文章编号:1674-7070(2014)03-0211-10

宋爱国[1]　倪得晶[1]

力觉临场感遥操作机器人(4):系统的操作性能评价

摘要

力觉临场感遥操作机器人系统是一种典型的人-机-环交互系统,临场感是遥操作的核心.如何评价力觉临场感遥操作机器人系统的操作性能即临场感程度,目前大多采用基于人机工效学的主观评价分析方法.通过建立力觉临场感遥操作机器人系统的二端口网络模型,对操作者在遥操作过程的感知和控制行为进行了分析,给出了虚拟阻抗的定义,以此为基础提出了可定量评价系统操作性能即力觉临场感程度的阻抗比较法.利用阻抗比较方法对现有的4种不同反馈控制结构遥操作机器人的操作性能作了分析与评价.

关键词

力觉临场感;遥操作机器人;操作性能;透明性;性能评价

中图分类号 TP242.3

文献标志码 A

收稿日期 2014-03-08

资助项目 国家杰出青年科学基金(61325018);国家自然科学基金(61272379)

作者简介

宋爱国,男,博士,教授,研究方向为机器人传感与控制技术.a.g.song@seu.edu.cn

1　东南大学 仪器科学与工程学院,南京,210096

0　引言

临场感技术是人机交互遥操作的核心,具有临场感的遥操作机器人系统是一种以提高人的感知为目的人在回路的系统[1-3].

目前具有力觉临场感效果的遥操作机器人系统已在空间探索、深海开发、原子能利用、远程医疗与康复训练等领域得到广泛应用,如环绕在地球轨道上的卫星修理遥操作机器人、月面巡视机器人、核化探测机器人、康复训练机器人等[4-10].近10年来力反馈遥操作机器人的大量应用和实验表明:操作者通过这种具有一定力觉临场感效果的遥操作机器人去完成接触性作业任务与操作者在工作现场亲自完成同样的接触性作业任务还是有明显差距的[11-14],即存在着一种不完全透明的间隙.

所谓力觉临场感遥操作机器人系统的操作性能,主要是指操作者通过遥操作机器人系统感知和操纵远地环境,完成任务的能力,也就是指操作者在力反馈遥操作机器人系统中的临场感程度.操作性能优良的遥操作机器人系统能够提供完美的力觉临场感状态,即操作者和环境之间是无间隙的,也就是说遥操作机器人对操作者来说应是完全透明的.

由于力觉临场感遥操作机器人系统的研究大多侧重于机器人机构设计、控制方法、系统稳定性、力反馈技术与系统构成方面,而对如何去评价遥操作机器人系统的操作性能目前的文献较少,现有的研究主要是采用人机工效学的方法,以定性分析与操作者的主观感受和操作准确性评价为主,如用操作者在遥操作机器人系统中执行任务的时间长短、运动跟踪误差、疲劳的快慢与程度等[15-17]来说明力觉临场感遥操作机器人系统的操作性能好坏,这主要是由于力觉临场感遥操作机器人系统的操作性能不仅与人的因素(感知能力、年龄、经验、知识、心理状况)有关,而且与遥操作机器人系统本身的性能(机构、传感、控制等)有关,因此难以定量地评价其操作性能.而随着遥操作机器人技术在空间探测、海洋开发、远程医疗和原子能等领域的大量应用,力觉临场感遥操作机器人系统的分析和设计迫切需要一种合理的、能定量评价其操作性能即临场感程度的方法.

本文通过建立力觉临场感遥操作机器人系统的二端口网络模型分析了操作者在对机器人进行遥操作过程的感知和控制行为,以此为基础推导出一套定量评价力觉临场感遥操作机器人系统操作性能

即临场感程度的指标函数,并对目前存在的几种不同控制结构的双边遥操作机器人系统的操作性能进行了评价与比较.

1 力觉临场感遥操作机器人系统的网络模型

力觉临场感遥操作机器人系统由图 1 所示的 3 个子系统组成,即操作者、主从机器人和环境.

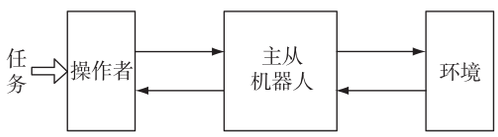


图 1 力觉临场感遥操作机器人系统组成框图

Fig. 1 Composition diagram of the force telepresence teleoperation telerobot system

为了分析方便,本文只考虑单自由度的情况,遥操作机器人采用最常见的主从机械手系统来表示,主从机械手系统由主机械手、通讯环节和从机械手组成,如图 2 所示.

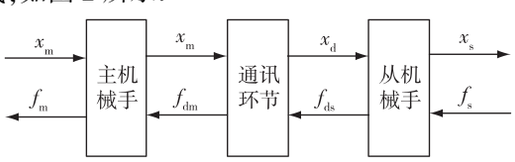


图 2 主从机械手系统的组成

Fig. 2 Composition of the master-slave robot system

操作者和环境的模型在文献[1,3]中已给出了详细分析,在此不再赘述,只给出主从机械手子系统的二端口网络模型.

主机械手:

$$f_m - f_{dm} = m_m\ddot{x}_m + b_m\dot{x}_m + k_m x_m. \tag{1}$$

从机械手:

$$f_{ds} - f_s = m_s\ddot{x}_s + b_s\dot{x}_s + k_s x_s. \tag{2}$$

通讯环节:

$$\begin{bmatrix} f_{dm} \\ x_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_{ds} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

其中:

$$f_{ds} = b_c(\dot{x}_d - \dot{x}_s) + k_c(x_d - x_s). \tag{4}$$

m_m、b_m、k_m 分别表示主机械手的惯性质量、阻尼和弹性系数,m_s、b_s、k_s 分别表示从机械手的惯性质量、阻尼和弹性系数,f_{dm} 表示力反馈电机对主机械手的作用力,f_{ds} 为电机对从机械手的作用力,b_c、k_c 分别为速度的比例控制系数和积分控制系数.

利用机械系统和电系统的等效关系,并用 u 代替 f,i 代替 $\dot{x}$,可得主从机械手系统等效的二端口电网络方程.

$$U_m - U_{dm} = (m_m s + b_m + k_m/s) I_m \overset{\text{def}}{=} Z_m I_m, \tag{5}$$

$$U_{ds} - U_s = (m_s s + b_s + k_s/s) I_s \overset{\text{def}}{=} Z_s I_s, \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} U_{dm} \\ I_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \\ U_{ds} \end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$U_{ds} = (b_c + k_c/s)(I_d - I_s) \overset{\text{def}}{=} Z_c(I_d - I_s), \tag{8}$$

其中,Z_m、Z_s、Z_c 分别为主机械手阻抗、从机械手阻抗及控制阻抗.因此,主从机械手系统可用图 3 的二端口网络表示.

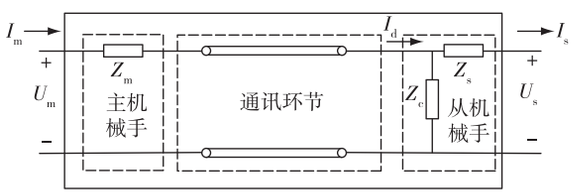


图 3 主从机械手的等效二端口网络

Fig. 3 The equivalent two-port network of the master-slave robot system

主从机械手系统的等效二端口网络可用更具有物理意义的混合矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} U_m \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \\ U_s \end{bmatrix}, \tag{9}$$

$$[H_{ms}] \overset{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}. \tag{10}$$

其中:

$$h_{11} = \left.\frac{U_m}{I_m}\right|_{U_s=0} = \frac{Z_c(Z_s + Z_m) + Z_m Z_s}{Z_c + Z_s}, \tag{11}$$

$$h_{12} = \left.\frac{U_m}{U_s}\right|_{I_m=0} = \frac{Z_c}{Z_c + Z_s}, \tag{12}$$

$$h_{21} = \left.\frac{I_s}{I_m}\right|_{U_s=0} = \frac{Z_c}{Z_c + Z_s}, \tag{13}$$

$$h_{22} = \left.\frac{I_s}{U_s}\right|_{I_m=0} = -\frac{1}{Z_c + Z_s}, \tag{14}$$

$$[H_{ms}] = \begin{bmatrix} \dfrac{Z_c(Z_s + Z_m) + Z_m Z_s}{Z_c + Z_s} & \dfrac{Z_c}{Z_c + Z_s} \\ \dfrac{Z_c}{Z_c + Z_s} & -\dfrac{1}{Z_c + Z_s} \end{bmatrix}. \tag{15}$$

H_{ms} 矩阵的具体意义为

$$[H_{ms}] = \begin{bmatrix} \text{输入阻抗} & \text{反向力增益} \\ \text{速度增益} & \text{输出导纳} \end{bmatrix}. \tag{16}$$

结合操作者和环境的电网络模型,假定给定的任务可作为一个单独的任务源来看待,则整个力觉临场感系统可用图 4 的级联二端口网络模型表示.

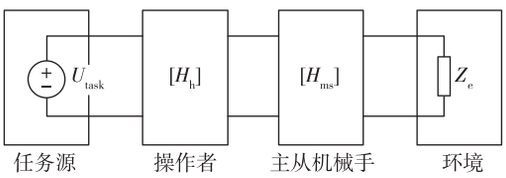


图 4 力觉临场感遥操作机器人系统的网络级联

Fig. 4 The network cascade of the force telepresence teleoperation telerobot system

2 力觉临场感系统操作性能的定量评价方法

力觉临场感遥操作机器人系统使操作者和环境之间有了直接的力觉和运动觉的联结,理想的临场感情况下,操作者对环境的感知应是透明的、实时的,即操作好像通过临场感遥操作机器人系统延伸了自己的双手,直接接触环境并对环境进行操作.人们每天都以本能的方式进行探索和感知,这种探索和感知既丰富了个人的经验和知识,又依赖于经验和知识做出判断,其中的关键是获取信息的正确性.力觉临场感遥操作系统应能有效地支持操作者的这种主动感知行为,提供正确信息.在力觉临场感遥操作机器人系统中,操作者以如图 5 所示的感知、决策、控制、反馈的闭环过程工作.

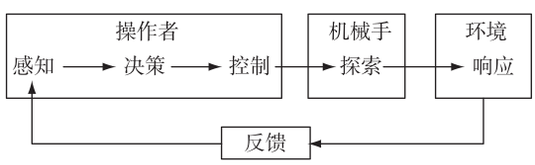


图 5 操作者在遥操作机器人系统中的感知、决策与控制的闭环过程

Fig. 5 The closed-loop process of human operator's perception, decision-making and control in the force telepresence teleoperation telerobot system

操作者的力觉感知主要是对环境动力学特性的识别(环境几何特性的识别主要由视觉临场感完成),环境的动力学模型可以用等效的阻抗模型 $Z_e(s)$ 表示.

操作者通过遥操作机器人系统实现对环境的感知与操作时,操作者对主机械手的作用力 f_m 和主机械手的运动速度 v_m 之间的关系应同环境对从机械手的作用力 f_s(即 f_e)和从机械手的运动速度 v_s(即 v_e)之间的关系一致.理想的力觉临场感情况下,从机械手的运动与主机械手的运动一致,主机械手对操作者的作用力与环境对从机械手的作用力一致,即:

$$\begin{cases} \dot{x}_s = \dot{x}_m = \dot{x}_e, \\ f_m = f_s = f_e. \end{cases} \tag{17}$$

当力觉临场感遥操作机器人系统满足条件(17)时,称其对操作者是完全透明的,此时系统的操作性能最优即临场感程度最高.条件(17)定义为完全透明条件.

由于机械手的运动和受力是一个不确定的参数,完全透明条件(17)在定量计算分析上存在一定困难,为了便于定量分析系统的操作性能,本文将条件(17)中的等式相除,并用 S 域表示,得到如下公式:

$$\frac{U_m(s)}{I_m(s)} = \frac{U_e(s)}{I_e(s)} = Z_e(s). \tag{18}$$

称式(18)为阻抗透明条件,当力觉临场感遥操作机器人系统满足式(18)时,对操作者是完全透明的,其操作性能最优.式(18)表明:操作者在力觉临场感遥操作机器人系统中感知和控制环境的过程,实际上是系统将环境的动力学特性即环境阻抗传递到操作者手部的过程,因此力觉临场感遥操作机器人系统的操作性能可以用系统传递环境阻抗的准确性来评价.

为了分析方便,下面给出虚拟阻抗的概念,虚拟阻抗 Z_V 定义如下:

$$Z_V(s) = \frac{U_m(s)}{I_m(s)}\bigg|_{Z_e(s)=\text{const}} = Z_m(s)\bigg|_{Z_e(s)=\text{const}}. \tag{19}$$

虚拟阻抗本质上就是主从机械手子系统二端口网络的主边输入阻抗,如图 6 所示.

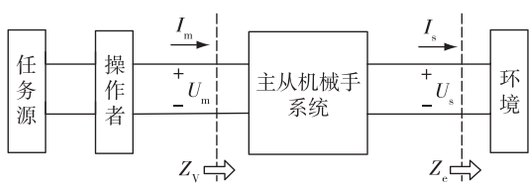


图 6 环境阻抗的传递

Fig. 6 Transitive graph of environment impedance

因此,在理想的力觉临场感情况下,即系统的操作性能最优,此时应满足如下的阻抗透明性条件:

$$Z_V(s) = Z_e(s). \tag{20}$$

综合式(9)、(19)、(20),可得虚拟阻抗与环境阻抗的关系:

$$Z_{\mathrm{V}}(s)=\frac{h_{11}+(h_{12}h_{21}-h_{11}h_{22})Z_{\mathrm{e}}(s)}{1-h_{22}Z_{\mathrm{e}}(s)},\tag{21}$$

因此,对于理想的力觉临场感条件,h 参数应满足:

$$\begin{cases}h_{11}=0, & h_{12}=1,\\ h_{21}=1, & h_{22}=0,\end{cases}\tag{22}$$

即主从机械手子系统的 H 参数矩阵满足:

$$[H_{\mathrm{ms}}]=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{bmatrix}.\tag{23}$$

本文给出如下阻抗距离比较指标函数来定量评价力觉临场感遥操作机器人系统的操作性能:

$$\begin{cases}P=\displaystyle\int_0^{\omega_{\max}}\frac{|Z_{\mathrm{V}}(j\omega)-Z_{\mathrm{e}}(j\omega)|^2}{|Z_{\mathrm{e}}(j\omega)|^2}\mathrm{d}\omega, & Z_{\mathrm{e}}(j\omega)\neq 0,\\ P_0=\displaystyle\int_0^{\omega_{\max}}|Z_{\mathrm{V}}(j\omega)|^2\mathrm{d}\omega, & Z_{\mathrm{e}}(j\omega)=0,\end{cases}\tag{24}$$

其中,$\omega_{\max}$ 为遥操作机器人系统的最大工作频率,取决于人手的操作速度和机械手的工作带宽,一般在几十赫兹以下.

力觉临场感遥操作机器人系统的阻抗距离比较指标函数 P 和 P_0 越小,表明系统的操作性能越好,理想的情况下,有:

$$\begin{cases}P=0,\\ P_0=0.\end{cases}\tag{25}$$

3 几种典型反馈结构的遥操作机器人系统的操作性能分析

力觉临场感遥操作机器人系统是一种高级的遥操作机器人系统,现有的遥操作机器人系统中存在着几种典型的反馈控制结构,了解这几种反馈控制结构中哪一种更适合于力觉临场感系统的设计,是力觉临场感理论研究的一个重要工作.前一节提出了虚拟阻抗的概念,并给出了定量评价系统操作性能的阻抗距离比较指标函数,在这一节中,利用虚拟阻抗的概念来分析几种典型反馈控制结构的遥操作机器人系统的操作性能.

现有的遥操作机器人系统中,存在着以下 4 种典型的反馈控制结构[18-21]:

1) 无力反馈型;

2) 位置-位置型;

3) 力-位置型;

4) 力反馈-位置型.

各反馈控制结构分别如图 7a—d 所示.

用 $G_{\mathrm{m}}(s)$ 表示主边放大器,执行电机和主机械手的开环传递函数,$G_{\mathrm{s}}(s)$ 表示从边放大器,执行电机和从机械手的开环传递函数,以下分别讨论 4 种不同反馈结构下遥操作机器人系统的操作性能.

3.1 无力反馈型

对于无力反馈型遥操作机器人系统,此时的 h 参数:

$$h_{11}=\left.\frac{U_{\mathrm{m}}}{I_{\mathrm{m}}}\right|_{U_{\mathrm{s}}=0}=0,\tag{26}$$

$$h_{12}=\left.\frac{U_{\mathrm{m}}}{U_{\mathrm{s}}}\right|_{I_{\mathrm{m}}=0}=0,\tag{27}$$

$$h_{21}=\left.\frac{I_{\mathrm{s}}}{I_{\mathrm{m}}}\right|_{U_{\mathrm{s}}=0}=\frac{G_{\mathrm{s}}(s)}{1+G_{\mathrm{s}}(s)},\tag{28}$$

$$h_{22}=\left.\frac{I_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{s}}}\right|_{I_{\mathrm{m}}=0}=0,\tag{29}$$

$$Z_{\mathrm{V}}(s)=\frac{h_{11}+(h_{12}h_{21}-h_{11}h_{22})Z_{\mathrm{e}}(s)}{1-h_{22}Z_{\mathrm{e}}(s)}=0.\tag{30}$$

式(30)表明无力反馈型的遥操作机器人系统,环境的阻抗 $Z_{\mathrm{e}}(s)$ 除了为0的情况外,无论如何也传递不到操作者的手部,此时利用式(24) 可求出其操作性能的阻抗距离比较指标函数:

$$\begin{cases}P=0,\\ P_0=0.\end{cases}\tag{31}$$

所以,无力反馈型的反馈结构不适用于力觉临场感遥操作机器人系统的设计,只适用于从机械手与环境无接触条件下的位置跟随型遥操作机器人系统.

3.2 位置-位置型

对于位置-位置型遥操作机器人系统,此时的 h 参数:

$$h_{11}=\left.\frac{U_{\mathrm{m}}}{I_{\mathrm{m}}}\right|_{U_{\mathrm{s}}=0}=\frac{G_{\mathrm{m}}(s)}{s(1+G_{\mathrm{s}}(s))},\tag{32}$$

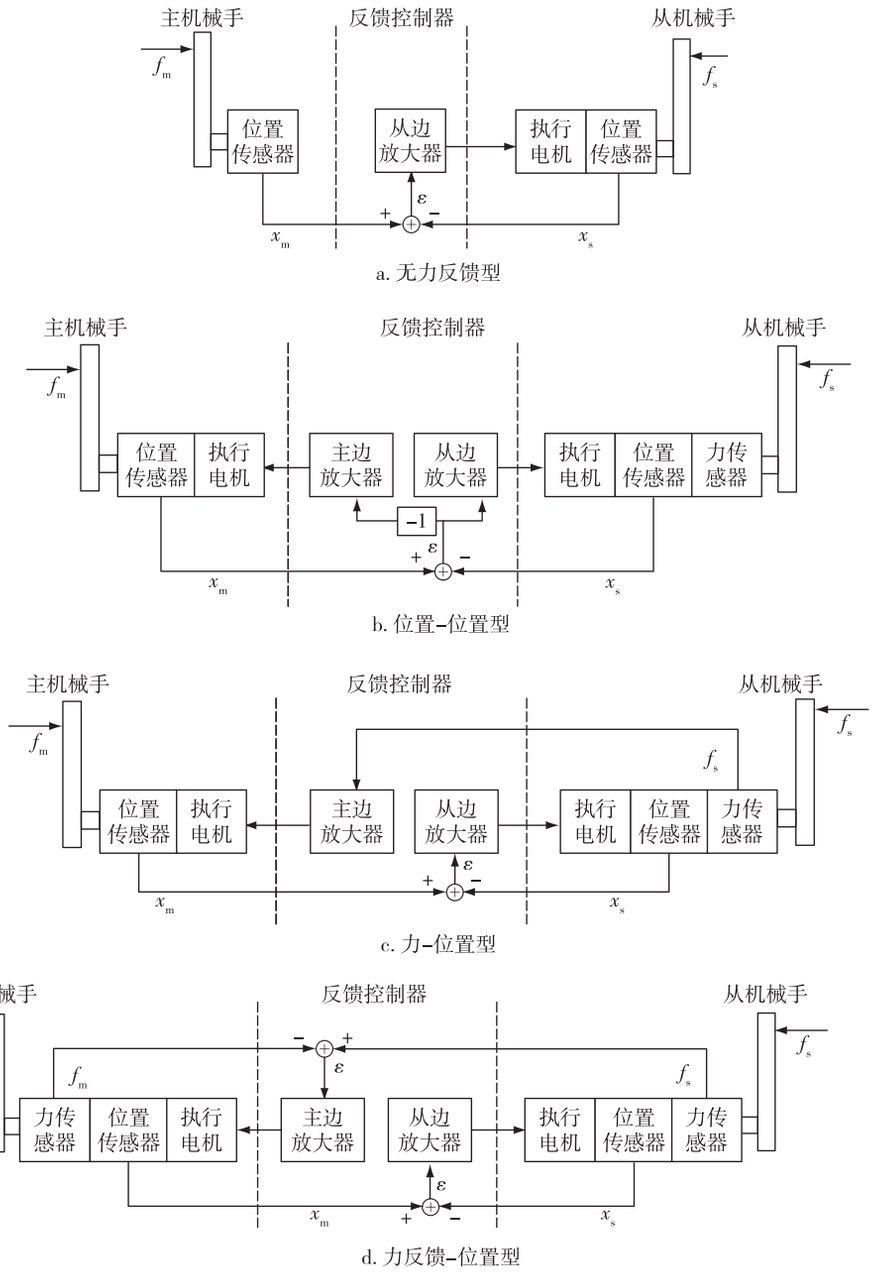
$$h_{12}=\left.\frac{U_{\mathrm{m}}}{U_{\mathrm{s}}}\right|_{I_{\mathrm{m}}=0}=0,\tag{33}$$

$$h_{21}=\left.\frac{I_{\mathrm{s}}}{I_{\mathrm{m}}}\right|_{U_{\mathrm{s}}=0}=\frac{G_{\mathrm{s}}(s)}{1+G_{\mathrm{s}}(s)},\tag{34}$$

$$h_{22}=\left.\frac{I_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{s}}}\right|_{I_{\mathrm{m}}=0}=0,\tag{35}$$

$$Z_{\mathrm{V}}(s)=\frac{G_{\mathrm{m}}(s)}{s(1+G_{\mathrm{s}}(s))}.\tag{36}$$

式(36)表明位置-位置型的遥操作机器人系统,环境的阻抗 $Z_{\mathrm{e}}(s)$ 在虚拟阻抗 $Z_{\mathrm{V}}(s)$ 中得不到任何表现,操作者感知到的只是由系统的开环传递函数



a. 无力反馈型

b. 位置-位置型

c. 力-位置型

d. 力反馈-位置型

图 7　遥操作机器人系统的 4 种典型的反馈控制结构

Fig. 7　Four typical feedback control structure of the force telepresence telerobot system, with for without force feedback, for place to place feedback, for force to place feedback, and for force-feedback to place

决定的内在动力学行为,此时系统的操作性能阻抗距离比较指标函数:

$$\begin{cases} P=\int_0^{\omega_{\max}} \dfrac{\left|\dfrac{G_{\mathrm{m}}(j\omega)}{j\omega(1+G_{\mathrm{s}}(j\omega))}-Z_{\mathrm{e}}(j\omega)\right|^2}{|Z_{\mathrm{e}}(j\omega)|^2}\mathrm{d}\omega, \\ P_0=\int_0^{\omega_{\max}}\left|\dfrac{G_{\mathrm{m}}(j\omega)}{j\omega(1+G_{\mathrm{s}}(j\omega))}\right|^2\mathrm{d}\omega, \end{cases} \tag{37}$$

所以位置-位置型的反馈控制结构,不适用于力觉临场感遥操作机器人系统的设计.

3.3　力-位置型

对于力-位置型遥操作机器人系统,此时的 h 参数:

$$h_{11}=\left.\frac{U_{\mathrm{m}}}{I_{\mathrm{m}}}\right|_{U_{\mathrm{s}}=0}=0, \tag{38}$$

$$h_{12}=\left.\frac{U_{\mathrm{m}}}{U_{\mathrm{s}}}\right|_{I_{\mathrm{m}}=0}=G_{\mathrm{m}}(s), \tag{39}$$

$$h_{21}=\left.\frac{I_s}{I_m}\right|_{U_s=0}=\frac{G_s(s)}{1+G_s(s)},\tag{40}$$

$$h_{22}=\left.\frac{I_s}{U_s}\right|_{I_m=0}=0,\tag{41}$$

$$Z_V(s)=\frac{G_s(s)G_m(s)}{1+G_s(s)}\cdot Z_e(s).\tag{42}$$

对大多数力-位置型遥操作机器人系统,力反馈传递函数:

$$G_m(s)=1,\tag{43}$$

则

$$Z_V(s)=\frac{G_s(s)G_m(s)}{1+G_s(s)}\cdot Z_e(s).\tag{44}$$

令 $G_s(s)$ 中的增益系数 $k_s\to\infty$,可使

$$Z_V(s)=Z_e(s),\tag{45}$$

然而 $G_s(s)$ 从控制性能上看,过大的增益 k_s 会造成系统的振荡及超调,易带来不稳定,因此可以修改式(42)中的 $G_m(s)$ 项,使 $G_m(s)$ 满足:

$$G_m(s)=1+\frac{1}{G_s(s)},\tag{46}$$

则环境阻抗 $Z_e(s)$ 可无失真地传递到主边,此时系统的操作性能阻抗距离比较指标函数:

$$\begin{cases}P=0,\\P_0=0.\end{cases}\tag{47}$$

所以力-位置型的反馈控制结构适用于力觉临场感遥操作机器人系统的设计.然而值得指出的是在大多数情况下,式(47)的条件难以通过对 $G_m(s)$ 的调节来满足,因此力-位置型的反馈控制结构并不是最优的.

3.4 力反馈-位置型

对于力反馈-位置型遥操作机器人系统,其混合矩阵的 h 参数分别如下:

$$h_{11}=\left.\frac{U_m}{I_m}\right|_{U_s=0}=0,\tag{48}$$

$$h_{12}=\left.\frac{U_m}{U_s}\right|_{I_m=0}=\frac{G_m(s)}{1+G_m(s)},\tag{49}$$

$$h_{21}=\left.\frac{I_s}{I_m}\right|_{U_s=0}=\frac{G_s(s)}{1+G_s(s)},\tag{50}$$

$$h_{22}=\left.\frac{I_s}{U_s}\right|_{I_m=0}=0,\tag{51}$$

$$Z_V(s)=\frac{G_s(s)G_m(s)}{(1+G_s(s))(1+G_m(s))}\cdot Z_e(s).\tag{52}$$

令 $G_m(s)$ 和 $G_s(s)$ 的增益系数 $k_m\to\infty$,$k_s\to\infty$,则可能

$$Z_V(s)=Z_e(s),\tag{53}$$

然而,从控制性能出发,过大的 k_m 和 k_s 会造成系统的振荡及超调,易带来不稳定,因此,可以使 $G_m(s)$ 满足:

$$G_m(s)=-(1+G_s(s)),\tag{54}$$

则环境阻抗 $Z_e(s)$ 可无失真地传递到主边,此时系统的操作性能阻抗距离比较指标函数:

$$\begin{cases}P=0,\\P_0=0.\end{cases}\tag{55}$$

所以力反馈-位置型的反馈控制结构适用于力觉临场感遥操作机器人系统的设计.

对于力-位置型和力反馈-位置型的反馈控制结构,后者更适用于力觉临场感遥操作机器人系统设计,这是由于 $G_m(s)$ 和 $G_s(s)$ 大都具有相同的表达式,式(54)比式(46)更容易实现.

4 实验研究

4.1 实验系统的构成

为了检验本文的理论分析结果,设计了一套单自由度的主从式力觉临场感遥操作机器人系统作为实验平台[22-23],如图 8 所示.

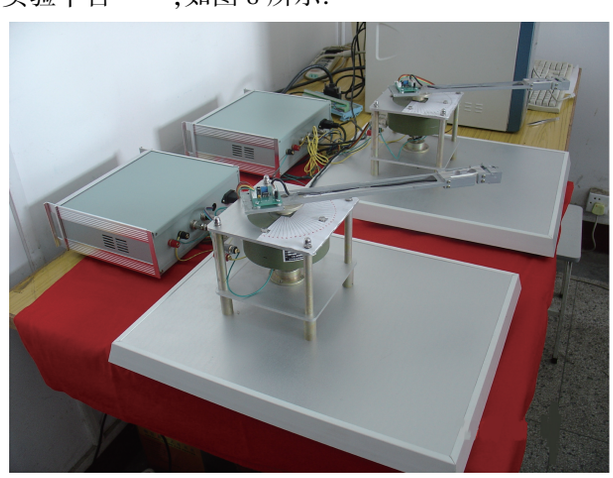


图 8 主从式力觉临场感遥操作机器人实验系统

Fig. 8 The experimental system picture of the master-slave force telepresence teleoperation telerobot system

主从式力觉临场感遥操作机器人系统由单自由度主机械手(主臂)、从机械手(从臂)、计算机(包括软硬件)、2 套功放电路、2 个直流力矩电机、2 个力传感器和 2 个位置传感器组成,图 9 是该力觉临场感遥操作机器人实验系统的示意.

系统的基本工作原理如下:由操作者操纵主机械手运动,安装在主从机械手上的位置传感器将它

们的信息通过 A/D 变换送入计算机,由计算机按照一定的控制算法得到的输出经 D/A 变换和功率放大后分别驱动主、从机械手的力矩电机.当采用力-位置型反馈控制结构时,从机械手末端与环境接触作用之前,主机械手力矩电机对主机械手无力的作用,从机械手力矩电机驱动从机械手跟踪主机械手的运动,此时遥操作机器人系统工作在位置跟踪状态;当从机械手与环境发生力的接触时,力传感器检测从机械手与环境的相互作用力并反馈给计算机,计算机根据力传感器信号控制主机械手力矩电机输出力的作用,从而使操纵主机械手的操作者感受到力的作用,此时遥操作机器人系统工作在力跟踪状态.

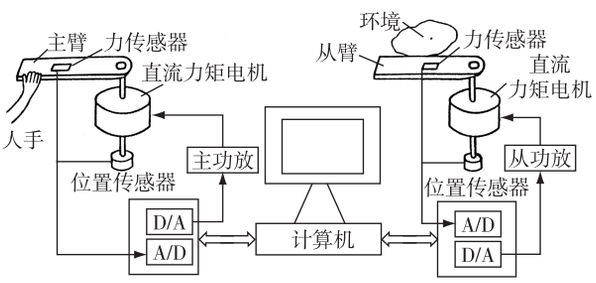


图 9　力觉临场感遥操作机器人系统示意

Fig. 9　Composition of the force telepresence teleoperation telerobot system

4.2　4 种典型反馈结构的比较实验

本文利用所构建单自由度的主从式力觉临场感遥操作机器人系统对以下 4 种典型的反馈控制结构的操作性能进行实验分析:

1) 无力反馈型;

2) 位置-位置型;

3) 力-位置型;

4) 力反馈-位置型.

本文上一节的理论分析证明了只有力-位置型和反馈-位置型 2 种反馈结构适用于力觉临场感系统的设计.

图 10、11 为无力反馈型结构的主从遥操作机械手的双力位置和力变化曲线,表明从机械手和环境的接触力无法在主机械手处体现,操作者只能感到主机械手的机械阻抗,该反馈控制结构不能产生力觉临场感的效果.

图 12、13 为位置-位置型反馈控制结构的主从遥操作机械手的双边位置和力变化曲线,表明从机械手和环境的接触力无法在主机械手处体现,操作者只能感知到由主、从机械手位置差引起的系统内在机械动力学特性,该反馈控制结构不能产生力觉

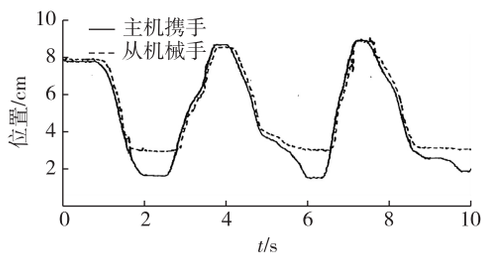


图 10　无力反馈型从机械手的位置跟踪曲线

Fig. 10　The curve of the slave-manipulator tracking position of the system without force feedback

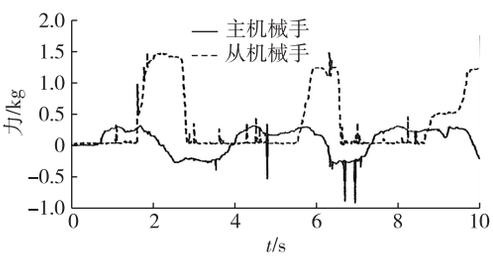


图 11　无力反馈型主机械手的力变化曲线

Fig. 11　Force variation curve of the master-manipulator tracking position of the system without force feedback

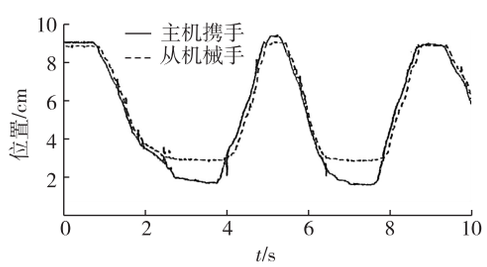


图 12　位置-位置型从机械手的位置跟踪曲线

Fig. 12　The curve of the slave-manipulator tracking position of the place to place system

临场感的效果.

图 14、15 为力-位置型反馈控制结构的主从遥操作机械手的双边位置和力变化曲线,表明从机械手和环境的接触力能较为准确地在主机械手处体现,其中,主机械手的机械阻抗是影响环境阻抗准确传递给操作者的主要原因,操作者感知到的阻抗实际上是环境阻抗和主机械手机械阻抗的串联(控制阻抗的参数值选择合理的大小,其带来的误差很小,可忽略不计),通过减小主、从机械手的机械阻抗或修正主、从边的传递函数可降低误差,因此,该反馈控制结构适合于力觉临场感遥操作机器人系统的设计.

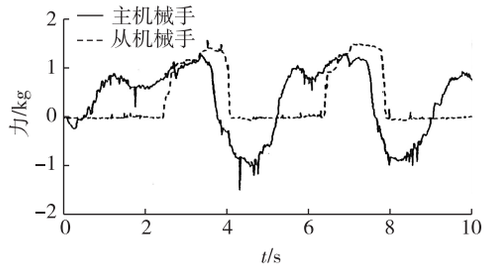


图 13　位置-位置型主机械手的力跟踪曲线

Fig. 13　Force variation curve of the master-manipulator tracking position of the place to place system

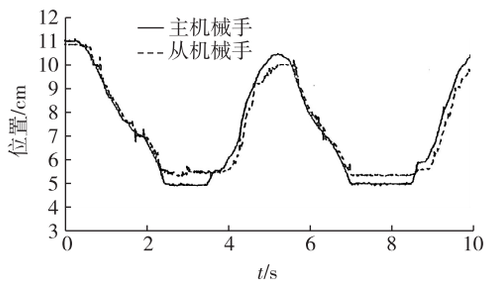


图 14　力-位置型从机械手的位置跟踪曲线

Fig. 14　The curve of the slave-manipulator tracking position of the force to place system

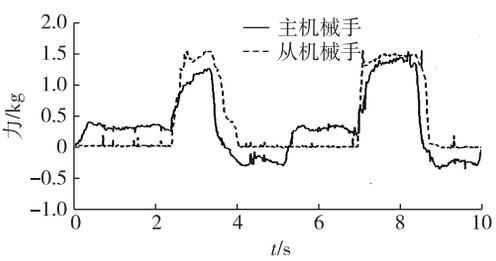


图 15　力-位置型主机械手的力跟踪曲线

Fig. 15　Force variation curve of the master-manipulator tracking position of the force to place system

图 16、17 为力反馈-位置型反馈控制结构的主从遥操作机械手的双边位置和力变化曲线,表明从机械手和环境的接触力能很准确地在主机械手处体现,双边位置和力变化曲线较为一致,因此,该反馈控制结构适合于力觉临场感遥操作机器人系统的设计,而且比力-位置型的反馈控制结构更优,能够实现较为理想的力觉临场感.

5　结论

本文首先利用机械系统和电系统的等效关系,建立了主从遥操作机器人系统的二端口网络模型,

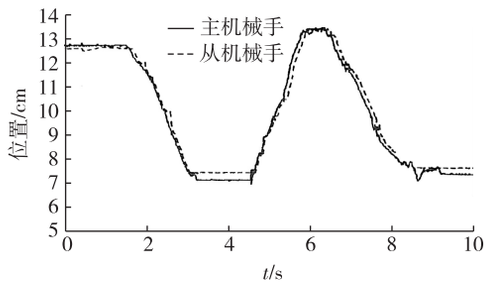


图 16　力反馈-位置型从机械手的位置跟踪曲线

Fig. 16　The curve of the slave-manipulator tracking position of the force-feedback to place system

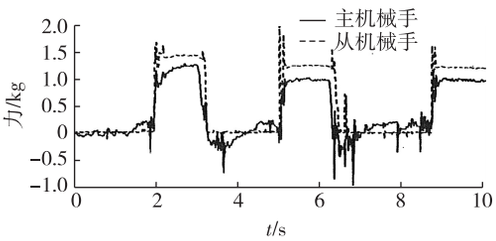


图 17　力反馈-位置型主机械手的力跟踪曲线

Fig. 17　Force variation curve of the master-manipulator tracking position of the force-feedback to place system

接着对遥操作过程中操作者的探索—感知—决策—控制过程作了分析,认为在力觉临场感遥操作机器人系统中,操作者感知的是环境的动力学行为即环境阻抗,力觉临场感系统的操作性能应由系统传递环境阻抗到主边操作者处的准确性来评价.本文给出了虚拟阻抗的定义,提出了可定量评价系统操作性能的方法即力觉临场感程度的阻抗比较法;利用阻抗比较方法对现有的 4 种不同反馈控制结构遥操作机器人的操作性能作了定量分析与评价,结果表明力-位置型和力反馈-位置型的反馈控制结构适用于力觉临场感遥操作机器人系统的设计,其中后者更易于实现力觉临场感.

参考文献

References

[1] 宋爱国.力觉临场感的理论与实验研究[D].南京:东南大学仪器科学与工程学院,1996
SONG Aiguo. Theoretical and experimental research on force telepresence[D].Nanjing:School of Instrument Science and Engineering,Southeast University,1996

[2] 宋爱国.力觉临场感遥操作机器人(1):技术发展与现状[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2013,5(1):1-19
SONG Aiguo.Force telepresence telerobot (1):Review of

the history and development[J].Journal of Nanjing University of Information Science & Technology:Natural Science Edition,2013,5(1):1-19

[3] 宋爱国,柯欣,潘礼正.力觉临场感遥操作机器人(2):操作者的输入输出特性建模[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2013,5(2):97-105
SONG Aiguo, KE Xin, PAN Lizheng. Force telepresence telerobot (2): Modeling of the human operator input-output property[J].Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition,2013,5(2):97-105

[4] Li H J,Song A G.Virtual-environment modeling and correction for force-reflecting teleoperation with time delay [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(2):1227-1233

[5] 宋爱国,黄惟一.空间遥控作业系统的自适应无源控制[J].宇航学报,1997,18(3):26-32
SONG Aiguo, HUANG Weiyi. Adaptive passivity control of space teleoperation system[J].Journal of Astronautics,1997,18(3):26-32

[6] Ling Y,Lu W,Song A G,et al.Sampling head:Rock contact identification for regolith sampling in space[J].Aerospace Science and Technology,2013,31(1):108-114

[7] 钱夔,宋爱国,熊鹏文,等.基于高斯模型的核探测机器人寻找核辐射源方法[J].高技术通讯,2013,23(3):282-288
QIAN Kui, SONG Aiguo, XIONG Pengwen, et al. A Gaussian model based method for nuclear detection robots to locate radiation sources[J].Chinese High Technology Letters,2013,23(3):282-288

[8] Bao J T, Guo Y, Song A G, et al. A multi-agent based robot telesupervision architecture for hazardous materials detection[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation,2010:2428-2432

[9] 徐国政,宋爱国,李会军.基于模糊逻辑的上肢康复机器人阻抗控制实验研究[J].机器人,2010,32(6):792-798
XU Guozheng, SONG Aiguo, LI Huijun. Experimental study on fuzzy-logic-based impedance control for upper-limb rehabilitation robot [J]. Robot, 2010, 32 (6): 792-798

[10] Song A G, Pan L Z, Xu G Z, et al. Impedance identification and adaptive control of rehabilitation robot for upper limb passive training [J]. Advances in Intelligent Systems and Computing,2014,213:691-710

[11] Lawrence D A.Stability and transparency in bilateral teleoperation[J].IEEE Transactions on Robotics and Automation,1993,9(5):624-637

[12] Lee S,Ishibashi Y,Kim J W.Transparency analysis and haptic synchronization for transparency of force-reflecting teleoperation[C]//Proceedings of the 8th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games,2009:1-2

[13] Li X, Song A G, Li H J, et al. Real-time obstacle avoidance for telerobotic systems based on equipotential surface[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems,2012,9:71-78

[14] Song A G,Morris D,Colgate J E,et al.Real time stiffness display interface device for perception of virtual soft object[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,2005:139-143

[15] Lawn C A,Hannaford B.Performance testing of passive communication and control in teleoperation with time delay [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, 3: 776-783

[16] Chopra N,Spong M W,Ortega R,et al.On tracking performance in bilateral teleoperation[J].IEEE Transactions on Robotics,2006,22(4):861-866

[17] 刘少强,王爱民,樊晓平,等.时延下比率遥操作系统稳定性与性能折衷策略[J].东南大学学报:自然科学版,2005,35(3):469-474
LIU Shaoqiang, WANG Aimin, FAN Xiaoping, et al. Control scheme for stability and performance tradeoff in scaled telemanipulation with communication time delay [J].Journal of Southeast University:Natural Science Edition,2005,35(3):469-474

[18] 宋爱国,黄惟一.一种新的基于临场感的力觉显示结构[J].仪器仪表学报,1998,19(2):177-180
SONG Aiguo,HUANG Weiyi.A novel force display structure based on telepresence[J].Chinese Journal of Scientific Instrument,1998,19(2):177-180

[19] 陈辉,宋爱国,金世俊,等.带有力觉和触觉临场感的灵巧手主从系统的设计[J].机器人,1998,20(6):437-441
CHEN Hui, SONG Aiguo, JIN Shijun, et al. Master and slave system design of a dexterous hand with force and tactile telepresence[J].Robot,1998,20(6):437-441

[20] Lau H Y K,Wai L C C.Implementation of position-force and position-position teleoperator controllers with cable-driven mechanisms[J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2005,21(2):145-152

[21] Xiong P W,Song A G,Qian K,et al.Operation modes and control schemes for a telerobot with time delay[J].International Journal of Advanced Robotic Systems,2012,9:57-64

[22] 宋爱国,黄惟一.临场感测试技术及力觉临场感的实现[J].仪器仪表学报,1996,17(3):249-254
SONG Aiguo, HUANG Weiyi. Telepresence measuring technique and realization of force sensing telepresence measuring[J].Chinese Journal of Scientific Instrument,1996,17(3):249-254

[23] 刘威,宋爱国,李会军.力觉临场感机器人基于在线修正虚拟模型的远程控制[J].东南大学学报:自然科学版,2006,36(2):242-246
LIU Wei,SONG Aiguo,LI Huijun.Force-reflecting teleoperation of robot based on online correction of virtual model [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2006,36(2):242-246

Force telepresence telerobot(4): Evaluation of operational performance

SONG Aiguo[1] NI Dejing[1]
1 School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract The force telepresence telerobot system is a typical human-robot-environment-interaction system, and the telepresence is the core of teleoperation system. How to evaluate the operating performance or telepresence degree of a force telepresence teleoperation system is a basic problem. At present, the evaluation of the operating performance mainly uses the human's subjective evaluation based on the ergonomics theory. In this paper, a two-port network model of the force telepresence teleoperation system is established, and the perception and control behavior of human operator in the telerobot system is analyzed. Then we give a definition of virtual impedance as a basis for quantitatively evaluating the operational performance of the telerobot systems, which is called impedance comparative method. At last, the operating performances of existing four types of telerobot systems based on different control structures are analyzed and evaluated by using the impedance comparative method.

Key words force telepresence; teleoperation; operational performance; transparency; performance evaluation