水下机械手主从遥操作双边控制策略

刘卫东[1,2], 张建军[1], 高立娥[1,2], 程瑞锋[1]

(1.西北工业大学 航海学院,陕西 西安 710072;2.西北工业大学 水下信息与控制重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要:水下机械手在操作过程中存在抓取对象未知、临场性差的问题,深水环境下较低的能见度限制了机械手的作业。针对此问题提出了带力觉感知的主从式遥操作双边控制系统。主手采用模糊自适应阻抗控制方法,从手采用积分滑模变结构控制方法。通过 Liewellyn 绝对稳定性准则分析了整体系统的稳定性。搭建了单自由度双边遥操作系统平台,在 Matlab Simulink 下进行了相关仿真。仿真表明:主手控制提高了透明性以及系统鲁棒性;从手控制克服了外界干扰及消除了滑模控制的抖振问题,从手具有很好的力/位移跟踪主手的能力;整体系统具有很好的稳定性和可行性。

关 键 词:遥操作控制;滑模控制;模糊规则;数学模型;MATLAB;位置跟踪;稳定性
中图分类号:TP242 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2016)01-0053-07

水下机械手是与水下环境交互的重要设备。由于水下的复杂环境,存在着抓取对象未知、临场性差、可操作性不强的问题。水下较低的能见度限制了机械手的作业,离开摄像机造成机械手无局部搜索的能力。因此具有力觉感知的主从遥操作系统是一个研究方向。主从遥操作系统通过操作主手使从手跟踪主手的位置信息,而在主手上可以感受到从手抓取物体的受力信息,使操作者有种身临其境的感觉。该系统克服了距离限制或者避开了操作者直接与环境接触的危险性。已经在遥操作手术[1]、太空探索[2]、虚拟装配[3]等领域进行了相关研究。然而,遥操作系统依然存在很多问题。由于抓取对象的刚度未知引起主手上感觉不强,目标未知、外界干扰给系统控制带来困难,以及由于距离原因使主、从手间数据通信带来的时延问题。

针对遥操作系统存在的控制问题,很多学者已经提出了多种控制方法。主要包括鲁棒 H_∞ 控制方法[4]、自适应 PD 控制方法[5]、基于波变量的双边控制方法[6-7]、无源控制理论[8]以及模型预测控制方法[9]等。这些控制方法能够保证整体系统的稳定性和精确性要求,但是整体系统多以精确的数学模型为基础,精确的数学模型由于关节摩擦、重力影响而无法获取;鲁棒 H_∞ 控制虽然允许模型摄动,但复杂的数学计算对系统稳定性带来影响。文献[10]提出了主手阻抗控制、从手变结构控制方法,但是对主从手参数不确定性,系统摩擦等对系统临场感带来的影响问题无法解决。文献[11]在主手阻抗控制,从手变结构控制的基础上加入了扰动观测器,保证了在外界干扰下系统的鲁棒性并有效提高操作性能,但是对抓取对象的刚度变化无法实现柔顺控制,固定的阻抗参数不能兼顾稳定性和动态响应问题,造成操作者临场性不强的问题。本文针对水下机械手应用的双边遥操作系统存在的问题,提出了一种模糊阻抗控制与滑模变结构双边控制方法。为了提高主手鲁棒性以及力位移之间的柔顺性能,主手端采用模糊自适应阻抗控制策略,从手端采用积分滑模控制策略,为了消除在运动过程中水的阻力问题,将其等同于外界干扰,设计了积分型准滑模控制予以消除。利用 Liewellyn 绝对稳定性准则分析了整个系统的稳定性条件。为了验证控制方法的有效性,搭建了单自由度条件下的双边力反馈遥操作系统平台。该控制方法通过模糊控制策略实时的调整阻抗参数,不但能使系统稳定,而且具有自适应能力,具有良好的动态品质。

收稿日期:2015-09-29 **基金项目**:国家自然科学基金(61473224)资助
作者简介:刘卫东(1962—),西北工业大学教授、博士生导师,主要从事水下航行器控制与仿真的研究。

1 系统结构与数学模型

1.1 系统结构

系统结构如图 1 所示,具有临场交互的力感知水下机械手遥操作系统由 2 个完全相同的机械手通过光纤连接实现 Internet 通讯。主机械手位于操作舱内,由操作员直接控制,从机械手位于作业区域,一般安装在水下航行器上,直接操作作业对象。操作者操作主手得到位置信号,将该位置信号通过通信环节传递给从手,作为从手跟踪目标;主手接收从手反馈回来的力信号,通过主手控制器调节主手位置,操作者通过感受到的主手力信号确定施加给主手的力,由主手上力的平衡原理感受从手端与环境的接触力。

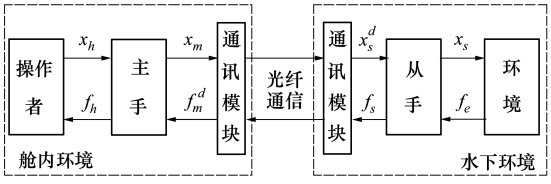


图 1 双边遥操作控制系统结构图

1.2 系统数学模型

主从式机械手的数学模型如下式所示:

$$m_m\ddot{x}_m + b_m\dot{x}_m = \tau_m - f_m \tag{1}$$

$$m_s\ddot{x}_s + b_s\dot{x}_s = \tau_s - f_s \tag{2}$$

式中:m_m、m_s 为主机械手和从机械手的质量,b_m、b_s 为速度阻尼系数,τ_m、τ_s 为对主机械手、从机械手的控制量,f_m、f_s 分别为人对主机械手,环境对从机械手的作用力,x_m、x_s 为主机械手、从机械手的位移量。

从机械手的位置设定值为 x_s^d,为主机械手的位置信号 x_m。主机械手上力觉设定值为 f_m^d,为从机械手上与环境接触受力 f_s。可以用以下方程表示:

$$x_s^d = x_m \tag{3}$$

$$f_m^d = f_s \tag{4}$$

从机械手运动过程分为自由空间的运动以及与环境接触后的受力运动。从机械手在水下作业任务时,末端运动速度较小,忽略环境阻尼项与惯性项对作用力 f_s 的影响,只考虑运动位置对 f_s 的影响,这时从机械手系统可以看成线性弹簧,与环境的接触力 f_s 可以表示为

$$f_s = \begin{cases} k_e(x_s - x_e) & x_s \geqslant x_e \\ 0 & x_s < x_e \end{cases} \tag{5}$$

式中,x_e 表示从机械手与接触环境的位置,k_e 表示抓取目标的刚度系数。当 $x_s < x_e$ 时,主手、从手的运动处于自由空间状态;当 $x_s \geqslant x_e$ 时可以看成从机械手与环境接触,这时环境受力模型可以简略为一个弹簧模型。

2 控制率设计

2.1 主机械手阻抗控制设计

主机械手阻抗控制是根据自身所受力 f_m 与从手与环境接触力 f_s 的误差来调节自身的位置 x_m,来实现主手力 f_m 与从手与环境接触力 f_s 的一致相等,其属于力-位移混合控制范畴。将从手抓取环境等效为阻抗模型,主手力位移混合控制等效为惯性-阻尼-刚度模型,按照主手与从手力误差调节器自身参数完成抓取力与位移的动态关系。

主机械手期望的阻抗模型为

$$\bar{m}_m\ddot{x}_m + \bar{b}_m\dot{x}_m + \bar{k}_m x_m = f_m - f_s \tag{6}$$

$\bar{m}_m$、$\bar{b}_m$、$\bar{k}_m$ 分别表示机械手期望的惯性、阻尼、刚度。$\bar{m}_m$ 表示理想惯性,在有大的加速度的高速运动或会产生冲力的运动时影响较大;$\bar{b}_m$ 表示理想阻尼,在中速运动或者存在较强干扰时影响较大;$\bar{k}_m$ 表示理想刚度,在平衡状态附近的低速运动时影响较大。

由于传感器测量 $\ddot{x}_m$ 带有一定的误差,即测量加速度时产生一定的噪声,不易用加速度信号作为反馈的控制量。这里消去 $\ddot{x}_m$ 项,由(6) 式与(1)式联立得到主机械手阻抗控制率为

$$\tau_m = \left(b_m - \frac{m_m}{\bar{m}_m}\bar{b}_m\right)\dot{x}_m + \left(\frac{m_m}{\bar{m}_m} - 1\right)f_m + \frac{m_m}{\bar{m}_m}(\bar{k}_m x_m - f_s) \tag{7}$$

主手端由于系统参数的不确定性,未知摩擦以及干扰的影响,力传感器测量的误差存在,主手端动力学模型并不精确获知,造成主手端阻抗控制有一定的误差。主手固定的阻抗参数在抓取目标大范围刚度变化下从手跟踪时会出现较大的位置静态误差。为了改善从手由自由状态到接触环境状态对主手造成的影响,控制系统的精确性,能使主手感受到

从手对接触环境的软硬程度,对主手的阻抗参数做模糊化自适应调整。

设:

$$\begin{cases}\Delta f_s = f_s(k) - f_s(k-1) \\ \Delta x_s = x_s(k) - x_s(k-1)\quad k \geqslant 1\end{cases} \tag{8}$$

即通过本次采样的 $f_s(k)$、$x_s(k)$ 与对应上次采样 $f_s(k-1)$、$x_s(k-1)$ 作差获取 Δf_s、Δx_s 作为评判抓取目标刚度指标。从手抓取刚度系数较小的目标时,如软体动物,这时主手期望阻抗参数 k_m、b_m 应选择较小,这样在从手产生较小的接触力时,在主手上可以产生较大的位移 x_m,主手上感觉到从手抓取的物体质软;相反,如果从手抓取石块等刚度较大的样本时,就要选择很大的期望阻抗参数 k_m、b_m,使主手在相同力作用下产生的位移 x_m 较小,感受到从手物体刚度较大。即通过从手抓取目标的刚度来调节主手的阻抗参数。则系统整体控制原理图如图 2 所示。

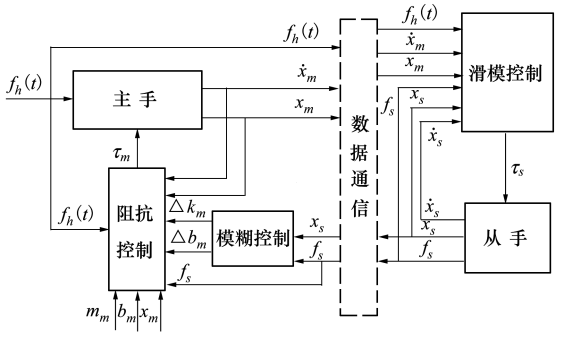


图 2　系统整体控制原理图

设 Δf_s、Δx_s 为模糊控制器的输入,Δb_m、Δk_m 模糊控制器的输出。设模糊控制器的设计规则如下:

1) 当 Δf_s 为零时,无论 Δx_s 如何,说明从机械手没有和外界接触,应取 Δk_m 和 Δb_m 为零,对 $\bar{k}_m$ 和 $\bar{b}_m$ 不做调节。

2) 当 Δf_s 比较大,Δx_s 较小时,说明从机械手接触物体的刚度系数较大,为了在 f_m 下感受到从手接触的物体较硬,应取较大的 Δk_m 和较大的 Δb_m,产生较小的位移 x_m。

3) 当 Δf_s 比较小,Δx_s 较大时,说明从机械手接触物体的刚度系数较小,为了在 f_m 下感受到从手接触的物体较软,应取较小的 Δk_m 和较小的 Δb_m,产生较大的位移 x_m。

根据以上模糊规则,将所有的输入输出变量归一化后划分为 7 个模糊子集,分别用字母 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 表示,每个模糊集的隶属度函数均为高斯型函数。模糊规则表此处省略。

模糊推理采用传统的 Mamdani 算法,模糊推理规则采用 max-min 符合运算。模糊推理结果的非模糊化采用重心法。阻抗控制最终期望参数如(9)式所示。

$$\begin{cases}\bar{b}_m(k) = \bar{b}_m(k-1) + \Delta b_m \\ \bar{k}_m(k) = \bar{k}_m(k-1) + \Delta k_m \quad k \geqslant 1\end{cases} \tag{9}$$

即当前 $\bar{b}_m$、$\bar{k}_m$ 值是由上一次的 $\bar{b}_m$、$\bar{k}_m$ 值加上模糊推理得到的 Δb_m、Δk_m 值得到。通过主手上加入模糊控制来自适应调节主手阻抗控制参数,使得主手上施加相同力时主手上位置改变量不同,主手上可以感受从手接触的物体的软硬程度,并提高了柔顺性以及自适应控制的能力。

2.2　从机械手控制率的设计

对于从机械手控制系统,从机械手对主机械手的跟踪有自由空间的运动位置跟踪和从机械手对环境触碰后的位置跟踪。从机械手期望的阻抗模型可以表述为:

$$\bar{m}_s\ddot{\tilde{x}}_s(t) + \bar{b}_s\dot{\tilde{x}}_s(t) + \bar{k}_s\tilde{x}_s(t) = -f_s(t) \tag{10}$$

式中,$\bar{m}_s$、$\bar{b}_s$、$\bar{m}_s$ 分别为从手的期望惯性、阻尼系数和刚度;$\tilde{x}_s(t) = x_s(t) - x_s^d(t)$ 为位置跟踪误差。由(10)式得 $\tilde{x}_s(t)$,由(6)式得 $\ddot{x}_m$,将 $\tilde{x}_s(t)$,$\ddot{x}_m$ 代入(2)式,可得:

$$\tau_{s1} = \left(1 - \frac{m_s}{\bar{m}_m} - \frac{m_s}{\bar{m}_s}\right)f_s + \frac{m_s}{\bar{m}_m}f_m + \left(b_s - \frac{m_s\bar{b}_s}{\bar{m}_m}\right)\dot{x}_s - \frac{m_s\bar{k}_s}{\bar{m}_m}x_s + \left(\frac{m_s\bar{b}_s}{\bar{m}_s} - \frac{m_s\bar{b}_m}{\bar{m}_m}\right)\dot{x}_m + \left(\frac{m_s\bar{k}_s}{\bar{m}_s} - \frac{m_s\bar{k}_m}{\bar{m}_m}\right)x_m \tag{11}$$

在从手上依靠设计滑模控制器使期望的阻抗模型能够沿滑模面形成常规滑动模态。利用滑模变结构控制器的鲁棒特性对从机械手在水中运动受到水的阻力带来的扰动,以及参数的不确定性和模型的动态不确定性带来的控制误差做抗干扰能力。为了实现(10)式表示的期望阻抗关系,通过改进滑模控制器,建立从手的积分滑模阻抗控制器,以消除抖振。定义从手系统误差为:

$$e_f = \bar{m}_s\ddot{\tilde{x}}_s(t) + \bar{b}_s\dot{\tilde{x}}_s(t) + k_s\tilde{x}_s(t) + f_e(t) \tag{12}$$

和主手阻抗控制不同,当 $e_f = 0$ 时,系统能够保证期望的阻抗参数模型成立。由(12)式与(2)式可得:

$$\tau_{seq} = f_s + b_s\dot{x}_s + m_s\ddot{x}_m + m_s\tilde{x}_s = f_s + b_s\dot{x}_s + m_s\ddot{x}_m - \frac{m_s}{\bar{m}_s}(\bar{b}_s\tilde{x}_s + \bar{k}_s\tilde{x}_s + f_s) \tag{13}$$

由于 $e_f = 0$ 含有从手运动信息的加速度项即 $\ddot{x}_s(t)$,无法直接得到切换函数。定义 e_f 的积分形式作为切换函数,可得如下形式滑模运动方程:

$$s(t) = \frac{1}{\bar{m}_s}\int_0^t e_f(\tau)\mathrm{d}\tau = \tilde{x}_s(t) + \frac{\bar{b}_s}{\bar{m}_s}\tilde{x}_s(t) + \frac{1}{\bar{m}_s}\int_0^t(\bar{k}_s\tilde{x}_s(\tau) + f_e(\tau))\mathrm{d}\tau \tag{14}$$

若(14)式成立,且系统到达滑模面,则有:

$$e_f = \bar{m}_s\dot{s}(t) = 0 \tag{15}$$

设计指数型滑模趋近律,令:

$$\dot{s}(t) = -\varepsilon\mathrm{sat}\left(\frac{s(t)}{\Delta}\right) - ks(t)\ \ \varepsilon、k > 0 \tag{16}$$

Δ 表示消除抖振的阈值,ε 表示非线性增益,k 表示指数型趋近律,sat(·) 表示饱和函数。引入饱和函数可以有效降低滑模运动时的抖振,而 Δ 阈值的引入设置了一个厚度为 Δ 的边界,在 $|s(t)| \leqslant \Delta$ 时为线性滑模运动。因此,阻抗控制器的设计就转化为设计一个滑模控制器以保证包含期望的阻抗模型状态轨迹始终处于滑模面上。当 $\dot{s}(t) = 0$ 时,联合(2)式、(16)式可得等效控制输入。由(14)式、(7)式、(2)式得从机械手滑模控制率为

$$\tau_s = \left(1 - \frac{m_s}{\bar{m}_m}\right)f_s + \frac{m_s}{m_m}f_m + \frac{m_s}{m_m}\tau_m + \left(b_s - \frac{m_s\bar{b}_s}{\bar{m}_s}\right)\dot{x}_s - \frac{m_s\bar{k}_s}{\bar{m}_s}x_s - \left(\frac{m_s\bar{b}_s}{\bar{m}_s} + \frac{m_s\bar{b}_m}{\bar{m}_m}\right)\dot{x}_m + \frac{m_s\bar{k}_s}{\bar{m}_s}x_m - \frac{m_s\varepsilon}{\bar{m}_s}\mathrm{sat}\left(\frac{s(t)}{\Delta}\right) - \frac{m_sks(t)}{\bar{m}_s} \tag{17}$$

为了满足模态滑动条件,由(18)式可以看出,当 $k, \varepsilon > 0、\Delta > 1$ 时,满足 $s(t)\dot{s}(t) < 0$ 的条件,所以从手满足控制稳定条件。

$$s(t)\dot{s}(t) = s(t)\left(-\varepsilon\mathrm{sat}\left(\frac{s(t)}{\Delta}\right) - ks(t)\right) \leqslant -\varepsilon - k|s(t)|^2 < 0 \tag{18}$$

3 稳定性分析

遥操作系统包含主手、从手以及通讯环节,假设主手控制器、环境是无源的,则遥操作系统可以看作以主手操作、环境作用组成的二端口网络系统。二端口网络的绝对稳定性准则以输入、输出特性为基础,可以用来分析遥操作系统的稳定性问题。则主从式遥操作系统表示为二端口网络模型如图 3 所示。主手端端口代表了操作者-主机械手接口,从手端端口代表环境-从手端接口。

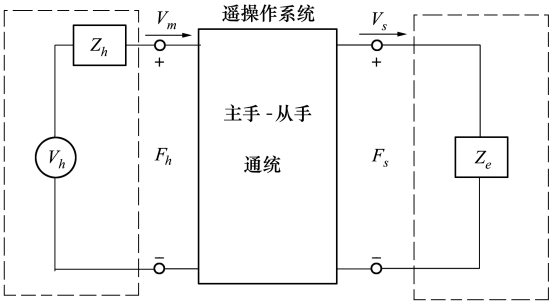


图 3 遥操作系统二端口网络模型

二端口网络以 H 参数组成的混合矩阵为基础,由(6)式、(10)式可得 $f_m(t)$、$f_s(t)$ 与 $x_m(t)$、$x_s(t)$ 之间的阻抗关系,将其换算为(19)式所示的混合矩阵,表示该网络输入输出之间的对应关系。

$$\begin{pmatrix} F_h(s) \\ -V_s(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_m(s) \\ -F_s(s) \end{pmatrix} \tag{19}$$

式中,$F_h(s)$、$V_m(s)$、$F_s(s)$、$V_s(s)$ 分别为 $f_m(t)$、$x_m(t)$、$f_s(t)$、$x_s(t)$ 的拉氏变换,在混合矩阵中各参数的定义如(20)式所示。

$$h_{11} = \left.\frac{F_h(s)}{V_m(s)}\right|_{F_e=0} \quad h_{12} = \left.\frac{F_h(s)}{F_e(s)}\right|_{V_m=0}$$
$$h_{21} = \left.\frac{-V_s(s)}{V_m(s)}\right|_{F_e=0} \quad h_{22} = \left.\frac{-V_s(s)}{F_e(s)}\right|_{V_m=0} \tag{20}$$

莱威林(Liewellyn)稳定判据提供了绝对稳定准则的充要条件[12]。一个二端口网络是绝对稳定的,当且仅当满足以下条件:

1) h_{11}、h_{22} 在右半平面内无极点。

2) h_{11}、h_{22} 若在虚轴上存在极点,则在这些极点处算得的留数矩阵为非负定的。

3) 对于所有的 $s = j\omega$,有(21)式成立。

$$\begin{cases} \mathrm{Re}[h_{11}] \geqslant 0 \\ \mathrm{Re}[h_{22}] \geqslant 0 \\ 2\mathrm{Re}[h_{11}]\mathrm{Re}[h_{22}] - \mathrm{Re}[h_{12}h_{21}] - |h_{12}h_{21}| \geqslant 0 \end{cases} \tag{21}$$

若混合矩阵的参数满足以上 3 个条件,则遥操作系统是绝对稳定的。从(15)~(17)式可知,通过

设计合理的滑模控制器,可以使(18)式成立,从而使从手实现期望的阻抗控制。由(6)式、(10)式可得混合矩阵表达式为:

$$\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{m}_m s + \bar{b}_m + \dfrac{\bar{k}_m}{s} & 1 \\ 1 & \dfrac{s}{\bar{m}_s s^2 + \bar{b}_s + \bar{k}_s} \end{pmatrix} \tag{22}$$

一般期望阻抗参数为正定的,因此混合矩阵(22)式满足绝对稳定准则的(1)式、(2)式以及(3)式的前 2 项,由(23)式可知,遥操作系统完全满足绝对稳定准则,所以系统是绝对稳定的。

$$\frac{2\bar{b}_m \bar{b}_s \omega^2}{(\bar{k}_s - \bar{m}_s \omega^2)^2 + (\bar{b}_s \omega)^2} \geqslant 0 \tag{23}$$

4　仿真实验验证

根据主、从机械手的系统模型以及控制要求,在 Matlab Simulink 下做实验仿真。根据控制要求建立阻抗控制,滑模变结构控制模型,根据 $f_s(t)$、$x_s(t)$ 值与模糊控制规则表建立模糊控制结构。其中,主手和从手设计了单自由度的控制器,主手、从手选择相同的结构模型,主手、从手位置选择 1∶1 的对应关系,主手力 f_m 与从手受力 f_s 选择 1∶1 的对应关系,位置、力跟踪关系均无比率调节。系统网络通信由于距离短忽略遥操作过程中的时延问题。

主手参数:m_m = 10 kg,b_m = 420 N·s/m,从手参数选择和主手一样的参数模型,即:m_s = 10 kg,b_s = 420 N·s/m。

选择期望的阻抗参数,这里主手初始设置期望的阻抗参数为:$\bar{m}_m$ = 5 kg,$\bar{b}_m$ = 300 N·s/m,$\bar{k}_m$ = 0.5 N/m;从手初始设置期望的阻抗参数为:$\bar{m}_s$ = 5 kg,$\bar{b}_s$ = 210 N·s/m,$\bar{k}_s$ = 500 N·m。

滑模变结构控制参数为:Δ = 40,ε = 20,k = 1。

选择仿真步长为 0.000 1 s,选择主手力 f_m = 20 N。从手与抓取物体距离 x_e = 0.5 cm。

具体操作过程是:在主手端施加 20 N 的力 1 s 后释放,再经过 1 s 时间,记录主手、从手上位置变化、以及作用力的变化。为了验证模糊阻抗控制的效果,选择不同抓取对象的刚度参数。即:k_e = 10 N/m 与 k_e = 30 N/m 2 种抓取目标来实验。当从手抓取对象刚度系数为 k_e = 10 N/m 时,从手对主手的力跟踪曲线、位置跟踪曲线分别如图 4、图 5 所示。当抓取对象刚度系数为 k_e = 30 N/m 时,从手对主手的力跟踪曲线、位置跟踪曲线分别如图 6、图 7 所示。

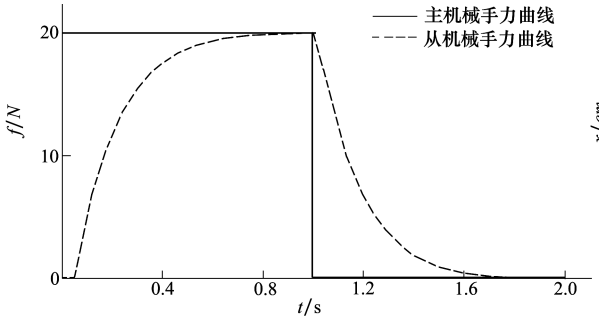


图 4　主、从机械手力曲线图(k_e = 10 N/m)

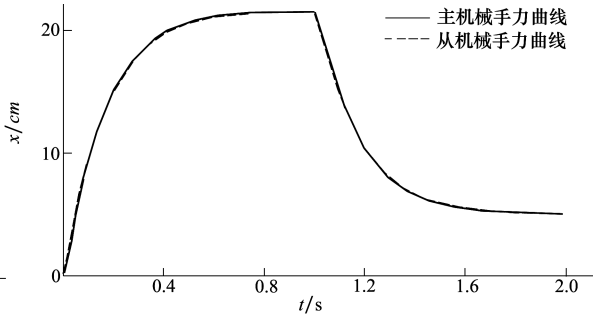


图 5　主、从机械手位置曲线图(k_e = 10 N/m)

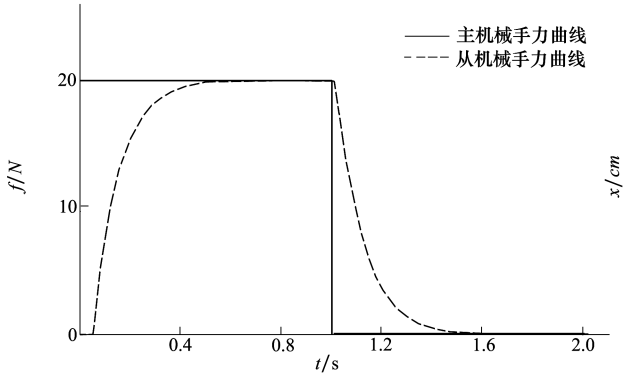


图 6　主、从机械手力曲线图(k_e = 30 N/m)

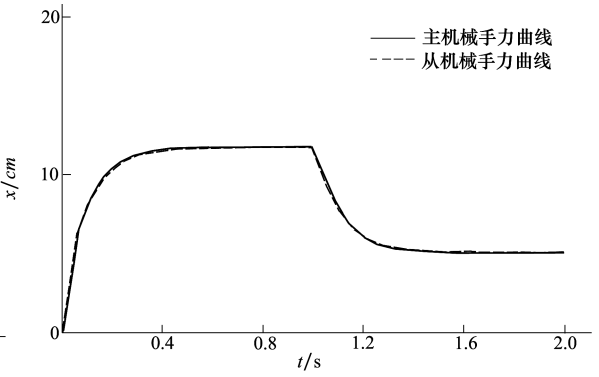


图 7　主、从机械手位置曲线图(k_e = 30 N/m)

由图 4、5 可知,在自由运动时,从手可保证对主手的位置跟踪。在从手运动 0.5 cm 时,约 0.05 s 时与抓取对象接触,抓取对象刚度参数 k_e = 10 N/m,从手上产生力的信号。然而从手依然继续保持对主手的位置跟踪,以致实现从手受力与主手受力的一致性。实现主手对从手受力与位置的信息一致。所以能够很好地保证主手感受环境的刚度。由图 4 可知,从手力对主手力的跟踪静态误差≤1%,无超调量。由图 5 可知,从手位置对主手位置的跟踪静态误差≤1%,无超调量。主手上力释放后,从手、主手最终静止在与环接临界触的 0.5 cm 处。

由图 6、7 可知,在抓取对象刚度系数 k_e = 30 N/m 时,从手依然能保证对主手力/位置跟踪。但是在 k_e = 30 N/m 条件下,从手的运动位置变化明显减小。主手上根据从手的力、位置改变量调整了自身的阻抗参数,完成了力/位置的跟踪。从手力对主手力的跟踪静态误差≤1%,无超调量。从手位置对主手位置的跟踪静态误差≤1%,无超调量。

由图 4 至图 7 仿真曲线可知,主手阻抗控制和从手滑模控制可以很好的完成从手对主手的力/位置的跟踪。但是固定的阻抗参数在变化的环境刚度条件下会使位置跟踪出现较大的静态误差,造成主手上的透明性差。模糊自适应阻抗的引入可以很好地保证在变换环境刚度条件下主手对从手抓取物体的感觉,增加了临场感。整体控制力/位置跟踪误差≤1%,无超调量,但是环境刚度系数小时会增加上升时间。滑模控制设计成指数型趋近律能保证在很短的时间内到达滑模面,准滑模控制提高了从手上的抗干扰能力。

5 结 论

本文针对水下机械手遥操作系统中存在抓取对象未知、鲁棒性差的问题,提出了双边控制策略。设计了主手、从手数学模型,主手采用模糊自适应阻抗控制,从手采用积分准滑模控制,并在 Matlab Simulink 下进行了单自由度的主从机械手控制仿真。仿真结果表明:从手在双边控制中具有很好的力/位置跟踪主手的能力,模糊自适应阻抗控制在可变环境刚度条件下提高了主手对环境的力觉感知能力,滑模控制保证了从手上的抗干扰能力,采用积分滑模变结构控制消除了切换模态的抖振问题。并通过二端口网络的 Liewellyn 绝对稳定性准则分析了整个系统稳定性方法。该控制系统具有自适应性、鲁棒性,并增加了主手的柔顺控制能力,具有良好的动态品质。

参考文献:

[1] Yoon S M, Kim W J, Lee M C, et al. Choi.Bilateral Control for Haptic Laparoscopic Surgery Robot[C]//International Symposium on Robotics, 2013: 24-26

[2] Wang Hanlei, Xie Yongchun. Passivity Based Task-Space Bilateral Teleoperation with Time Delays[C]//International Conference on Robotics and Automation, 2011: 2098-2103

[3] Nguyen T T, Xin J, Satoko A. Collaborative Haptic Interaction in Virtual Environment of Multi-Operator Multi-Robot Teleoperation Systems[C]//SICE Annual Conference, 2012: 1585-1590

[4] 杨艳华,阳方平,华建宁,等. 基于线性矩阵不等式空间遥操作系统的鲁棒 H_∞ 控制[J]. 机械工程学报,2013,49(11):1-7
Yang Yanhua, Yang Fangping, Hua Jianning, et al. Robust Control for Space Teleoperation Systems Based on Linear Matrix Inequality[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 1-7 (in Chinese)

[5] 王裕基,孙富春,刘华平,等. 基于距离传感器的双边遥操作[J]. 机器人,2010,32(6):705-710
Wang Yuji, Sun Fuchun, Liu Huaping, et al. Bilateral Teleoperation Based on Range Sensor[J]. Robot, 2010,32(6):705-710 (in Chinese)

[6] Bate L, Cook C D, Li Z. Reducing Wave-Based Teleoperator Reflections for Unknown Environments[J]. IEEE Trans on Electron, 2011, 58(2): 392-397

[7] 刘红云,熊伟,居鹤华,等. 大时延遥操作系统的波变量双边自适应控制[J]. 控制工程,2012,19(3):425-430
Liu Hongyun, Xiong Wei, Ju Hehua, et al. Wave Variable Bilateral Adaptive Control of Teleoperation System with Large Time-delay[J]. Control Engineering of China, 2012, 19(3):425-430 (in Chinese)

[8] 陈宜滨,席宁,李洪谊. 无源散射变换的双边移动机器人网络遥操作[J]. 控制工程,2013,20(5):900-906

Chen Yibin, Xi Ning, Li Hongyi. Passive Scattering Transform Bilateral Teleoperation for an Internet- Based Mobile Robot[J]. Control Engineering of China, 2013,20(5):900-906 (in Chinese)

[9] 陈丹,席宁,唐旭晟. 基于事件预测的遥操作机器人系统的性能分析[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2012,40(9):123-129
Chen Dan, Xi Ning, Tang Xusheng. Performance Analysis of Telerobotic System Based on Event Prediction[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(9):123-129 (in Chinese)

[10] 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 (in Chinese)

[11] 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. Robust Impedance Control of Bilateral Teleoperation System with Time Delay Based on Disturbance Observer[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012,48(21):15-21 (in Chinese)

[12] Jazayeri A, Tavakoli M. Bilateral Teleoperation System Stability with Non-Passive and Strictly Passive Operator or Environment [J]. Control Engineering Practice, 2015(40): 45-60

The Bilateral Control Strategy in Underwater Robot's Master-Slave Teleoperation System

Liu Weidong[1,2], Zhang Jianjun[1], Gao Li'e[1,2], Cheng Ruifeng[1]

(1.College of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2.Science and Technology on Underwater Information and Control Laboratory,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The robot was an important equipment for the underwater vehicle´s exploration, the unknown objects and poor feeling property was in the manipulation, and the robot´s work was limited by low visibility under the deepwater environment. The bilateral teleportation system based on haptic perception was proposed for these problems. The fuzzy adaptive impedance control was applied to the master hand, and the integral sliding mode control strategy was applied to the slave hand. The saturation function was used to remove the chatter during the sliding mode control. The absolute stability criteria was applied for the analysis of the stability condition of bilateral control. The single degree of freedom platform was set up for the bilateral force feedback remote operating system, the relevant simulink was carried out in the Matlab Simulink. It was shown that: the robustness of the master hand and the feeling from the environment was improved, the external interference was overcomed and the chattering in sliding mode control was eliminated, the position tracking and the interaction with the environment of slave hand obtained guarantee, the whole system had a good feasibility and stability.

Keywords: remote control, sliding module control, fuzzy rules, mathematical modules, MATLAB, position tracking, stability