

文章编号: 1000-8152(2011)03-0315-06

无环境力反馈的四通道双边控制

王裕基, 孙富春, 刘华平, 闵海波

(清华大学 计算机科学与技术系; 智能技术与系统国家重点实验室; 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

摘要: 传统的四通道双边控制方法需要大量的力传感器, 用以检测遥操作系统受到的环境力, 在实际工程中不易推广应用. 本文提出了一种无环境力反馈的四通道双边控制策略, 分析了无时延和有时延两种情况下遥操作系统的透明性. 并采用无源的双边控制律, 设计了大时延情形下的系统控制结构. 仿真结果表明, 存在大时延时, 提出的控制系统在自由运动和接触运动中都具有良好的性能.

关键词: 四通道; 双边控制; 力反馈

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Four-channel bilateral control without environmental force feedback

WANG Yu-ji, SUN Fu-chun, LIU Hua-ping, MIN Hai-bo

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology; State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems; Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the project of traditional four-channel bilateral remote control systems, there needs a great number of force sensors for measuring the environmental forces. This requirement prevents the project from widely accepted in applications. In this paper, a strategy of four-channel bilateral control without environmental force feedback is proposed; and the transparencies of the remote control with or without time-delays are investigated in details. Furthermore, the stable control configuration in the presence of large time-delay is proposed according to passive bilateral control law. Simulations validate the performance of the proposed control system in free motion and contact motion.

Key words: four-channel; bilateral control; force feedback

1 引言(Introduction)

遥操作技术在航天工程^[1,2]、深海作业^[3]、核处理^[4]以及医疗^[5,6]等领域具有广泛的应用前景. 具有力反馈的双边控制技术应用到遥操作系统中, 可以提高临场感, 使操作者操作时具有身临其境的感觉.

最初的双边控制采用的是双通道结构, 即主端向从端传递速度信号, 从端向主端传递力信号, 这种双通道结构能够完成基本的遥操作任务, 但是不利于进行高精度控制. 针对这种情况, Lawrence提出了一个四通道的双边控制结构, 其结构如图1所示^[7]. 主端将其速度和操作者施加的力发送给从端, 控制从端操作臂运动; 从端将其速度和与环境接触力送回主端, 反馈给操作者. 这种结构提出以后, 很多研究者对其进行了修改和完善. 其中, Hashtrudi-Zaad和Salcudean增加了局部力反馈控制器, 提高了系统的性能^[8]; Sumiyoshi和Ohnishi又在Hashtrudi-Zaad结构的基础上进行了变形和分析, 更深入的揭示了局部力反馈的意义^[9]; Guiatni等人在四通道结构中引入了滑模控制, 提高了从端的位

置跟踪能力^[10]; Naerum和Hannaford对Lawrence结构的透明性进行了深入分析, 揭示了其隐含的许多特性^[11].

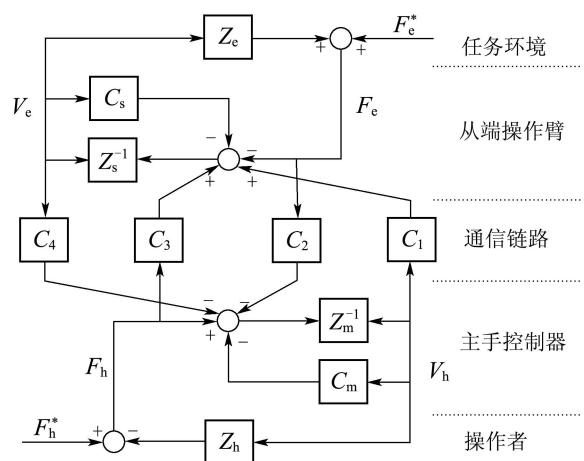


图 1 Lawrence的四通道结构

Fig. 1 Lawrence four-channel architecture

虽然针对Lawrence四通道结构的研究很多, 但是

这种结构具有许多局限性:

1) 环境阻抗 Z_e 很难准确建模, 而且不同的作业环境, 其阻抗差异很大;

2) 环境力 F_e 很难检测. 如果操作臂的所有部位都有可能受到环境力, 则需要大量力传感器, 成本过高, 硬件设计也很难实现;

3) 系统具有本地局部位置反馈控制器 C_m 和 C_s , 后来的研究者又加入了主从端局部力反馈控制器, 系统结构非常复杂.

如果不检测从端操作臂与环境的接触力, 通过从端操作臂的速度和控制力也可以间接反映出从端操作臂与环境之间接触力的大小. 本文从这个角度出发, 以一自由度的线性时不变模型作为研究对象, 设计了无环境力反馈的四通道双边控制结构. 对这种结构的无时延和有时延两种情况进行了透明性分析^[12], 并参考无源的双边控制方法, 提出了大时延情况下稳定的系统控制结构.

2 无环境力反馈的四通道双边控制结构 (Four-channel bilateral control architecture without environmental force feedback)

针对Lawrence四通道结构的缺点, 本文设计了一种更简单实用的四通道结构, 如图2所示. 其中: F_h 为操作者施加给主端的力, F_e 为环境施加给从端的力, Z_m 和 Z_s 为主端和从端操作臂的阻抗, F_m 和 F_s 为主端和从端操作臂的控制力, V_m 和 V_s 为主端和从端的速度, $C_1 \sim C_4$ 为主从端之间的通道控制器.

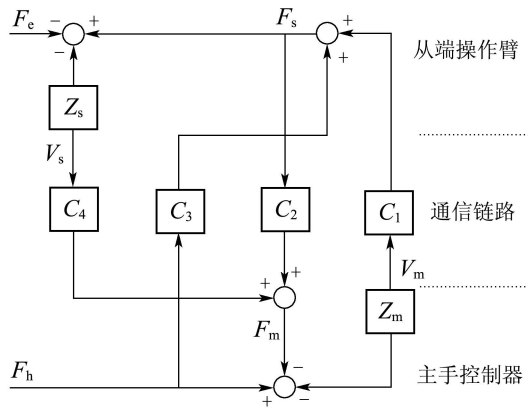


图2 无环境力反馈的四通道结构

Fig. 2 Four-channel architecture without environmental force feedback

操作者施加的力 F_h 和主端操作臂的运动速度 V_m 分别通过传递函数 C_3 和 C_1 传送给从端, 从端根据这两个量产生控制力 F_s , 控制操作臂运动; 从端将操作臂的力 F_s 和速度 V_s 分别通过传递函数 C_2 和 C_4 反馈给主端, 主端根据这两个量产生控制力 F_m , 让操作

者感觉到从端的力, 形成四通道双边控制.

按照Hannaford的方法^[13], 由双端口电路理论, 建立线性时不变双边控制模型

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_s \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} V_m \\ F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ F_s \end{bmatrix}. \quad (1)$$

主端动力学方程表示为^[14,15]

$$Z_m V_m = F_h - F_m, \quad (2)$$

$$F_m = C_2 F_s + C_4 V_s. \quad (3)$$

合并, 得

$$Z_m V_m = F_h - C_2 F_s - C_4 V_s. \quad (4)$$

从端动力学方程表示为

$$Z_s V_s = F_s - F_e, \quad (5)$$

$$F_s = C_3 F_h + C_1 V_m. \quad (6)$$

合并, 得

$$Z_s V_s = C_3 F_h + C_1 V_m - F_e. \quad (7)$$

由于混合矩阵 H 为双边控制系统的固有属性, 故考虑遥操作系统处在自由运动状态($F_e = 0$)时的情况即可. 根据式(1)(4)(7), 可以得到 H 矩阵的元素表达式:

$$h_{11} = \left. \frac{F_h}{V_m} \right|_{F_s=0} = \frac{Z_m Z_s + C_1 C_4}{Z_s - C_3 C_4}, \quad (8)$$

$$h_{12} = \left. \frac{F_h}{F_s} \right|_{V_m=0} = \frac{C_2 Z_s}{Z_s - C_3 C_4}, \quad (9)$$

$$h_{21} = - \left. \frac{V_s}{V_m} \right|_{F_s=0} = - \frac{C_3 Z_m + C_1}{Z_s - C_3 C_4}, \quad (10)$$

$$h_{22} = - \left. \frac{V_s}{F_s} \right|_{V_m=0} = - \frac{C_2 C_3}{Z_s - C_3 C_4}. \quad (11)$$

3 透明性分析(Transparency analysis)

3.1 无时延情况(Delay-free case)

定义1 如果一个双边系统的混合矩阵满足

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

则该系统透明. 此时有

$$F_h = F_s, \quad V_m = V_s. \quad (13)$$

定理1 当通道无时延时, 无环境力反馈的四通道双边控制系统透明的充分必要条件为

$$\begin{cases} C_1 = Z_s, & C_2 = 1, \\ C_3 = 0, & C_4 = -Z_m. \end{cases} \quad (14)$$

证 充分性. 将式(14)的值代入无环境力反馈的四通道结构中, 则有

$$F_s = Z_s V_m = Z_s V_s, \quad (15)$$

$$F_h = F_s + (V_m - V_s)Z_m. \quad (16)$$

由式(15)和(16), 可以推出

$$F_h = F_s, V_m = V_s. \quad (17)$$

即满足定义式(12), 系统透明.

必要性. 将式(8)~(11)代入式(12), 得

$$Z_m Z_s + C_1 C_4 = 0, \quad (18)$$

$$C_2 Z_s = Z_s - C_3 C_4, \quad (19)$$

$$C_3 Z_m + C_1 = Z_s - C_3 C_4, \quad (20)$$

$$C_2 C_3 = 0, \quad (21)$$

$$Z_s - C_3 C_4 \neq 0. \quad (22)$$

式(20)两端乘以 C_2 , 代入式(21), 得

$$C_1 = Z_s. \quad (23)$$

式(23)代入式(18), 得

$$C_4 = -Z_m. \quad (24)$$

由式(19)和(21), 得到下面两种情况:

$$\begin{cases} C_2 = 0, \\ C_3 = -Z_s Z_m^{-1}, \end{cases} \quad \begin{cases} C_2 = 1, \\ C_3 = 0. \end{cases} \quad (25)$$

将式(23)(24)和(25)合在一起, 得两组解:

$$\begin{cases} C_1 = Z_s, & C_2 = 0, \\ C_3 = -Z_s Z_m^{-1}, & C_4 = -Z_m; \end{cases} \quad (26)$$

或者

$$\begin{cases} C_1 = Z_s, & C_2 = 1, \\ C_3 = 0, & C_4 = -Z_m. \end{cases} \quad (27)$$

代入检验, 发现式(26)的值不满足式(22)的条件. 因此, 当系统没有时延, 并且完全透明时, 4个通道的传递函数应满足式(14). 证毕.

由定理1还可以得出如下推论:

推论1 无环境力反馈的四通道双边控制系统透明时, 不能向从端传递操作者施加的力.

从式(14)中可以看出, C_3 必须为零. 如果主端向从端传输操作者的力, 则系统一定不透明.

推论2 无环境力反馈的四通道双边控制系统透明时, 从端速度的通道控制器必须为负值.

在Anderson的两通道结构中^[14], 主端向从端传递运动速度, 从端向主端传递控制力. 现在将从端运动速度也反馈到主端, 随着环境力 F_e 的增大, 从端运动速度会减小, 即运动速度和环境力之间成反比. 从式(14)可以看出, 由于 C_4 为负值, 所以速度 V_s 越小, 则主端的控制力 F_m 越大, 正好反映从端的环境力在增大.

3.2 有时延情况(Delay case)

假定双向时延相同, 都为 T , 则主端和从端的动力学方程分别为

$$Z_m V_m = F_h - C_2 e^{-Ts} F_s - C_4 e^{-Ts} V_s, \quad (28)$$

$$Z_s V_s = C_3 e^{-Ts} F_h + C_1 e^{-Ts} V_m - F_e. \quad (29)$$

根据式(1)(28)(29), 可得 H 矩阵的元素为

$$h_{11} = \left. \frac{F_h}{V_m} \right|_{F_s=0} = \frac{Z_m Z_s + C_1 C_4 e^{-2Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}}, \quad (30)$$

$$h_{12} = \left. \frac{F_h}{F_s} \right|_{V_m=0} = \frac{C_2 Z_s e^{-Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}}, \quad (31)$$

$$h_{21} = - \left. \frac{V_s}{V_m} \right|_{F_s=0} = - \frac{(C_3 Z_m + C_1) e^{-Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}}, \quad (32)$$

$$h_{22} = - \left. \frac{V_s}{F_s} \right|_{V_m=0} = - \frac{C_2 C_3 e^{-2Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}}, \quad (33)$$

即

$$H = \begin{bmatrix} \frac{Z_m Z_s + C_1 C_4 e^{-2Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}} & \frac{C_2 Z_s e^{-Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}} \\ - \frac{(C_3 Z_m + C_1) e^{-Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}} & - \frac{C_2 C_3 e^{-2Ts}}{Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

定理2 当通道有时延时, 无环境力反馈的四通道双边控制系统不具备透明性.

证 将式(30)~(33)代入式(12), 得

$$Z_m Z_s + C_1 C_4 e^{-2Ts} = 0, \quad (35)$$

$$C_2 Z_s e^{-Ts} = Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}, \quad (36)$$

$$(C_3 Z_m + C_1) e^{-Ts} = Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts}, \quad (37)$$

$$C_2 C_3 e^{-2Ts} = 0, \quad (38)$$

$$Z_s - C_3 C_4 e^{-2Ts} \neq 0. \quad (39)$$

对式(35)~(39)联立求解, 得

$$\begin{cases} C_1 = Z_s e^{Ts}, & C_2 = e^{Ts}, \\ C_3 = 0, & C_4 = -Z_m e^{Ts}. \end{cases} \quad (40)$$

从式(40)可以看到, 通道传递函数 C_1, C_2, C_4 都含有因子 e^{Ts} , 这表示传输的信息需要在时间上超前. 而实际系统是不可能对传递信号进行时间超前的, 故无法获得系统透明的条件, 系统不具备透明性. 证毕.

虽然双边控制系统存在时延时, 无环境力反馈的四通道结构不具备透明性. 但是, 如果设计合适的通道控制器, 使系统具有稳定性, 并且同时具有良好的跟踪性能, 则对实际的双边控制系统也具有重要的意义.

4 控制器设计(Controller design)

采用无源性方法^[14], 假定散射算子为 S , 则有

$$F - V = S(F + V), \quad (41)$$

与混合矩阵 H 的关系式为

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} (H - I)(H + I)^{-1}. \quad (42)$$

如果取无损的传输线路,可以保证双边控制系统稳定.此时有

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-Ts} \\ e^{-Ts} & 0 \end{bmatrix}. \quad (43)$$

将式(43)代入式(42),可得混合阻抗矩阵

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1 - e^{-2Ts}}{1 + e^{-2Ts}} & \frac{2e^{-Ts}}{1 + e^{-2Ts}} \\ -\frac{2e^{-Ts}}{1 + e^{-2Ts}} & \frac{1 - e^{-2Ts}}{1 + e^{-2Ts}} \end{bmatrix}. \quad (44)$$

从频域转换到时域,根据无源的双边控制律,得无环境力反馈的四通道控制结构的控制律为

$$F_m(t) = F_s(t-T) - k(V_s(t-T) - V_m(t)), \quad (45)$$

$$F_s(t) = F_h(t-T) + k(V_m(t-T) - V_s(t)), \quad (46)$$

其中 k 为不同量纲间的转换系数.构造图3所示的结构,若取各控制器的值为

$$\begin{cases} C_1 = k, C_2 = 1, \\ C_3 = 1, C_4 = -k, \\ C_5 = k, C_6 = k. \end{cases} \quad (47)$$

则图3所示的结构正好满足式(45)(46).这种四通道结构具有如下优点:

- 1) 存在大时延时系统仍然能够保持稳定;
- 2) 结构简单;
- 3) 不用直接检测环境施加给从端的力 F_e ,而从端操作臂的力 F_s 相对好检测,用力传感器即可测得,便于实际应用.

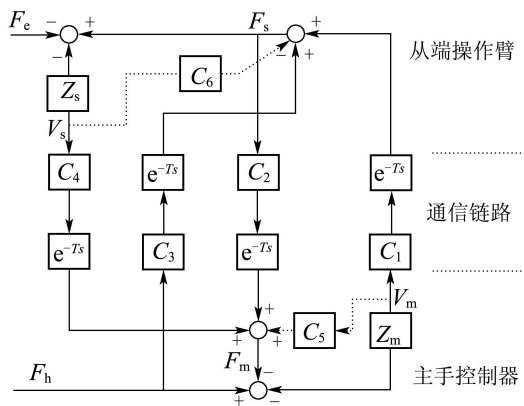


图3 稳定的时延四通道结构

Fig. 3 Stable four-channel architecture with time delay

5 仿真(Simulations)

为了验证提出方法的有效性,笔者用MATLAB

软件进行了系统仿真.采用操作臂常用的线性模型,主从端阻抗分别取质量-阻尼模型

$$Z_m = M_m s + B_m, \quad (48)$$

$$Z_s = M_s s + B_s. \quad (49)$$

这里没有加入弹性分量,主从端操作臂的关节只考虑自身的质量和粘性摩擦,因为一般的刚性操作臂作业时弹性变形很小,可以忽略不计.为了验证提出控制方法的性能,分别按自由运动和接触运动两种模式进行仿真.

当系统处于自由运动模式时,从端不会与任务环境接触.在这种情况下,控制系统期望具有良好的跟踪性,即从端能够准确、稳定地跟随主端运动.用一个正弦信号,模拟操作者给主端操作臂施加的往返力.为了量化系统的跟踪性能,本文定义了如下速度性能指标:

$$E_{vp} = \max_{t \in (0, t_{p1})} (|V_m(t-T) - V_s(t)|), \quad (50)$$

$$P_v = \int_0^{t_{p1}} |V_m(t-T) - V_s(t)| dt, \quad (51)$$

其中: t_{p1} 为自由运动时间, E_{vp} 为速度跟踪误差绝对值在运行区间上的最大值, P_v 为速度跟踪误差绝对值在运行区间上的积分.注意,当主从端的操作臂异构,即阻抗不同时,两臂的速度差别很大,因此这里的主从端速度是经过归一化的值.

当系统处于接触运动模式时,从端操作臂与任务环境中的目标表面接触,接触力与从端操作臂挤压目标表面引起的形变成正比.从端环境阻抗取为

$$F_e = K_e/s. \quad (52)$$

此时,从端操作臂的运动受限,其速度和位移的大小与任务环境的硬度相关.这种情况下,控制系统期望具有良好的力反馈性能,即反馈给主端操作臂的力能够准确的反映环境施加给从端操作臂的力.用一个方波信号,模拟操作者施加给主端的力,表示操作者通过双边控制系统周期性的挤压接触表面.为了量化系统的力反馈性能,本文定义了如下力性能指标:

$$E_{fp} = \max_{t \in (0, t_{p2})} (|F_e(t-T) - F_m(t)|), \quad (53)$$

$$P_f = \int_0^{t_{p2}} |F_e(t-T) - F_m(t)| dt, \quad (54)$$

其中: t_{p2} 为接触运动时间, E_{fp} 为力跟踪误差绝对值在运行区间上的最大值, P_f 为力跟踪误差绝对值在运行区间上的积分.当从端操作臂的阻抗不同时,由于速度不同,产生的接触力也会有很大差别,因此这里的接触力和反馈力也经过了归一化处理.

由于 k 为不同量纲间的转换系数,不失一般性,

将所有参数的度量单位都取为标准量纲, 则可取 $k = 1$. 为了充分验证系统的性能, 取不同的 T , Z_m , Z_s 以及 K_e , 分别统计性能指标 E_{vp} , P_v , E_{fp} 和 P_f . 仿真结果如表1所示.

表1 仿真结果

Table 1 Simulation results

$T(s)$	Z_m	Z_s	K_e	E_{vp}	P_v	E_{fp}	P_f
1	s+1	s+1	10	0.0901	2.1332	0.8758	7.1626
1	s+1	s+1	1	0.0901	2.1332	1.2057	11.9700
1	s+1	10s+10	10	0.9882	30.1991	1.0000	14.7958
1	s+1	10s+10	1	0.9882	30.1991	1.3042	20.9957
1	10s+10	s+1	10	0.2218	6.2331	0.7814	5.2047
1	10s+10	s+1	1	0.2218	6.2331	1.0497	5.8121
1	10s+10	10s+10	10	0.9647	28.3595	1.0000	9.8165
1	10s+10	10s+10	1	0.9647	28.3595	1.1123	20.2103
5	s+1	s+1	10	0.2026	4.6655	0.7020	7.8583
5	s+1	s+1	1	0.2026	4.6655	0.7626	7.8558
5	s+1	10s+10	10	0.3155	6.6906	0.7891	11.3971
5	s+1	10s+10	1	0.3155	6.6906	0.9595	16.0542
5	10s+10	s+1	10	0.0894	1.5773	0.8579	6.1038
5	10s+10	s+1	1	0.0894	1.5773	0.9318	4.4879
5	10s+10	10s+10	10	0.4229	3.9459	0.9148	7.4893
5	10s+10	10s+10	1	0.4229	3.9459	0.9965	15.7481

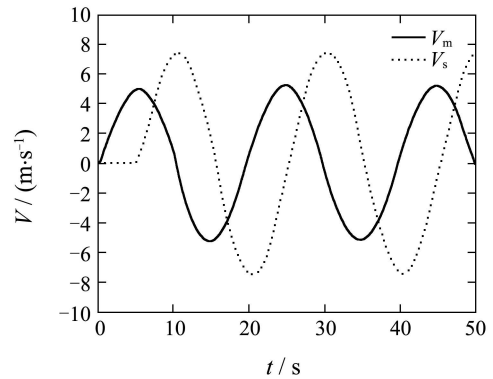
按照不同的时延, 不同的主从端操作臂阻抗以及不同的接触表面硬度, 一共进行了16组仿真实验. 每组实验都包括自由运动和接触运动两种模式, 分别考察相应的速度跟踪和力反馈性能. 其中, 时延分为1 s短时延和5 s长时延两种类型; 主从端操作臂的阻抗分为小阻抗 $s + 1$ 和大阻抗 $10s + 10$ 两种类型, 分别表示小型操作臂和大型操作臂; 接触表面的硬度系数取值1和10, 分别表示软环境和硬环境两种类型.

从表1的实验数据可以看出:

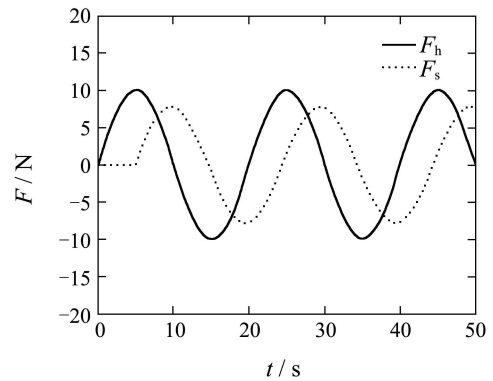
- 1) 接触表面硬度越大, 力反馈性能越好;
- 2) 当主从端操作臂同构时, 操作臂越大, 速度跟踪性能越差, 力反馈性能也越差;
- 3) 当主从端操作臂异构时, 如果主端操作臂比从端操作臂更大, 则速度跟踪性能和力反馈性能都会更好;
- 4) 当主从端都为小型操作臂时, 时延越大, 速度跟踪性能越差, 力反馈性能却变化不大; 但在其他情况下, 时延越大, 速度跟踪和力反馈性能会变得稍好.

各组仿真实验的运动曲线基本相似, 这里给出了一组时延为5 s, 主从端操作臂阻抗为 $s + 1$, 接触表面硬度系数为10时的仿真曲线. 图4显示了自由运动

模式下, 主从端速度和控制力的跟踪曲线. 从图中可以看出, 在大时延下系统是稳定的. 虽然两幅图中跟踪曲线之间的幅值稍有不同, 但是这种差别是等幅的, 在实际工程中简单处理就可以使它们完全相等. 图5显示了接触运动模式下, 主从端速度跟踪和力反馈曲线. 由于接触运动状态具有反馈力, 所以力反馈性能是主要的考察指标. 从图中可以看出, 在大时延下系统是稳定的, 并且速度跟踪曲线的运动趋势基本一致, 主端的反馈力能够反映从端产生的接触力状态. 需要说明的是, 图5中 F_m 的第1个突起波峰是初始的结构跳变, 从第2个波峰开始跟踪从端的接触力.



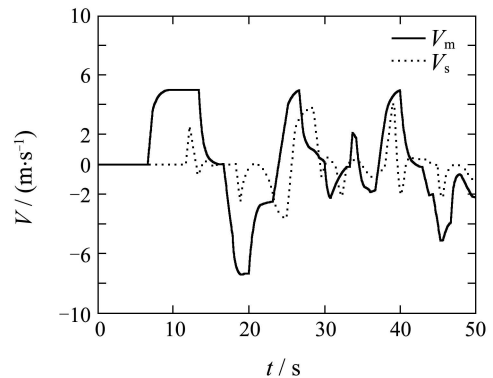
(a) 速度跟踪曲线



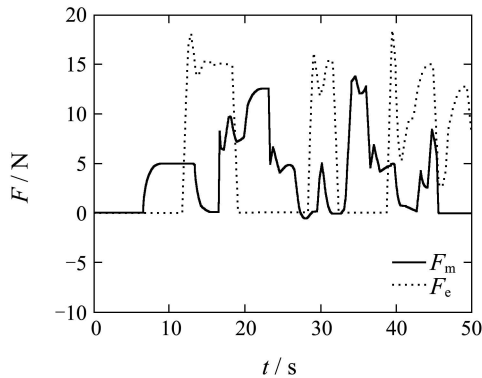
(b) 反馈力跟踪曲线

图4 自由运动时的跟踪曲线

Fig. 4 Tracking curves in free motion



(a) 速度跟踪曲线



(b) 反馈力跟踪曲线

图5 接触运动时的跟踪曲线

Fig. 5 Tracking curves in contact motion

6 总结(Conclusions)

传统的Lawrence四通道结构需要检测环境施加给从端操作臂的力,对于常用的六自由度操作臂来说,检测这个力非常困难.因为作业时,操作臂的各个表面都有可能接触到环境的障碍物,要准确检测环境施加的力,需要在操作臂的各个表面布满力传感器,这在实际工程中不但造价昂贵,而且结构设计等各方面都会变得非常复杂.本文设计的四通道结构,不用反馈环境施加的力,而用从端的运动速度和驱动力来间接反映环境施加给从端的力,不但结构简单,而且方便实用.本文对这种结构在无时延和有时延两种情况下的透明性进行了分析,并根据无源的双边控制律,提出了稳定的时延四通道控制结构.仿真结果表明,这种控制结构在大时延下具有良好的性能,很适合在工程中应用推广.

参考文献(References):

- [1] SHERIDAN T. Space teleoperation through time delay: review and prognosis[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 592 – 606.
- [2] NOHMI M. Space teleoperation using force reflection of communication time delay[C] // *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE, 2003: 2809 – 2814.
- [3] JORDAN M, BUSTAMANTE J. On the presence of nonlinear oscillations in the teleoperation of underwater vehicles under the influence of sea wave and current[C] // *Proceedings of the 2007 American Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 894 – 899.
- [4] MANOCHA K A, PERNALETE N, DUBEY R V. Variable position mapping based assistance in teleoperation for nuclear cleanup[C] // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2001: 374 – 379.

- [5] TAVAKOLI M, PATEL R V, MOALLEM M. Bilateral control of a teleoperator for soft tissue palpation: design and experiments[C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2006: 3280 – 3285.
- [6] TOBERGTE A, KONIETSCHKE R, HIRZINGER G. Planning and control of a teleoperation system for research in minimally invasive robotic surgery[C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 4225 – 4232.
- [7] LAWRENCE D. Stability and transparency in bilateral teleoperation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 624 – 637.
- [8] HASHTRUDI-ZAAD K, SALCUDEAN S. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(1): 108 – 114.
- [9] SUMIYOSHI Y, OHNISHI K. The transformation of modified 4-channel architecture[C] // *Proceedings of the 2004 IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. New York: IEEE, 2004: 211 – 216.
- [10] GUIATNI M, KHEDDAR A, MELOUAH H. Sliding mode bilateral control and four channels scheme control of a force reflecting master/slave teleoperator[C] // *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automations*. New York: IEEE, 2005: 1660 – 1665.
- [11] NAERUM E, HANNAFORD B. Global transparency analysis of the lawrence teleoperator architecture[C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 4344 – 4349.
- [12] YOKOKOHI Y, YOSHIKAWA T. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(5): 605 – 620.
- [13] HANNAFORD B. A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(4): 426 – 434.
- [14] ANDERSON R, SPONG M. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(5): 494 – 501.
- [15] NIEMEYER G, SLOTINE J. Stable adaptive teleoperation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1991, 16(1): 152 – 162.

作者简介:

王裕基 (1979—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为双边控制与遥操作, E-mail: wangyuji07@mails.tsinghua.edu.cn;

孙富春 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制与遥操作, E-mail: fcsun@mail.tsinghua.edu.cn;

刘华平 (1976—), 男, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为奇异摄动模糊控制, E-mail: hpliu@mail.tsinghua.edu.cn;

闵海波 (1982—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为空间编队和协同控制, E-mail: mhb07@mails.tsinghua.edu.cn.