

一种新的力反射遥控机器人系统的信号传输方法^{†*}

宋爱国 金世俊 黄惟一

(东南大学仪器科学与工程系 南京 210018)

摘要 提出了一种新的基于有源阻抗匹配的信号传输方法, 这种方法能够保证整个力反射遥控机器人系统在时延下的无源稳定性和良好的透明性. 分析可知原有的两种无源信号传输方法只是这种新方法的两特例. 实验结果表明了该方法的有效性.

关键词 遥控机器人, 临场感, 无源性, 透明性, 信号传输

1 引言

工作在人机交互方式下的遥控机器人是机器人应用与研究的重点之一, 它将人引进机器人的控制回路, 通过多种传感器将远地机器人与环境的交互信息反馈给本地的操作者, 使操作者产生身临其境的感受, 真实地感知机器人的现场环境, 从而有效地控制机器人完成未知或危险环境中的任务. 具有初步临场感效果的机器人近年来在国外已开始应用于太空, 深海等领域^[1]. 力反射是人机交互的主要方式, 是遥控机器人接触性作业的保障, 理想的力反射遥控机器人系统能够使操作人员产生直接接触和操纵环境目标的力感觉.

由于信号传输距离长以及信号传输带宽的限制, 遥控机器人主边和从边的信号传输过程存在着较大的时延, 信号传输时延最显著的影响是造成了遥控机器人的不稳定, 因此人们研究各种控制方案来提高力反射遥控作业系统的稳定性. 文献[2]、[3]认为信号传输时延造成了传输环节的有源性, 这是力反射遥控机器人不稳定的原因, 并分别提出了两种不同的信号无源传输算法来保证整个系统的稳定性. 1993年 Hannaford 等人进一步的研究表明^[4]传输时延同时也造成了系统临场感程度(也称之为透明性)的降低, 而原有的信号无源传输算法未能提高系统的透明性. 如何在信号传输时延情况下, 既保证系统的稳定性, 又能提高系统的透明性, 是力反射遥控机器人应用中急需解决的问题.

本文在已有的工作基础上提出了新的基于有源阻抗匹配的信号传输结构, 这种结构本身是有源的, 然而当它作为遥控机器人的中间环节时, 却能够保证整个系统在时延下的无源稳定性. 本文同时给出了实现此结构的信号传输算法, 对算法参数的设定可以保证遥控机器人在时延下良好的透明性. 分析表明原有的两种无源算法是此算法的两特例. 最后, 对提出的信号传输算法进行了实验验证.

2 透明性条件

力反射遥控机器人一般由操作者、主机械手、信号传输环节、从机械手和环境组成, 如图 1 所示, 图 1 中各量的意义如下:

F_h 为操作者和主机械手的交互力; V_m 为主机械手的速度; F_e 为从机械手和环境的交互

* † 国家高技术 '863- 2- 7' 青年基金、国家自然科学基金(No: 69705006)、机器人传感技术实验室资助项目.

力; V_e 为从机械手的运动速度; V_d 为从机械手的位置指令; F_{dm} 为主机械手的力指令; F_{ds} 为电

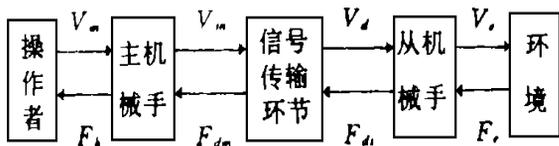


图 1 力反射遥控机器人的组成

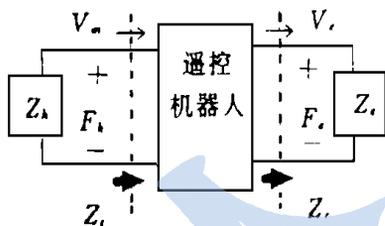


图 2 图 1 的网络组合

机对从机械手的作用力; 设操作者的阻抗为 Z_h , 环境的阻抗为 Z_e , 则图 1 的系统可以表示成图 2 所示的两个单口网络和一个双口网络的组合. 其中主机机械手、信号传输环节和从机械手 3 个子系统表示成一个双口网络. 完美的力觉临场感应使操作者操纵主机机械手时的感觉同直接操纵环境目标的感觉相同, 也就是操作者和主机机械手间的作用力等于从机械手和环境目标的作用力, 同时主机机械手的运动速度等于从机械手的运动速度, 即

$$\begin{cases} F_h(t) = F_e(t) \\ V_m(t) = V_m(t) = V_e(t) \end{cases} \quad (1)$$

定义虚拟阻抗

$$Z_t = F_h / V_m \quad (2)$$

环境阻抗

$$Z_e = F_e / V_e \quad (3)$$

由式(1)不难推知, 完美的力觉临场感应满足

$$Z_t = Z_e \quad (4)$$

当力反射遥控机器人满足上式时, 我们称遥控机器人对操作者来说是完全透明的, 此时操作者具有身临其境的力感受.

对于信号传输环节, 定义其输入阻抗

$$Z_{in} = \frac{F_{dm}}{V_m} \quad (5)$$

定义输出阻抗

$$Z_{out} = \frac{F_{ds}}{V_d} \quad (6)$$

则

$$Z_t = Z_{in} + Z_m \quad (7)$$

$$Z_{out} = Z_c \quad (Z_e + Z_s) \quad (8)$$

其中 Z_m 、 Z_s 分别为主, 从机械手的阻抗, Z_c 为从机械手控制器的阻抗, 表示并联. 由于 $Z_c \gg Z_e + Z_s$, 所以

$$Z_{out} \approx Z_c \quad (9)$$

假定主机机械手的阻抗可作为操作者阻抗的一部分, 从机械手的阻抗可作为环境阻抗的一部分, 则由条件(4)可知传输环节应满足

$$Z_{in} = Z_{out} \quad (10)$$

当信号传输环节满足上式时,我们称遥控机器人具有良好的透明性。

3 系统的无源性分析

定义 1 对于一个 N 端口网络,若任何进入网络的互相独立的 N 对电流 I_i (或速度 V_i) 和电压 U_i (或力 F_i) 满足: $0 < U^T(t)I(t) > 0$, 则称此 N 端口网络是无源的, 其中 $U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$, $I(t) = [i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)]^T$.

文献[5]证明了无源系统满足小增益理论的稳定条件, 因此是稳定的, 而稳定的系统却未必是无源的。

从定义 1 出发不难证明线性时不变的电感(或质量)、电容(或刚度)、电阻(或阻尼)、理想变压器(或减速器)等元件都是无源元件, 它们构成的 N 端口网络都是无源网络(证明过程可参考文献[6])。

引理 1^[2] 若 N 端口网络是无源的, 当且仅当系统散射算子的范数小于等于 1。

我们利用以上定义和引理证明特征阻抗为 1 的无损传输线双口网络是无源双口网络。

证明 对于图 3 所示的无损传输线, 其输入输出关系如下:

$$\begin{cases} U_1(S) = Z_0 \tanh(Sl/v_0) I_1(S) + \operatorname{sech}(Sl/v_0) U_2(S) \\ -I_2(S) = -\operatorname{sech}(Sl/v_0) I_1(S) + \tanh(Sl/v_0) U_2(S)/Z_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中传输线的特征阻抗 $Z_0 = \sqrt{L/C}$, 电磁场传播速度 $v_0 = 1/\sqrt{LC}$, L 是传输线的特征电感, C 是传输线的特征电容, 为传输线的长度。

将 $Z_0 = 1, v_0 = l/T$, 代入式(11)得

$$\begin{cases} U_1(S) = \tanh(ST) I_1(S) + \operatorname{sech}(ST) U_2(S) \\ -I_2(S) = -\operatorname{sech}(ST) I_1(S) + \tanh(ST) U_2(S) \end{cases} \quad (12)$$

将双曲线函数的指数表示形式代入(12)式经整理可得

$$\begin{bmatrix} U_1(S) - I_1(S) \\ U_2(S) + I_2(S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-ST} \\ e^{-ST} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(S) + I_1(S) \\ U_2(S) - I_2(S) \end{bmatrix} \quad (13)$$

此时可知网络的散射矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-ST} \\ e^{-ST} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

散射算子的范数:

$$\|S\| = \sup_{\omega} \lambda^{1/2}(S^*(j\omega)) = \sup_{\omega} \lambda^{1/2} \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right] = 1 \quad (15)$$

由引理 1 可知 $Z_0 = 1$ 的无损传输线是无源的双口网络。[证毕]。

4 一种新的信号传输结构

原有的信号无源传输算法只能保证遥控机器人的稳定性而不能保证透明性, 究其原因在于上述算法过份地强调了信号传输环节的无源性, 而这种无源性往往同系统的透明性相抵触,

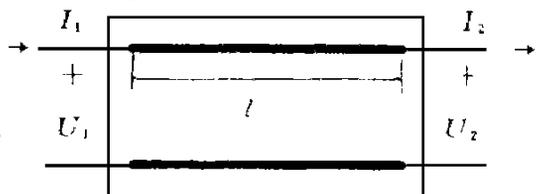


图 3 无损传输线双口网络

为了解决这一矛盾,我们构造了如图 4 所示的基于有源阻抗匹配的一种新的信号传输双口网络结构,它由主边匹配双口电路、主边变压器双口电路、无损耗传输线双口电路、从边变压器双口电路和从边匹配双口电路组成. 图中 $Z_{am}(j\omega) = -Z_{as}(j\omega) = \text{Image}[Z_L(j\omega)]$ 分别为主、从边匹配阻抗, 为从边负载阻抗, 且有

$$Z_{am}(j\omega) = -Z_{as}(j\omega) = \text{Image}[Z_L(j\omega)] \quad (16)$$

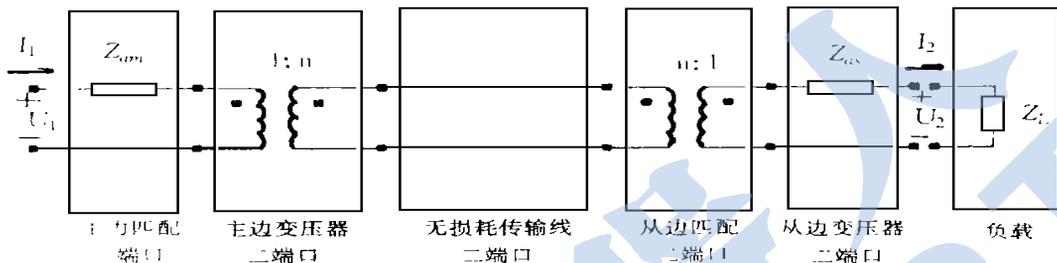


图 4 一种新信号传输结构

式中 Image 表示虚部, 因此 $Z_{am}(S)$ 由非负的电感和电容元件组成, $Z_{as}(S)$ 由负的电感和电容元件组成, 也就是说主边匹配双口网络为无源网络, 而从边匹配双口网络为有源网络. 由上一节的叙述和证明可知主边变压器双口网络、从边变压器双口网络和无损耗传输双口网络为无源网络. 上述 5 个双口网络链联成的整个信号传输双口网络却是有源的, 因为它含有负的电感和电容元件. 然而当此信号传输网络同负载阻抗相联结时, 从边匹配双口电路同负载阻抗共同形成一个单口非负的纯电阻无源电路, 因此整个信号传输网络同负载网络构成的系统是无源的. 上述的分析可知, 图 4 所示的信号传输结构具有如下特点: (1) 这种信号传输双口网络本身是有源的, 因为它含有有源匹配阻抗. (2) 当此信号传输双口网络作为联接遥控机器人主机机械手和从机械手的中间环节时, 能够保证整个遥控机器人系统的无源性. 这种新信号传输结构的输入输出关系经整理可得:

$$\begin{cases} U_1(S) = U_2(S)e^{-ST} + I_1(S)(n^2 + Z_{am}(S)) - I_2(S)(n^2 - Z_{as}(S))e^{-ST} \\ (n^2 + Z_{as}(S))I_2(S) = (n^2 - Z_{am}(S))I_1(S)e^{-ST} - U_1(S)e^{-ST} - U_2(S) \end{cases} \quad (17)$$

令 $Z_a(S) = n^2 + Z_{am}(S) = n^2 + \text{Image}[Z_L(S)] \quad (18)$

则 $Z_a^*(S) = n^2 - Z_{am}(S) = n^2 - \text{Image}[Z_L(S)] \quad (19)$

其中* 表示共轭阻抗, 将(18)、(19)式代入(17)得

$$\begin{cases} U_1(S) = U_2(S)e^{-ST} + Z_a(S)(I_1(S) - I_2(S)e^{-ST}) \\ Z_a^*(S) = Z_a^*(S)I_1(S)e^{-ST} + U_1(S)e^{ST} - U_2(S) \end{cases} \quad (20)$$

5 算法实现及参数选择

(20) 式给出了一种新的信号传输电路的输入输出关系, 然而对于实际的力反射遥控机器人系统而言, 不可能在其主机机械手和从机械手之间联接这样一条理想化的信号传输线路, 只能对原有的信号时延传

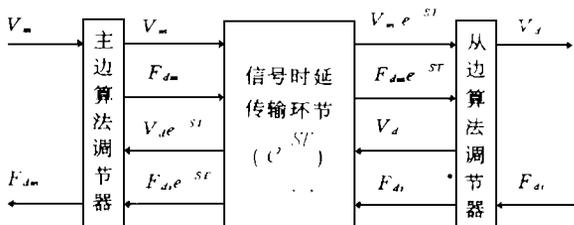


图 5 用信号传输算法实现图 4 的结构

输环节加以改造,使之输入输出关系满足(20)式。

图5为实现图4所示传输结构的信号传输环节,它同原有的信号传输环节相比:(1)增加了两路信号传输通道,即 F_{dm} 信号的正向传输通道和 V_d 信号的反向传输通道。(2)主边和从边分别联接有算法调节器。

将 $U_1 = F_{dm}, U_2 = F_{ds}, I_1 = V_m, I_2 = V_d$ 代入(20)式,可以给出实现图4所示结构的信号传输算法如下:

$$\begin{cases} F_{dm}(S) = F_{ds}(S)e^{-ST} + Z_a(S)[V_m(S) - V_d(S)e^{-ST}] \\ V_d(S) = V_m(S)e^{-ST} + [F_{dm}(S)e^{-ST} - F_{ds}(S)]/Z_a^*(S) \end{cases} \quad (21)$$

(21)式上面的等式为主边信号传输算法,下面的等式为从边信号传输算法。

由(21)式可以算出整个信号传输环节的输入阻抗:

$$Z_{in}(S) = \frac{F_{dm}(S)}{V_m(S)} = \frac{(Z_a^* e^{-ST} + Z_a e^{ST})Z_{out} + Z_a^2(e^{ST} - e^{-ST})}{(e^{ST} - e^{-ST})Z_{out} + (Z_a^* e^{ST} + Z_a e^{-ST})} \quad (22)$$

将透明性条件(10)代入上式,可得到参数的大小:

$$Z_a(S) = Z_{out}(S) = Z_s(S) + Z_e(S) \quad (23)$$

当传输算法中的参数满足上式时,算法(21)可保证系统具有良好的透明性,考虑到遥控机器人大多工作在未知的环境中,事先难以准确估算出环境的阻抗模型参数,因此,具有良好的透明性的力反射遥控机器人系统的信号传输算法如下:

$$\begin{cases} F_{dm}(S) = F_{ds}(S)e^{-ST} + [Z_s(\hat{S}) + Z_e(\hat{S})]^{-1}[V_m(S) - V_d(S)e^{-ST}] \\ V_d(S) = V_m(S)e^{-ST} + [Z_s^*(\hat{S}) + Z_e^*(\hat{S})]^{-1}[F_{dm}(S)e^{-ST} - F_{ds}(S)] \end{cases} \quad (24)$$

算法(24)中 $\hat{\cdot}$ 表示阻抗参数的估计值。如果从机械手和环境的阻抗可准确知道,则信号传输算法(24)可简化为如下形式:

$$\begin{cases} F_{dm}(S) = [Z_s(S) + Z_e(S)]V_m(S) \\ V_d(S) = V_m(S)e^{-ST} \end{cases} \quad (25)$$

(25)式表明,在 Z_s 和 Z_e 可准确知道的条件下,操作者只需控制从机械手和环境的模型相互作用,就可实现对远地真实的机械手和环境的控制,此时的力反馈由环境的模型提供,这就是虚拟现实技术的理论依据,这种方法能有效地克服信号传输时延对遥控机器人稳定性和透明性的影响,然而虚拟现实技术需要知道从机械手和环境模型的准确参数,条件比较严格。

由于遥控机器人大多工作在未知的环境中,即 \hat{Z}_s 和 \hat{Z}_e 的值是未知的,若我们设定 $\hat{Z}_s + \hat{Z}_e = 1$,则得到Anderson在文献[2]中提出的信号无源传输算法:

$$\begin{cases} F_{dm}(S) = F_{ds}(S)e^{-ST} + [V_m(S) - V_d(S)e^{-ST}] \\ V_d(S) = V_m(S)e^{-ST} + [F_{dm}(S)e^{-ST} - F_{ds}(S)] \end{cases} \quad (26)$$

若我们设定 $\hat{Z}_s + \hat{Z}_e = C$, C 为一正的实常数,则可得到Niemeyer在文献[3]中提出的的信号无源传输算法:

$$\begin{cases} F_{dm}(S) = F_{ds}(S)e^{-ST} + C[V_m(S) - V_d(S)e^{-ST}] \\ V_d(S) = V_m(S)e^{-ST} + C^{-1}[F_{dm}(S)e^{-ST} - F_{ds}(S)] \end{cases} \quad (27)$$

因此,Anderson和Niemeyer所提出的两种信号无源传输算法,只是本文提出的基于有源阻抗匹配的信号传输算法的两个特例,这两个特例只能保证遥控机器人在时延下的稳定性,而不能保证其透明性。

由于遥控机器人往往工作在未知的环境中, 即环境阻抗的参数事先是不知道的, 需要在线辨识. 为了保证操作者最终能够在临场感状态下控制机器人, 可采用如下步骤来调节信号传输算法的参数.

Step 1 首先设置算法参数 $\hat{Z}_s + \hat{Z}_e = 1$, 此时采用的是 Anderson 的信号传输算法, 此时系统是稳定的, 但操作者对环境的感知是失真的.

Step 2 操作者控制从机械手同环境相接触和作用, 同时机器人上的多传感器记录下环境的运动和力变化信号, 并送入计算机通过一定的参数辨识方法, 识别环境和机械手的阻抗参数 $\hat{Z}_s + \hat{Z}_e$.

Step 3 将识别出的阻抗参数 $\hat{Z}_s + \hat{Z}_e$ 送入到主、从边的信号传输调节器, 修改信号传输算法的参数值, 此时就可以实现图 4 的信号传输结构, 能同时保证遥控机器人的稳定性和良好的透明性. 操作者从而能够产生身临其境的力感觉, 有效地控制机器人完成任务.

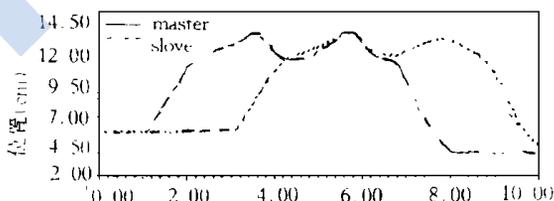
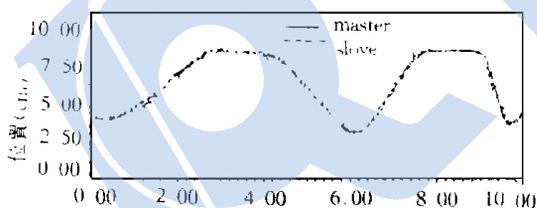
6 实验结果

为了验证本文提出的算法的实际效果, 我们构造了单自由度主从式力反射遥控机器人系统. 它由主机机械手、从机械手、力矩电机、力和位置传感器、数据采集和控制板、电机功放电路及 586 微机组成. 数据采集和控制频率为 2KHz, 信号传输时延通过数据缓冲技术模拟实现.

图 6(a)、(b) 为传输时延 $T = 0s$ 时的实验结果, 此时从机械手的作用环境为一硬质泡沫塑料块. 图 6(a)、(b) 的实验曲线表明:

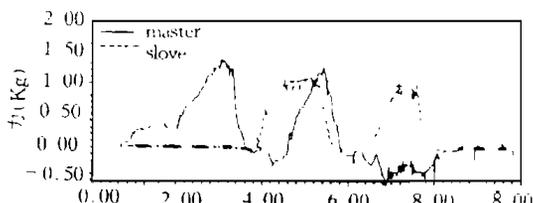
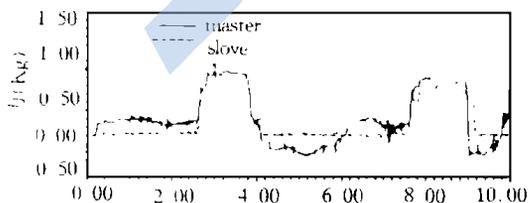
(1) 主从机械手工作稳定; (2) 从机械手的运动能很好地跟踪主机机械手的运动; (3) 主机机械手的对人手的作用力能较好地跟踪从机械手与环境的相互作用力. 以上说明环境阻抗能较为准确地传递到人手部, 操作者具有良好的力觉临场感效果.

图 6(c)(d) 为传输时延 $T = 2s$ 时的实验结果, 此时从机械手的作用环境为刚度已知($k =$



(a) 传输时延 $T = 0s$ 时, 从机械手的位置跟踪曲线

(b) 传输时延 $T = 0s$ 时, 主机机械手的力跟踪曲线



(c) 传输时延 $T = 2s$ 时, 从机械手的位置跟踪曲线

(d) 传输时延 $T = 2s$ 时, 主机机械手的力跟踪曲线

图 6 实验结果

$0.8 \times 10^3 \text{ N/m}$) 的轻质弹簧. 实验曲线表明: (1) 主从机械手工作稳定; (2) 主机械手的运动和力变化情况同 2s 后从机械手的运动和力变化情况较为一致. 以上说明环境阻抗能较为准确地传递到人手部, 操作者具有良好的力觉临场感效果.

7 结论

本文提出了一种适用于力反射遥控机器人的新的信号传输结构, 并给出了实现此结构的信号传输算法. 这种结构本身是有源的, 但它作为遥控机器人的中间环节时, 能够保证整个系统在传输时延存在时的无源性. 分析和实验结果表明这种信号传输结构有如下优点: (1) 物理概念清晰, 算法实现简单; (2) 该算法不仅包含了原有的两种信号无源传输算法, 而且为用于遥控机器人的虚拟现实技术提供了理论依据; (3) 该算法的参数可在线调节, 且无须知道信号传输时延的大小, 具有较大的灵活性和适应性; (4) 该算法能同时保证遥控机器人在信号传输时延存在时的稳定性和良好的透明性.

参 考 文 献

- 1 宋爱国, 黄惟一. 临场感遥控作业系统的研究进展. 高技术通讯, 1996, 6(6)
- 2 Anderson R J, Spong M W. Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay. IEEE Trans on Auto Control, 1989, 34(2): 494
- 3 Niemeyer G, Slotine J J. Stable Adaptive Teleoperation. IEEE J of Oceanic Engineering, 1991, 16(1): 152
- 4 Andrew L C, Hannaford B. Performance Testing of Passive Communication with Time Delay. Proc IEEE ICAR, 1993: 776
- 5 冯纯伯. 非线性控制系统分析与设计. 东南大学出版社, 1990
- 6 宋爱国. 力觉临场感的理论与实验研究. 东南大学博士学位论文, 1996

A NEW SIGNAL TRANSMISSION METHOD FOR FORCE REFLECTING TELEROBOT SYSTEM

SONG Aiguo JIN Shijun HUANG Weiyi

(Dept. of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210018)

Abstract In this paper, a new method of signal transmission based on non-passive impedance matching is proposed, which can maintain both the stability and good transparency of the force reflecting telerobot system in the presence of time delay. The analysis shows that the existent passive algorithms of signal transmission for telerobot system are special cases of this new method. At last, the experiment results demonstrate the effectiveness of this new method.

Key words Telerobot, telepresence, passivity, transparency, signal transmission

作者简介

宋爱国: 男, 30岁, 博士后, 副研究员. 研究领域: 遥控机器人传感与控制技术, 信息处理理论.