文章编号:1674-7070(2013)02-0097-09

力觉临场感遥操作机器人(2):操作者的输入输出特性建模

宋爱国[1]　柯欣[1]　潘礼正[1]

摘要

力觉临场感遥操作机器人系统是一个典型的人在回路(Human-in-Loop)的人机交互系统,操作者作为整个系统的一个重要单元是完成机器人控制的顶层控制环节.操作者需要接受力觉、触觉、视觉和运动信息反馈后,才能作出决策,远程操纵机器人执行任务,因此操作者是一个基于多输入单输出的复杂系统,而且具有非线性和时变性,需要建立一套相应的控制模型.文章通过分析操作者在力觉临场感遥操作系统中的感知、决策与动作的特性,建立了一种操作者的输入输出模型,并给出了模型的等效二端口网络形式,为力觉临场感遥操作机器人系统的分析提供了基础.

关键词

力觉临场感;遥操作机器人;操作者;感知;决策;控制;建模

中图分类号 TP242.3

文献标志码 A

收稿日期 2013-03-18

资助项目 国家自然科学基金项目(61272379);江苏省自然科学基金重点项目(BK2010063)

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

临场感遥操作技术将操作者引进机器人的控制回路,用操作者的智能和经验来补充机器人智能和自主性方面的不足,用机器人的适应性来补充操作者对恶劣和危险环境的不适应性.临场感遥操作机器人系统通过人—机器人—环境间信息和能量的双向交流,来实现对机器人带感觉的控制[1-2].

力觉临场感作为临场感的主要形式之一,使操作者和远地工作环境之间有了动觉和力觉的联结.操作者在临场感遥操作系统中的操作过程,实际上是人—机器人—环境这个复杂的大系统根据给定的工作任务而自行控制调节的过程.

在临场感遥操作机器人系统的分析和设计中必须考虑到人的因素,这一点已受到机器人领域国际知名学者 H. Kazrooni[3],T. Fukuda 等[4]机器人研究者的重视,并开展了相关的研究,取得了不少有价值的进展[5-6].但是现有的研究主要集中在人的力触觉感知生理与心理特性研究方面[7-12],其次,还有一些文献从人机工效学的角度研究如何设计遥操作机器人系统的结构组成、控制方式与人机交互界面,从而提高操作者的工作效率[13-15],较少从控制系统分析的角度探讨操作者的输入输出模型.

现有的针对力觉临场感遥操作系统的操作者建模可分为两类:一类是将操作者作为单输入单输出(力输入运动输出)系统对待,另一类是用二端口网络分析法将操作者等效为一个带阻抗的电压源或电流源[16-18].这两类操作者模型在用于分析整个系统的稳定性中都各有长处,但前者未考虑运动反馈,后者未能充分体现出操作者的复杂性和适应性[19].

本文的研究目的就是对操作者在力觉临场感遥操作系统中的感知、决策与动作的特性进行分析,从而建立一种反映操作者输入输出特性的控制模型,为力觉临场感遥操作机器人系统的分析提供基础.

1　操作者建模的原则

基于传递函数形式的双端口网络模型仍然是力觉临场感遥操作机器人系统设计与分析的最佳手段,它不仅物理概念清晰,各组成单

元之间关系明确,而且可直接应用无源理论进行稳定性分析,特别适合非线性、时变的复杂条件[20],因此,笔者认为在力觉临场感遥操作机器人的理论分析和设计中,应遵循到以下原则:

1) 力觉临场感系统的设计中应采用面向操作者的设计思想,即在操作过程中让机器人去适应于人的感知和操作行为,而不是让人去适应于机器人的行为;

2) 操作者作为遥操作系统网络模型的重要一环应建立其更为合理的输入输出特性模型;

3) 操作者输入输出特性的建模应能反映操作者的非线性和适应性,并具有易于分析的二端口网络传递函数的形式.

2 操作者在临场感遥操作系统中的感知与决策过程

力觉临场感系统中,操作者是人—机器人—环境回路中重要的一环,操作者在整个系统中起着感知和决策的作用,其地位相当于主从计算机系统中主 CPU 的作用. 假定机器人传感器对环境与机器人的感知为低层感知,则操作者对机器人和环境的感知应为高层感知.

力觉临场感遥操作机器人技术在实际应用中,常常不是独立地发挥作用. 力觉临场感作为临场感的主要形式之一,往往同视觉临场感、听觉临场感,以及增强传感子系统等组成一个完整的临场感系统或集成虚拟工作环境. 所谓增强传感子系统主要针对下面两类传感信号而言:一类是对人体有害的信号,如高温、高压、过大的冲击力等;另一类是不被人体感官所感知的信号,如红外、辐射、电磁场、超声波等. 这两类信号经传感器检测后,送入增强传感子系统中,均转变为对操作者无害且易于感知的视、听、触觉信号作用于人体器官,或以直方图、多种颜色等方式显示在计算机显示屏上.

完美的临场感遥操作方式下,操作者工作在一个由计算机、头盔显示器、外骨架力反馈装置(或力反馈手控器)、数据手套以及各种多媒体硬件支撑的一个关于远地工作现场环境再现的高保真,具有视、听、触觉感受的虚拟工作环境中,如图 1 所示. 在力觉临场感遥操作方式下,尽管操作者主要接受的是力觉、触觉和局部运动觉信息的刺激,但他仍然需要其他感觉的刺激. 如果没有其他感觉的刺激,则操作者单凭力觉临场感很难形成关于现场环境的整体映象,特别是对于未知的或变化着的环境.

过分地追求各种临场感方式也许是难以实观的或耗资巨大的,但是在力觉临场感方式下,作为其主要辅助信息源之一的视觉临场感或现场的计算机辅助视觉显示方式是必不可少的,否则操作者得不到机器人全面的运动反馈信息,并且难以形成机器人工作现场环境的整体印象,如环境动力学以及环境的结构和组成等,那么操作者的决策效率和系统的运行效率就体现不出优越性来,甚至是低下的.

本文针对力觉临场感的分析,都是基于这样的前提条件:操作者是在有视觉显示辅助下完成操作任务的(以下不再赘述).

因此,在力觉临场感遥操作机器人系统中,操作者是一个基于多种感觉信号刺激(反馈输入),并根据给定任务(系统输入)作出响应(输出)的重要环节,如图 2 所示.

3 操作者的输入输出模型

3.1 临场感遥操作机器人系统中操作者的工作方式

力觉临场感系统一般采用主从式机械手作为

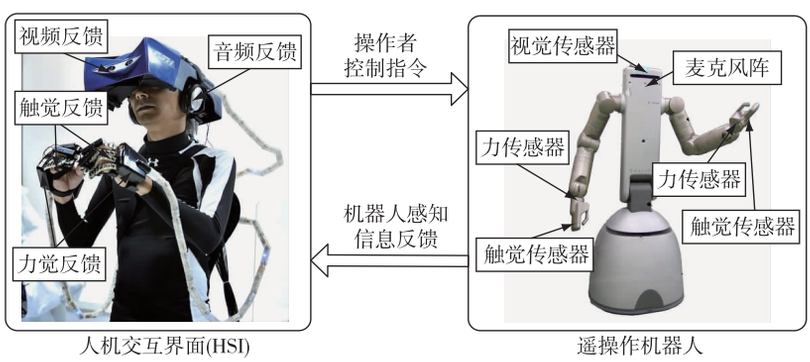


图 1 典型的临场感遥操作机器人系统

Fig. 1 A typical force telepresence telerobot system

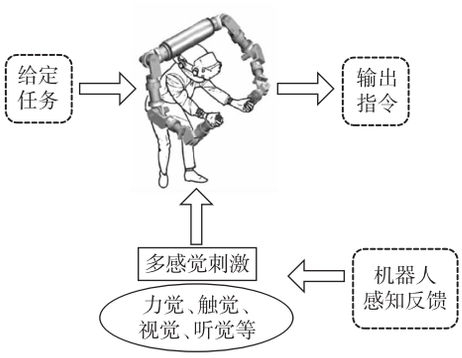


图2　操作者的输入输出关系

Fig. 2　The input-output relationship of the human operator

人—机器人和机器人—环境进行力交互的媒体. 理想情况下,从机械手跟踪主机械手位置(即人手位置)而运动,当从机械手和环境有力的接触时,从机械手上的力传感器将接触力信号实时检测并反馈到主机械手端以力的方式作用于人手. 在力觉临场感系统中,操作者的操作行为包括对力和位置信息的感知、判断和决策,并以神经电信号的方式从大脑沿神经通路传到神经肌肉,最后通过神经肌肉的伸缩反应产生控制力输出,整个过程如图3所示.

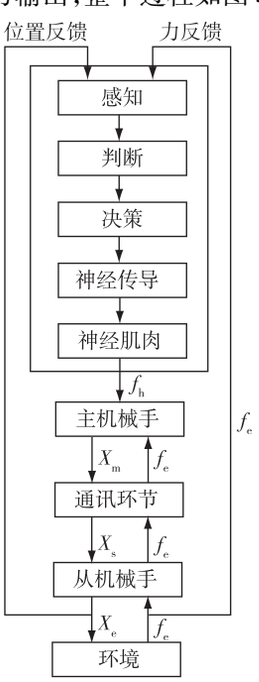


图3　力觉临场感系统中操作者的感知、控制过程

Fig. 3　The process of human operator's perception and control in the force telepresence telerobot system

图3中f_h、f_e分别表示操作者对主机械手的作用力和环境对从机械手的作用力,X_m、X_s、X_e分别表示主机械手、从机械手和环境的位移.

操作者的模型是对操作者操作行为的数学描述,操作者本身是一个非常复杂的大系统,他的操作行为具有很强的随机性、自适应性、非线性和时变性,因此要用数学模型来精确地描述操作者的操作行为是非常困难的. 实际上在力觉临场感遥操作机器人系统的研究中,最关心的是操作者环节要能反映操作者输入输出行为特征的一般规律.

在对机器人进行远程遥操作过程中,操作者会接受多种感觉的反馈刺激,所有这些感觉反馈需要给予操作者最基本的两类感知信息即运动感知和力触觉感知,所以在力触觉遥操作系统中,操作者的输入信息有三类:任务信息、位置反馈信息和力反馈信息. 操作者的直接输出虽然是以力的方式作用于主机械手,但是他的输出可以是力输出,也可以是以力为中间媒介而输出手部的运动位置信息.

对于任何复杂的遥操作任务,都可以分解成2种不同的操作方式:

1) 自由运动方式,即操作者操纵从机械手到达目标位置而不和环境发生力接触,此时操作者的输出为运动位置信息;

2) 力约束方式,即从机械手同环境接触而运动受阻,操作者控制从机械手对环境施加一定大小的力,此时操作者的输出为力信息.

2种不同的操作方式如图4所示,其中f_d、x_d分别表示期望力和期望位置.

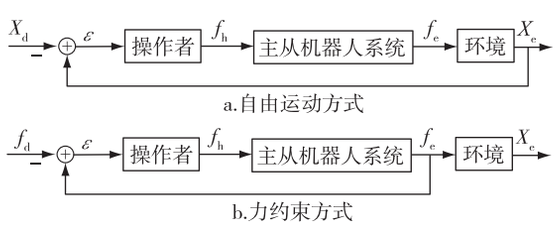


图4　操作者的遥操作方式

Fig. 4　The operation forms for the human operator

通过上述分析,可以认为操作者模型应体现操作者2种不同的任务操作方式以及下面3种功能.

1) 信息感知功能:操作者通过与主机械手的交互而感知到从机械手与环境的力和运动交互情况,同时,通过计算机辅助视听觉显示对该信息加以补充.

2) 信息的处理和决策功能:操作者对感觉到的信息进行分析处理,并作出控制决策.

3) 执行功能:操作者对当前的控制决策通过手

臂肌肉的动作对系统输出力控制信息,或以力为媒介对系统输出位置控制信息.

3.2 几种操作者模型的简介及特点

早在力觉临场感遥操作机器人技术出现之前,对飞机驾驶、火炮操纵等研究就出现了研究操作者模型方面的文献[21-22],到目前为止,可用于临场感遥操作机器人系统理论分析的操作者模型有4种.

1) 传递函数模型

操作者的传递函数模型是以经典控制理论为基础的结构模型,操作者环节用准线性传递函数 $G_p(s)$ 和白噪声 $n(t)$ 来表示,如图5所示.

$$G_p(s) = K_p e^{-\tau s}\frac{T_L s+1}{T_1 s+1}\left[\frac{\omega_N^2}{(T_N s+1)(s^2+2\xi_N\omega_N s+\omega_N^2)}\right], \quad (1)$$

式(1)中方括号内的因子是用来描述神经肌肉的动态特性的,$K_p(T_L s+1)/(T_1 s+1)$ 是模型的自适应部分,$e^{-\tau s}$ 代表神经传导的时间延迟. T_N 为神经肌肉响应过程,即手部动作的迟后时间常数,T_N 一般为 0.08 ~ 0.16 s,$\dfrac{\omega_N^2}{s^2+2\xi_N\omega_N s+\omega_N^2}$ 表示手部的动力学行为,是一个典型的二阶系统,ω_N 为手部的固有频率,ξ_N 为手部的阻尼. K_p 为静态增益,是操作者实现最优操作时所要调整的参数之一,T_L 为操作者决策过程的超前补偿时间常数,其值反映了操作者精神负荷的大小,T_1 为操作者决策过程的迟后时间常数,其值反映了操作者体力负荷的大小.

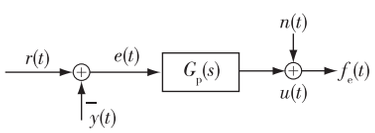


图5 操作者的传递函数模型

Fig. 5 A transfer function model of the human operator

此模型反映了基于运动反馈的单输入单输出的操作者行为,且这种运动反馈信息一般由视觉提供,它适用于视觉临场感系统中操作者的建模.

2) 最优控制模型

操作者的最优控制模型(Optimum Control Model)以现代控制理论为基础,将操作者看成是人机闭环回路中一个最优控制器,在各种输入和干扰作用下,使某种形式的二次型性能指标最小. 该模型由两部分组成:表示人的生理限制部分以及表示人的自适应能力部分,如图6所示.

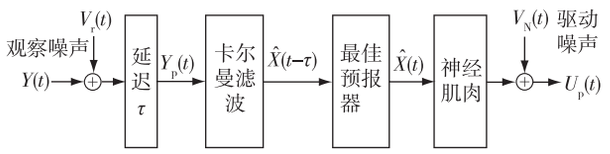


图6 操作者的最优控制模型

Fig. 6 The optimal control model of the human operator

在考虑到操作者生理限制的情况下,其观测到的状态变量为经过延时 τ 且被噪声干扰过的信号:

$$\boldsymbol{Y}_P(t) = \boldsymbol{Y}(t-\tau) + \boldsymbol{V}_r(t-\tau) = \boldsymbol{C}_p\boldsymbol{X}(t-\tau) + \boldsymbol{V}_r(t-\tau). \quad (2)$$

图6中,$\boldsymbol{V}_r(t)$、$\boldsymbol{V}_N(t)$ 均为零均值白噪声,被控系统输出 $\boldsymbol{Y}(t) = \boldsymbol{C}_p\boldsymbol{X}(t)$.

操作者观测到的被控对象状态 $\boldsymbol{Y}_p(t)$ 经卡尔曼滤波,得到最佳延时估计值 $\widehat{\boldsymbol{X}}(t-\tau)$,再经过最佳预报器得到当前时刻的最佳预报值 $\hat{\boldsymbol{X}}(t)$,操作者根据 $\hat{\boldsymbol{X}}(t)$ 以最优的方法确定其控制输出 $\boldsymbol{U}_p(t)$,操作者选择其控制输出 $\boldsymbol{U}_p(t)$ 应使下面的二次型目标函数 $\boldsymbol{J}_p$ 取最小值:

$$\boldsymbol{J}_p = \boldsymbol{E}\left\{\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T(\boldsymbol{Y}^T\boldsymbol{Q}\boldsymbol{Y} + \boldsymbol{U}_p^T\boldsymbol{G}\boldsymbol{U}_p + \boldsymbol{U}_p^T\boldsymbol{R}\boldsymbol{U}_p)\,dt\right\}. \quad (3)$$

式(3)中 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{R}$ 分别是被控系统如机器人的观测矩阵、控制矩阵和调节矩阵. 当任务与被控系统确定时,$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{R}$ 是常量矩阵.

操作者的最优控制模型是一种多输入多输出模型,它描述的是经过良好训练并对任务和环境有了很好了解的操作者,且其参数难以确定,计算困难,因此只有数学描述上的意义,实际上不能用于力觉临场感遥操作系统的分析.

3) 模糊控制模型

操作者的模糊控制模型是以模糊控制理论为基础,其基本思想是用模糊变量来描述操作者的思维过程.

操作者作业过程中,人脑思维的许多概念是模糊的,如误差信号的大、中、小,将操作者对误差信号、误差信号变化率的判断和经过推理而作出的对控制量的决断,用3个模糊变量 E、R、C 来表示. 假定人在控制中所用模糊概念有正大、正中、正小、零、负小、负中、负大,将其量化分别表示为 3、2、1、0、−1、−2、−3,则操作者对 E、R 的判断和推理后作出的对 C 的推理过程可用表1来描述.

操作者模型中除了模糊推理环节外,还应包括感知延迟环节 $e^{-\tau s}$ 和神经肌肉滞后环节 $1/(T_1 s+1)$.

表 1　模糊控制模型

Table 1　Fuzzy control model

E	R						
	−3	−2	−1	0	1	2	3
−3	3	2	2	1	1	0	−1
−2	3	2	1	1	0	0	−1
−1	2	2	1	1	0	0	−1
0	2	1	1	0	−1	−1	−2
1	1	1	0	0	−1	−2	−2
2	1	0	0	−1	−1	−2	−3
3	1	0	−1	−1	−2	−2	−3

模糊模型适用于单输入单输出的操作者模型描述,且操作任务简单、多位置跟踪或误差修正之类的任务.

4) 等效电压源模型

操作者的等效电压源模型如图 7 所示,将操作者等效为一个具有恒定内阻的电压源或电流源,这种模型具有简单实用的特点. 目前在力觉临场感遥操作机器人的理论分析中,大多数的操作者模型采用这种等效电压源模型,但这种过于简化的模型在深入分析系统的稳定性时显得无能为力.

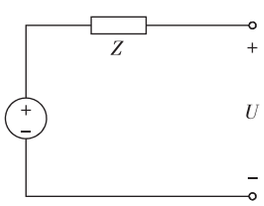


图 7　操作者的等效电压源模型

Fig. 7　The equivalent voltage source model of the human operator

3.3　力觉临场感系统中一种新的操作者输入输出模型

前面介绍的 4 种操作者模型对应于不同的应用领域各有优势,然而却都不能全面地反映力觉临场感遥操作系统中操作者的行为,笔者认为:在力觉临场感系统中,操作者接收多种感觉刺激,不管这种刺激多么丰富,它们提供的信息反馈可以归纳为两种,一是力反馈信息,二是位置反馈信息.

操作者根据多感觉刺激提供的力和位置反馈信息而感知环境作出决策的过程是复杂的,其神经机理在许多方面尚不清楚,但是根据操作者决策的结果,可将这一决策过程分为两种模式:力决策模式和位置决策模式. 为分析方便,本文建立操作者的分层动力学模型,即决策层、融合层、传导层和手臂,如图 8 所示. 各层的动力学方程如下.

1) 决策层

力决策模式:该模式对应于完全受限方式,即人脑根据环境中工作对象(object)的情况,将任务(task)转变为一定的期望力输出,此时期望位置等于人手当前位置.

$$\begin{cases} F_{\mathrm{d}} = F_{\mathrm{unc}}(\mathrm{task},\mathrm{object}), \\ X_{\mathrm{d}} = X_{\mathrm{m}}, \end{cases} \tag{4}$$

其中,F_{d} 为期望力,X_{d} 为期望位置,X_{m} 为人手位置.

位置决策模式:该模式对应于自由运动方式,即人脑根据环境中工作对象(object)的情况,将任务(task)转变为一定的期望位置输出,此时期望力等于人手当前受力.

$$\begin{cases} F_{\mathrm{d}} = F_{\mathrm{unc}}(\mathrm{task},\mathrm{object}), \\ X_{\mathrm{d}} = F_{\mathrm{m}}. \end{cases} \tag{5}$$

2) 融合层

$$F_{\mathrm{s}}(s) = \frac{T_{\mathrm{PL}}s+1}{T_{\mathrm{P}}s+1}k_{\mathrm{P}}e_{\mathrm{P}}(s) + \frac{T_{\mathrm{FL}}s+1}{T_{\mathrm{F}}s+1}k_{\mathrm{f}}e_{\mathrm{f}}(s), \tag{6}$$

$$e_{\mathrm{P}}(s) = X_{\mathrm{d}}(s) - X_{\mathrm{m}}(s) + r_{\mathrm{p}}(n), \tag{7}$$

$$e_{\mathrm{f}}(s) = F_{\mathrm{d}}(s) - F_{\mathrm{m}}(s) + r_{\mathrm{f}}(n). \tag{8}$$

k_{p}、k_{f} 分别为位置和力的零频增益,T_{PL}、T_{P} 反映了操作者位置决策过程中的预测和滞后因素,T_{FL}、T_{F} 反映了操作者在力决策过程中的预测和滞后因素. $r_{\mathrm{p}}(n)$、$r_{\mathrm{f}}(n)$ 分别为主,从机械手位置和力误差引入的白噪声,以下分析中可忽略不计.

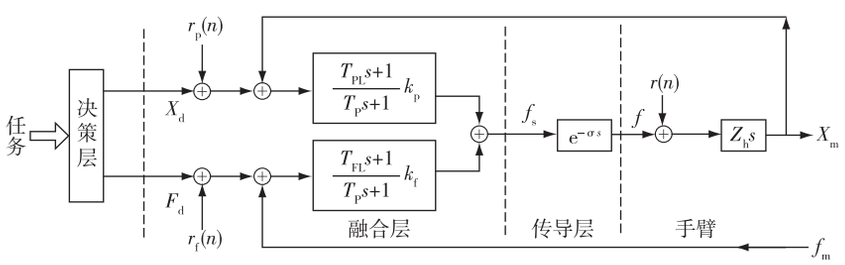


图 8　操作者的分层动力学结构模型

Fig. 8　The hierarchical dynamical structure of human operator model

3)传导层

$$F(s) = F_s(s)e^{-\sigma s}, \tag{9}$$

其中,σ 为传输神经的纯时延.

4) 手臂

$$F(s) + r(n) = (m_h s + b_h + k_h/s)\cdot s\cdot X_m(s) \overset{\text{def}}{=} Z_h\cdot s\cdot X_m(s), \tag{10}$$

其中,$r(n)$ 为由肌肉疲劳引起的白噪声,可忽略不计,m_h,b_h,k_h 分别为人手的惯性质量、阻尼和弹性系数.

令

$$G_P(s) = \frac{T_{PL}s+1}{T_P s+1}K_P e^{-\sigma s}, G_f(s) = \frac{T_{PL}s+1}{T_F s+1}K_f e^{-\sigma s},$$

整理可得:

$$G_P(s)(X_d(s) - X_m(s) + G_f(s)(F_d(s) - F_m(s))) = Z_h\cdot s\cdot X_m(s). \tag{11}$$

根据神经生理学的研究成果[23],可以知道操作者在感知、决策、控制过程中,其响应时间分布如下:感受器将刺激转化为神经冲动 1 ~ 38 ms,神经传导过程 2 ~ 100 ms,中枢神经决策过程 70 ~ 300 ms,传出神经将指令传导到神经肌肉 10 ~ 20 ms.

由于力觉临场感遥操作系统的工作频率受到执行机构工作带宽的影响,一般工作在低频区域,因此操作者的模型可简化为

$$G_P(s) = (T_{PL}s+1)k_P, \tag{12}$$

$$G_f(s) = k_f = 1, \tag{13}$$

$$(T_{PL}s+1)k_P[X_d(s) - X_m(s)] + [F_d(s) - F_m(s)] = Z_h\cdot s\cdot X_m(s). \tag{14}$$

4 操作者的等效二端口网络模型

为了分析方便,本文将决策层的输出作为整个人—机器人—环境系统的输入,这样就避免了人决策过程中许多未知和复杂因素带来的分析困难. 对于决策层的输出,我们仅仅要求它们满足下列条件:

$$\int_0^{T_d} X_d^2(t)\,dt < \infty, \tag{15}$$

$$\int_0^{T_d} f_d^2(t)\,dt < \infty, \tag{16}$$

$$\int_0^{T_d} X_d(t) f_d(t)\,dt < \infty, \tag{17}$$

其中,T_d 为任务执行时间长度.

该条件的物理直观为:在给定任务执行过程中,决策层向系统输入的能量应是有限的.

对于力决策模式:

$$\begin{cases} F_m(s) = F_d(s) - Z_h\cdot s\cdot X_m(s), \\ X_d(s) = X_m(s), \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{bmatrix} X_d(s) \\ F_m(s) \end{bmatrix} = [H_f]\begin{bmatrix} F_d(s) \\ X_m(s) \end{bmatrix}, \tag{19}$$

$$[H_f] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -Z_n\cdot s \end{bmatrix}, \tag{20}$$

此时操作者可以用图 9a 的二端口网络表示:

对于位置决策模式

$$\begin{cases} X_m(s) = \dfrac{(T_{PL}s+1)k_P}{(Z_n + k_P T_{PL})s + k_P} X_d(s), \\ F_d(s) = F_m(s), \end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{bmatrix} F_d(s) \\ X_m(s) \end{bmatrix} = [H_P]\begin{bmatrix} X_d(s) \\ F_m(s) \end{bmatrix}, \tag{22}$$

$$[H_P] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \dfrac{(T_{PL}s+1)k_p}{(Z_h + k_p T_{PL})s + k_p} & 0 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

此时操作者可用图 9b 的二端口网络表示.

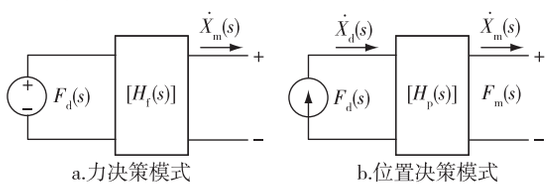


图 9 操作者的等效二端口网络模型

Fig. 9 The equivalent two-port networks of human operator model

5 操作者模型参数的确定

5.1 确定操作者模型参数的方法

首先确定人手臂的机械阻抗,让操作者工作在力决策方式,且 $F_d(s) = 0$,即操作者握住主机械手处于放松状态,此时,控制主机械手的电机使主机械手对人手施加一冲击力,则由式(14) 经变换后,可获得人手的阻抗参数.

$$Z_h = -\frac{F_m(s)}{sX_m(s)}. \tag{24}$$

其次确定 T_{PL} 和 k_p,让操作者工作在位置决策方式,操作者输入一阶跃函数,则由式(14) 经变换后,可获得操作者的 T_{PL} 和 k_p.

$$\frac{(T_{PL}s+1)k_p}{(Z_h + k_p T_{PL})s + k_p} = \frac{X_m(s)}{X_d(s)}. \tag{25}$$

试验结果如图 10 所示. 对应于人手臂的不同松驰状态,手臂的机械阻抗是不同的,随着手臂的紧张程度加强,手臂机械阻抗随之增大,这主要体现在手

臂惯性质量和刚度(弹性系数的倒数)的变化上,而人手阻尼的变化较小. 在完全放松状态,刚度几乎为零,惯性质量一般在 1 ~4 kg 之间,随着手臂紧张程度加强,人手臂的刚度迅速增大,最大可达 2 kg/cm 左右. 手臂的机械阻抗可随操作者的意愿而调节.

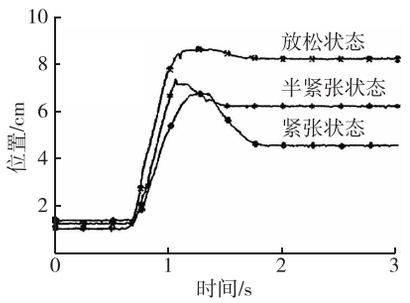


图 10 操作者手臂的冲击力响应

Fig. 10 The impact force response of the human operator's arm

5.2 基于最小二乘法的操作者手臂机械阻抗参数辨识方法

由于操作者手臂的机械阻抗参数是操作者输入输出模型中的最重要参数,因此准确辨识操作者手臂的机械阻抗参数是建立操作者模型的重要内容.

为了分析方便,本文将操作者手臂的频域阻抗模型 $Z_{\mathrm{h}}(s)$ 用时变的质量-弹簧-阻尼模型来描述,假设 $\hat{f}_{\mathrm{h}}$ 为人手输出的作用力,$\hat{m}_{\mathrm{h}}$、$\hat{b}_{\mathrm{h}}$、$\hat{k}_{\mathrm{h}}$ 分别为手臂的质量、阻尼、刚度相应的估计值,则有

$$\hat{f}_{\mathrm{h}} = \hat{m}_{\mathrm{h}}\ddot{x}_{\mathrm{h}} + \hat{b}_{\mathrm{h}}\dot{x}_{\mathrm{h}} + \hat{k}_{\mathrm{h}}x_{\mathrm{h}}, \tag{26}$$

根据最小二乘法

$$E = \sum_{i=1}^{N}[f_{\mathrm{h}}(i) - \hat{f}_{\mathrm{h}}(i)]^2, \tag{27}$$

有

$$\frac{\partial E}{\partial \hat{m}_{\mathrm{h}}} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \hat{b}_{\mathrm{h}}} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \hat{k}_{\mathrm{h}}} = 0. \tag{28}$$

为对手臂的阻抗参数有效地进行在线估计,根据自适应窗口滑动最小二乘法(SLMS-AW)[24]:

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_{\mathrm{h}}(t) \\ \hat{b}_{\mathrm{h}}(t) \\ \hat{k}_{\mathrm{h}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=t-N+1}^{t}\ddot{x}_{\mathrm{h}}^2(i) & \sum_{i=t-N+1}^{t}\ddot{x}_{\mathrm{h}}(i)\dot{x}_{\mathrm{h}}(i) & \sum_{i=t-N+1}^{t}\ddot{x}_{\mathrm{h}}(i)x_{\mathrm{h}}(i) \\ \sum_{i=t-N+1}^{t}\dot{x}_{\mathrm{h}}(i)\ddot{x}_{\mathrm{h}}(i) & \sum_{i=t-N+1}^{t}\dot{x}_{\mathrm{h}}^2(i) & \sum_{i=t-N+1}^{t}\dot{x}_{\mathrm{h}}(i)x_{\mathrm{h}}(i) \\ \sum_{i=t-N+1}^{t}x_{\mathrm{h}}(i)\ddot{x}_{\mathrm{h}}(i) & \sum_{i=t-N+1}^{t}x_{\mathrm{h}}(i)\dot{x}_{\mathrm{h}}(i) & \sum_{i=t-N+1}^{t}x_{\mathrm{h}}^2(i) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=t-N+1}^{t}\ddot{x}_{\mathrm{h}}(i)f_{\mathrm{h}}(i) \\ \sum_{i=t-N+1}^{t}\dot{x}_{\mathrm{h}}(i)f_{\mathrm{h}}(i) \\ \sum_{i=t-N+1}^{t}x_{\mathrm{h}}(i)f_{\mathrm{h}}(i) \end{bmatrix}, \tag{29}$$

$$[\hat{Z}_{\mathrm{h}}(t)] = [A(t)]^{-1}[C(t)], \quad t \geqslant N, \tag{30}$$

其中,N 为采样点数,$[A(t)]$,$[C(t)]$ 可分别用下面 2 个式子进行计算:

$$\begin{aligned} a_{i,j}(t+1) &= \sum_{k=t-N+2}^{t+1}x_{\mathrm{h}}^{(3-i)}(k)x_{\mathrm{h}}^{(3-j)}(k) = \\ &a_{i,j}(t) + x_{\mathrm{h}}^{(3-i)}(t+1)x_{\mathrm{h}}^{(3-j)}(t+1) - \\ &x_{\mathrm{h}}^{(3-i)}(t-N+1)x_{\mathrm{h}}^{(3-j)}(t-N+1), \\ &i = 1,2,3, \quad j = 1,2,3, \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} c_i(t+1) &= \sum_{k=t-N+2}^{t+1}x_{\mathrm{h}}^{(3-i)}(k)f_{\mathrm{e}}(k) = \\ &c_i(t) + x_{\mathrm{h}}^{(3-i)}(t+1)f_{\mathrm{e}}(t+1) - \\ &x_{\mathrm{h}}^{(3-i)}(t-N+1)f_{\mathrm{e}}(t-N+1), \\ &i = 1,2,3. \end{aligned} \tag{32}$$

窗口参数 N 根据 f_{h} 和 $\ddot{x}_{\mathrm{h}}$ 的变化量自适应调整:

$$N = f(\Delta\ddot{x}_{\mathrm{h}}, \Delta f_{\mathrm{h}}), \quad N \in [N_{\min}, N_{\max}], \tag{33}$$

式(33) 中 $N_{\min}$、$N_{\max}$ 分别为 N 变化上限和下限.

由式(29)经变换后,可获得人手臂的机械阻抗参数:质量、阻尼和刚度.

对手臂机械阻抗辨识的仿真计算结果如图 11 所示. 仿真中假设手臂阻抗参数按文献[25-26]实验结果变化,用实线表示,虚线所示为根据辨识算法得到的手臂估计阻抗变化曲线. 从图 11 中辨识结果能够看出,采用自适应窗口滑动最小二乘辨识算法能够较准确地对手臂阻抗参数进行在线辨识,且实时性好.

同时本文在 WAM 机器人平台上构建了人手阻抗参数识别系统进行了实验研究,关于实验平台的具体介绍参见文献[24,27]. 实验中要求操作者在 10 ~12 s 段施加作用力,实验结果如图 12 所示. 从图 12 中可以看出,在施加作用力段手臂的机械阻抗参数发生明显变化,刚度和阻尼增加,质量有所减少. 手臂的机械阻抗可随操作者的意愿而调节,这表明操作者是一个非线性,具有自适应能力的复杂系统,在控制过程中,具有很强的鲁棒性.

6 小结

本文分析了力觉临场感遥操作机器人系统中操

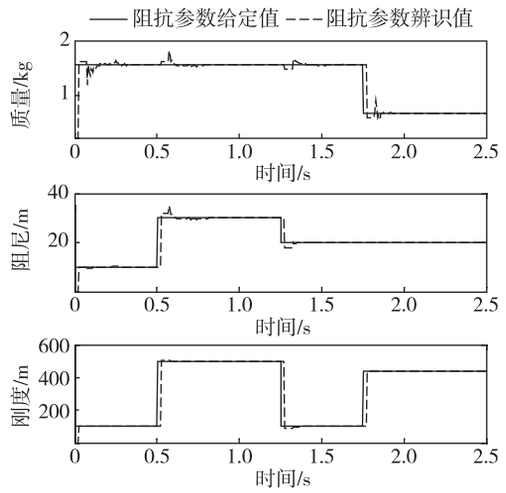


图 11　手臂阻抗参数辨识仿真实验

Fig. 11　The simulation results of impedance parameter identification of the human operator's arm

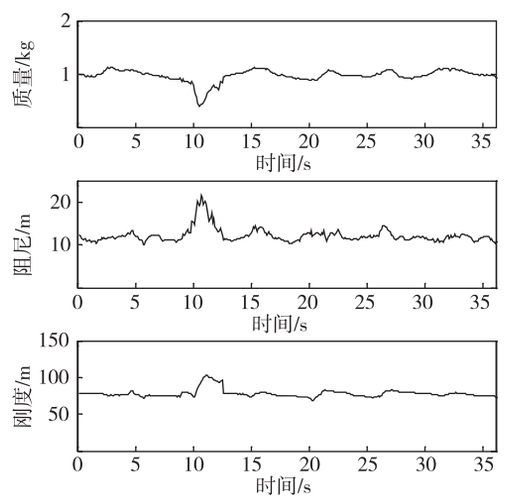


图 12　操作者手臂的机械阻抗变化

Fig. 12　The changes of impedance parameters of the human operator's arm

作者的工作方式,提出了力觉临场感遥操作系统中操作者的模型是一种多输入单输出的非线性模型,这种非线性反映了操作者的自适应能力和鲁棒性,这主要体现在:1)操作者能够根据任务和工作对象情况,选择两种不同的决策方式;2)操作者能够在一定的范围内调节自己的手臂机械阻抗.

本文建立了操作者分层结构的多输入单输出动力学模型,并给出了等效的二端口网络,使得两种不同决策方式下的动力学模型具有相同的电路形式,简化了分析. 对操作者手臂的阻抗进行了实验研究,表明手臂阻抗的变化反映了操作者的非线性、自适应性和鲁棒性,这为整个系统的稳定性分析及系统的设计提供了基础.

参考文献

References

[1] 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 and Technology:Natural Science Edition,2013,5(1):1-19

[2] 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

[3] Kazerooni H. Human machine interaction via the transfer of power and information signal [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation,1993:239-243

[4] Kosuge K, Fukuda T. Mechanical system control with man-machine-environment interactions[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation,1993:239-243

[5] Hirata Y,Komatsuda S,Kosuge K. Fall prevention control of passive intelligent walker based on human model [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,2008:1222-1228

[6] Palazzolo J J,Ferraro M,Krebs H I,et al. Stochastic estimation of arm mechanical impedance during robotic stroke rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 12(1): 94-103

[7] Choi S,Tan H Z. Perceived instability of virtual haptic texture:I. Experimental studies[J]. Presence-Teleoperators And Virtual Environments. 2004,13(4):395-415

[8] Tan H Z,Yang S,Pizlo Z,P. Manual detection of spatial and temporal torque variation through a rotary switch [J]. IEEE Transactions on Haptics,2008,1(2):96-107

[9] Liu Jia, Song Aiguo, Discrimination and memory experiments on haptic perception of softness[J]. Perceptual and Motor Skills,2008,106(1):295-306

[10] 刘佳,宋爱国. 人手柔性触觉感知特性[J]. 东南大学学报:自然科学版,2007,37(5):844-848
LIU Jia, SONG Aiguo. Characteristics of human fingers' softness haptic perception[J]. Journal of Southeast University:Natural Science Edition,2007,37(5):844-848

[11] 刘佳,宋爱国,人手指柔性触觉感知的记忆特性[J]. 生理学报,2007,59(3):387-392
LIU Jia, SONG Aiguo. Remembrance characteristic of softness haptic perception in human fingertips[J]. Acta Physiologica Sinica,2007,59(3):387-392

[12] 陈辉,宋爱国,黄惟一. 人手抓取特性与机械手神经网络抓取策略[J]. 东南大学学报:自然科学版,1999,29(2):18-22

CHEN Hui, SONG Aiguo, HUANG Weiyi. Human grasp property and robot hand grasp tactics about neural networks[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 1999, 29(2): 18-22

[13] Innocenti Mario, Balluchi Andrea, Balestrino Aldo. New results on human operator modelling during nonlinear behavior in the control loop[C]//Proceedings of American Control Conference, 1997: 2567-2570

[14] Penin L, Caballero A, Aracil R, et al. Human behavior modeling in master-slave teleoperation with kinesthetic feedback[C]//Poceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998: 2244-224

[15] Matthew L Bolton, Ellen J Bass. Enhanced operator function model: A generic human task behavior modeling language[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2009: 2904-2911

[16] Sukhan Lee, Hahksung Lee. Modeling design and evaluation of advanced teleoperator control systems with short time delay[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 607-623

[17] Daniela Feth, Angelika Peer, Martin Buss. Incorporating human haptic interaction models into teleoperation systems[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: 4257-4262

[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 noval force display structure for haptic telepresence system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1998, 19(2): 177-180

[19] Hirche Sandra, Buss Martin. Human-oriented control for haptic teleoperation[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(3): 623-647

[20] Keyvan H Z. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators[J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(6): 419-445

[21] 赵江洪. 人机工程学[M]. 北京:高等教育出版社,2006
ZHAO Jianghong. Ergonomics[M]. Beijing: Higher education Press, 2006

[22] 龙升照,人—机—环境系统工程研究进展[M]. 北京:科学技术出版社,1993 年
LONG Shengzhao, Man-machine-environmental system engineering research progress[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1993

[23] 浅居喜代治(日). 现代人机工程学概论[M]. 刘高送,译. 北京:科学出版社,1992
ASAI Kiyoji. Introduction to modern machine engineering [M]. Beijing: Science Press, 1992

[24] SONG Aiguo, PAN Lizheng, XU Guozheng, et al. Impedance identification and adaptive control of rehabilitation robot for upper limb passive training[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, 2012

[25] Norit S T, Tanaka T. Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechtronics, 1997, 2(4): 259-267

[26] Lin, C C, Ju M S, Lin C W, et al. The pendulum test for evaluating spasticity of the elbow joint[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2003, 84: 69-74

[27] XU Guozheng, SONG Aiguo, LI Huijun. Control system design for an upper-limb rehabilitation robot[J]. Adv Robotics, 2011, 25(1): 229-251

Force Telepresence Telerobot(2): Modeling of the human operator input-output property

SONG Aiguo[1] KE Xin[1] PAN Lizheng[1]

1 School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract The force telepresence telerobot system is a typical human-robot-interaction system with human-in-loop. The human operator as an important unit for the whole teleoperation system is the top control component to perform task of the robot control. The human operator will make a decision and manipulate a telerobot to execute tasks after receives the force feedback, haptic feedback, visual feedback and movement informatio from the sensors installed on the robot. As the human operator is a complex system of multi-input-and-single-output with nonlinear and time varying properties, an appropriate control model needs to be built. This paper analyzes the human operators'characters of perception, decision and movement, then propoeses a control model of human operator and gives an equivalent form of two-port networks, which provides a basis for the force telepresence telerobot system analyzing.

Key words force telepresence; teleoperation; human operator; perception; decision; control; modelling