$  轴方向不施加作用力. 从机械手在  $x$  轴方向  $x_e = 0.1$  m 处与抓取目标接触. 仿真时间设为 30 s, 前 10 s 在主机机械手上施加 10 N 的作用力, 然后将作用力设为 0 N. 即在机械手上施加 10 N 作用力持续 10 s, 然后不再施加力, 持续 20 s, 观察机械手的力-位移跟踪状态.

图 3~5 中  $f$  为作用力,  $q_{i1}, q_{i2}$  为  $\mathbf{q}_i$  的元素. 从手、主手操作空间位置实现对主从机械手设定阻抗模型期望位置跟踪, 同理实现从手对主手的关节位置跟踪, 在主手上操作者施加力与从手和环境之间交互力一致协调相等. 从手初始位置位于与抓取目标不接触的自由位置, 跟踪主机机械手位置运动到 0.1 m 时实现于抓取目标交互, 此时从手依然实现对主手的位置跟踪, 此时主手上开始感受到从手的反馈力以致到主手力信号与从手力信号误差渐进收敛于 0.

主手力跟踪、从手位置跟踪静态误差不大于 1%, 整体跟踪无超调量. 主手上力释放后, 从手、主手最终静止在与环境临界接触的 0.1 m 处位置, 从手依然能保证位置跟踪, 同时主手实现对从手的力

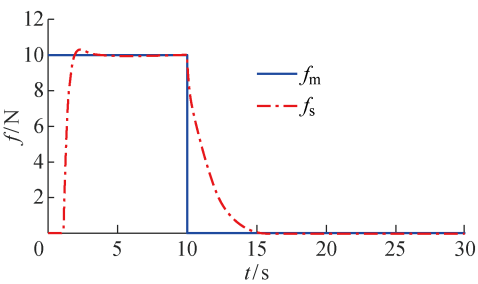


图 3 遥操作机械手力跟踪曲线图

Fig. 3 Force tracking of teleoperation system

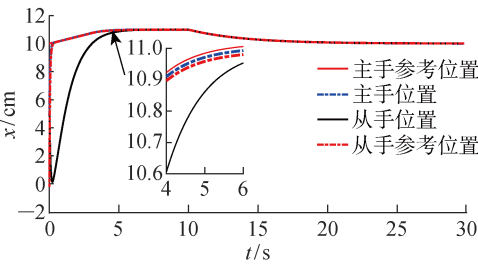


图 4 主从机械手参考位置与位置跟踪曲线图

Fig. 4 The curves of reference position and position of master and slave manipulator

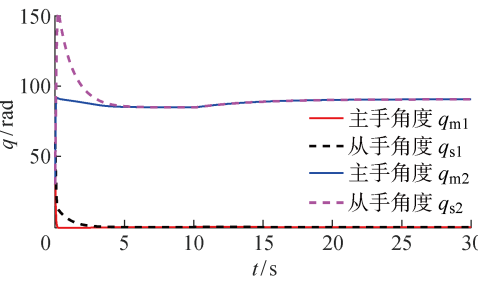


图 5 遥操作主从手关节角度跟踪曲线图

Fig. 5 Angle tracking of master and slave manipulator in teleoperation

跟踪. 图 6、7 分别为主手、从手自适应律曲线图,  $\hat{\alpha}_{m1}, \hat{\alpha}_{m2}, \hat{\alpha}_{m3}$  为  $\hat{\alpha}_m$  的元素,  $\hat{\alpha}_{s1}, \hat{\alpha}_{s2}, \hat{\alpha}_{s3}$  为  $\hat{\alpha}_s$  的元素. 可以看出, 主从机械手自适应律输出参数有界, 不确定参数估计不需要设定初始估计值, 保证了估计值有效性能, 实现系统控制稳定.

在系统模型不确定以及外部干扰条件下, 整体系统仍然保证从手对主手的力跟踪以及从手对主手的位置跟踪. 主手内部不确定自适应律以及外部干扰上界不确定自适应律对外部干扰以及自身模型不确定性的补偿, 满足了鲁棒稳定性特征.

为了验证所设计控制器的先进性与优越性, 所设计的控制器(新控制器)与文献[1]的模型参考自适应控制和文献[2]的 PD+like 控制器做了相应对比. 针对式(1)所示包含关节摩擦及外部干扰的机械

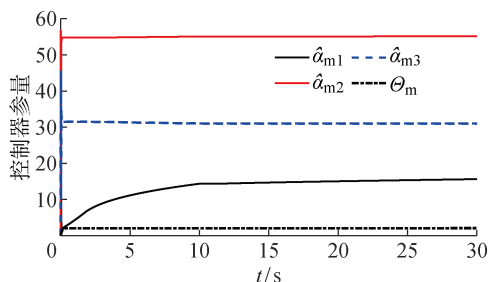


图6 主手自适应律曲线图

Fig. 6 Adaptive law of master manipulator

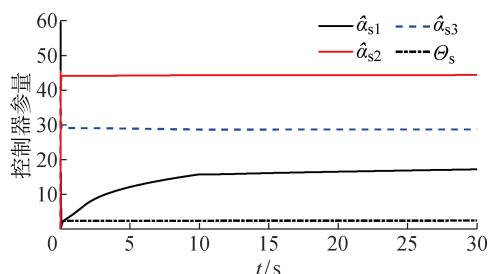


图7 从手自适应律曲线图

Fig. 7 Adaptive law of slave manipulator

手模型,在主手  $x$  方向加 10 N 的力信号,3 种控制器的力跟踪与位移跟踪曲线如图 8 和 9 所示。

由图 8 和 9 可知,所提出的控制方法跟踪过程

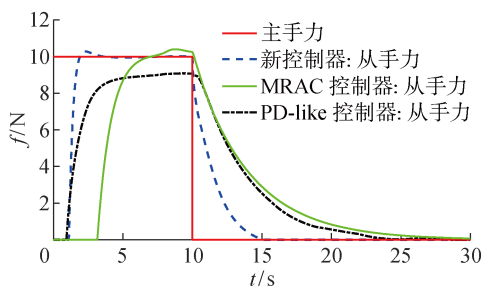


图8 不同控制器条件下主、从手力跟踪曲线图

Fig. 8 Force tracking with different controller of master and slave manipulators

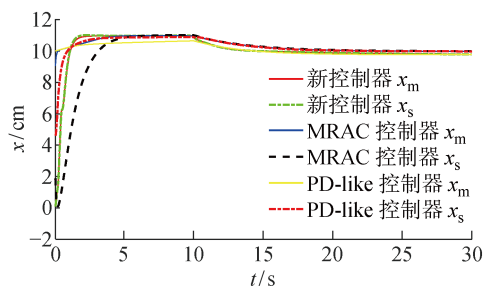


图9 不同控制器条件下主、从手位置曲线图

Fig. 9 Position tracking with different controller of master and slave manipulators

具有快速性及无静态误差的特点,避免了由于外部干扰引起的震荡特点。

## 6 结语

提出了基于阻抗参考模型的自适应控制方法实现主手、从手力位移信号的同步.通过建立线性二阶微分方程的参考阻抗模型,将主从手参考阻抗模型的动态响应期望位置作为主从机械手末端的操作空间下的位置跟踪目标.对机械手动态参数不确定在线学习估计,对外界干扰作不确定上界估计,并且设计了滑模控制项消除内部干扰与外部不确定干扰,保证了主从机械手闭环动态方程与参考阻抗模型动态方程相一致,实现了主从机械手末端对参考阻抗模型输出的期望位置误差渐进收敛于 0.利用李雅普诺夫函数证明了系统的稳定性及透明性,在 MATLAB/Simulink 上进行仿真实验验证了控制系统的鲁棒性及自适应能力。

## 参考文献:

- [1] CHEN Z, PAN Y J, GU J. Integrated adaptive robust control for multilateral teleoperation systems under arbitrary time delays[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(12): 2708-2728.
- [2] ZHAI D H, XIA Y. Adaptive fuzzy control of multilateral asymmetric teleoperation for coordinated multiple mobile manipulators[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2016, 24(1): 57-70.
- [3] ZHAI D H, XIA Y. Adaptive control for teleoperation system with varying time delays and input saturation constraints[J]. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2016, 63(11): 6921-6929.
- [4] WANG H, XIE Y. Adaptive inverse dynamics control of robots with uncertain kinematics and dynamics[J]. *Automatica*, 2009, 45(9): 2114-2119.
- [5] IMAIDA T, SENDA K. Performance improvement of the PD-based bilateral teleoperators with time delay by introducing relative D-control[J]. *Advanced Robotics*, 2015, 29(6): 385-400.
- [6] ZHAI D H, XIA Y. Adaptive finite-time control for nonlinear teleoperation systems with asymmetric time-varying delays[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(12): 2586-2607.
- [7] CHO H C, PARK J H, KIM K, *et al.* Sliding-mode-based impedance controller for bilateral teleoperation under varying time-delay[C]// *Proceedings of the 2001*



- IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul Kores; IEEE, 2001: 1025-1030.
- [8] SARRAS I, NUÑO E, BASAÑEZ L. An adaptive controller for nonlinear teleoperators with variable time-delays[J]. **Journal of the Franklin Institute**, 2014, 351(10): 4817-4837.
- [9] CHOPRA N, SPONG M W, LOZANO R. Synchronization of bilateral teleoperators with time delay[J]. **Automatica**, 2008, 44(8): 2142-2148.
- [10] LIU Y C, KHONG M H. Adaptive control for nonlinear teleoperators with uncertain kinematics and dynamics[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2015, 20(5): 2550-2562.
- [11] 周杰, 荣伟彬, 许金鹏, 等. 基于 SEM 的微纳遥操作系统控制策略研究[J]. **仪器仪表学报**, 2014, 35(11): 2448-2457.
- ZHOU Jie, RONG Weibin, XU Jinpeng, *et al.* Research on the control strategy of SEM based micro/nano tele-operation system[J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2014, 35(11): 2448-2457.
- [12] CHO H C, PARK J H. Stable bilateral teleoperation under a time delay using a robust impedance control[J]. **Mechatronics**, 2005, 15(5): 611-625.
- [13] 郭语, 孙志峻. 基于扰动观测器的时延双边遥操作系统鲁棒阻抗控制[J]. **机械工程学报**, 2012, 48(21): 15-21.
- GUO Yu, SUN Zhijun. Research on the control strategy of SEM based micro/nano tele-operation system[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2012, 48(21): 15-21.
- [14] SHARIFI M, BEHZADIPOUR S, SALARIEH H, *et al.* Cooperative modalities in robotic tele-rehabilitation using nonlinear bilateral impedance control[J]. **Control Engineering Practice**, 2017, 67: 52-63.
- [15] SHARIFI M, SALARIEH H, BEHZADIPOUR S, *et al.* Tele-echography of moving organs using an impedance-controlled telerobotic system[J]. **Mechatronics**, 2017, 45: 60-70.
- [16] YANG Y, HUA C, LI J, *et al.* Finite-time output-feedback synchronization control for bilateral teleoperation system via neural networks[J]. **Information Sciences**, 2017, 406/407: 216-233.
- [17] ZOU M, PAN Y J, FORBRIGGER S, *et al.* Adaptive robust control for bilateral teleoperated robotic manipulators with arbitrary time delays[C]// **International Conference on Robotics and Artificial Intelligence**. Rawalpindi Pakistan; IEEE, 2016: 105-111.
- [18] MENDOZA M, BONILLA I, GONZÁLEZ-GALVÁN E, *et al.* Impedance control in a wave-based teleoperator for rehabilitation motor therapies assisted by robots[J]. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, 2016, 123: 54-67.
- [19] KIM B Y, AHN H S. A design of bilateral teleoperation systems using composite adaptive controller[J]. **Control Engineering Practice**, 2013, 21(12): 1641-1652.
- [20] HOSSEINI-SUNY K, MOMENI H, JANABI-SHARIFI F. A modified adaptive controller design for teleoperation systems[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2010, 58(5): 676-683.
- [21] ARACIL R, AZORIN J M, FERRE M, *et al.* Bilateral control by state convergence based on transparency for systems with time delay[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2013, 61(2): 86-94.
- [22] SLOTINE J J E, LI W. Applied nonlinear control[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 1991.
- [23] HUA C C, YANG Y, GUAN X. Neural network-based adaptive position tracking control for bilateral teleoperation under constant time delay[J]. **Neuro Computing**, 2013, 113(7): 204-212.
- [24] LI Z, XIA Y, WANG D, *et al.* Neural network-based control of networked trilateral teleoperation with geometrically unknown constraints[J]. **IEEE Transactions on Cybernetics**, 2016, 46(5): 1051-1064.
- [25] LIU W, ZHANG J, GAO L. Fuzzy impedance and sliding mode bilateral control in underwater ratio teleoperation based on observer[C]// **OCEANS 2016-Shanghai**, Shanghai; IEEE, 2016: 1-7.
- [26] PAN Y, YU H, ER M J. Adaptive neural PD control with semiglobal asymptotic stabilization guarantee[J]. **IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems**, 2014, 25(12): 2264-2274.
- [27] LONDHE P S, MOHAN S, PATRE B M, *et al.* Robust task-space control of an autonomous underwater vehicle-manipulator system by PID-like fuzzy control scheme with disturbance estimator[J]. **Ocean Engineering**, 2017, 139: 1-13.

(本文编辑:陈晓燕)