

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904643

基于力触觉手柄的虚拟环境力反馈交互系统稳定性分析*

李会军, 谢桂平, 宋爱国, 李博维

(东南大学 仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘要:基于力触觉手柄的虚拟环境(VE)力反馈系统在人机交互领域得到广泛应用,稳定性是系统正常工作的前提。首先将力反馈设备、虚拟交互环境以及操作者作为独立模块单独建模,再基于阻抗再现方法建立力反馈交互系统闭环控制模型,并利用赫尔维兹判据推导了系统稳定的条件,利用频率响应函数分析了刚度和阻尼、零阶保持器的信号保持时间间隔以及操作者阻抗对系统稳定性的影响,给出了虚拟刚度、虚拟阻尼以及操作者阻抗等影响因素的临界稳定条件。利用研制的力反馈触觉手柄构建了实验系统并进行了实验研究,针对不同的力反馈频率和不同的阻抗分析了不同条件下的系统稳定性。实验结果证明了理论分析的正确性。

关键词:力触觉交互;稳定性分析;力触觉手柄;虚拟环境

中图分类号: TP241 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Stability analysis of VE force feedback interaction system based on haptic handle

Li Huijun, Xie Guiping, Song Aiguo, Li Bowei

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: VE (virtual environment) force feedback system based on haptic handle has been widely used in human-machine interaction field. Stability is the prerequisite for the system to work properly. Firstly, the force feedback device, the virtual interaction environment and operator are modeled independently as independent modules, then the closed-loop control model of the force feedback interaction system is modeled based on impedance reconstruction method. The Hurwitz criterion is used to derive the system stability conditions, the frequency response function is used to analyze the influences of the stiffness and damping of virtual environment, the signal hold time interval of the zero-order holder and the impedance of the operator on the system stability, and the critical stability conditions of the influence factors, such as virtual stiffness, virtual damping, operator impedance and etc. are given. The developed force feedback haptic handle is utilized to construct an experiment system and experiment study is conducted. The system stability under different conditions is analyzed for different frequencies of force feedback and different virtual environment impedance. The experiment results prove the correctness of the theoretical analysis.

Keywords: haptic interaction; stability analysis; haptic handle; virtual environment

0 引 言

基于手柄的虚拟环境(virtual environment, VE)力反馈系统在人机交互等领域得到广泛应用^[1-2]。力反馈手柄可将真实测量或模拟计算得到的力信息进行反馈和再现,使操作者感知到作业对象与环境的力觉交互信息,从

而实现更加自然的人机交互^[3]。VE力反馈交互系统中,根据VE的状态及虚拟阻抗计算力反馈,解算后通过力反馈设备作用于操作者。基于力反馈设备的VE交互系统中,操作者控制交互设备运动,操作者特性直接影响交互系统的作业性能^[4];其次,不同任务需求条件下的VE模型及参数各不相同,可能导致系统产生振荡等不稳定。因此,稳定性是VE力反馈人机交互系统设计中的首要

收稿日期:2019-01-10 Received Date:2019-01-10

* 基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1303201)、江苏省“333工程”项目(BRA2018319)、国家自然科学基金(61773265)项目资助

问题^[5]。

力反馈设备、系统控制方法和 VE 参数是影响力反馈交互系统稳定性的 3 个主要因素^[6-7]。在过去的几十年中,研究者们分析了力反馈交互系统的稳定性边界和影响其性能的因素,并对理论预测的准确性和不同力反馈算法的可用性及其先决条件进行了实验验证和分析,有大量文献涵盖了该问题的不同方面,典型的分析方法包括无源性原理、基于 H_∞ 控制理论及 Lyapunov 稳定性理论等。Coglate 等^[8]基于无源性假设,推导出了著名的无源性准则,并给出了力触觉交互系统的稳定性条件。Gil 等^[9]不考虑操作者因素,结合力反馈设备的稳定性分析,利用力反馈设备的质量-阻尼线性模型和 VE 的弹簧-阻尼线性模型,分别在忽略和考虑时间延迟的条件下,根据劳斯-赫尔维茨稳定性判据和奈奎斯特定理给出了虚拟刚度、力反馈设备阻尼等的线性稳定性判据,但该判据只在虚拟阻尼和延时较小条件下有效。Hulin 等^[10]考虑到操作者和小时延的影响,给出了力反馈交互系统的稳定性边界条件。Liu 等^[11]针对不确定时延的力反馈人机交互系统,采用线性矩阵不等式方法进行了稳定性分析。现有的力触觉交互系统研究侧重关注人类力触觉感知的生理、心理特性和人机工效学研究,将操作者作为控制系统系统的一部分进行探讨研究相对较少。然而,作为一个人机耦合的系统,有必要综合考虑操作者与力反馈设备及 VE 的动力学模型,为力反馈人机交互系统的分析提供基础^[4]。

稳定性研究有助于有效设置人机交互系统参数(如虚拟阻抗),并且揭示系统特性(如采样率、时间延迟等)对系统整体性能的影响。本文针对基于手柄的 VE 力反馈交互系统,首先将力反馈设备、虚拟交互环境以及操作者作为独立模块单独建模,再基于阻抗再现方法建立力反馈交互系统闭环控制模型,在连续时间域分析了操作者、力反馈设备、VE 以及采样时间等多个因素对系统稳定性的影响,提出了 VE 力反馈交互系统的稳定性条件,并通过仿真和实验进行了验证。

1 基于手柄的 VE 力反馈交互系统

基于手柄的 VE 力反馈交互系统主要包括操作者、力反馈手柄、VE 等。操作者操作手柄控制 VE 中的虚拟代理运动,同时根据 VE 模型和交互状态实时计算虚拟交互力,并通过手柄作用于操作者,实现操作者带力感觉的控制^[12]。如图 1 所示为 VE 力反馈交互系统的基本结构,其中 \dot{x}_h 是操作者作用于手柄的运动,可由位置传感器测得的运动信息后向差分得到; \dot{x}_e 是通过力反馈手柄传递的控制信号,即力反馈手柄末端的连续运动信息 \dot{x}_h ; VE 响应运动,计算出相应的虚拟交互力 f_e (即反馈力 f'_m)

并传递给力反馈手柄控制器,最后反馈到操作者,这种交互控制方式即为阻抗再现^[13]。

本系统采用一种低惯量、大刚度的并联式力反馈手柄^[14],如图 1 所示,该手柄具有 3 个转动自由度,操作手柄末端运动可实现 X 向移动和 Y 向移动和 Z 向旋转。3 个位置传感器分别用于测量 3 个电机转轴处的旋转角度,并转换为手柄末端的位姿信息。3 个力反馈执行器分别用于产生 X、Y、Z 方向上的力/力矩反馈并作用于操作者。

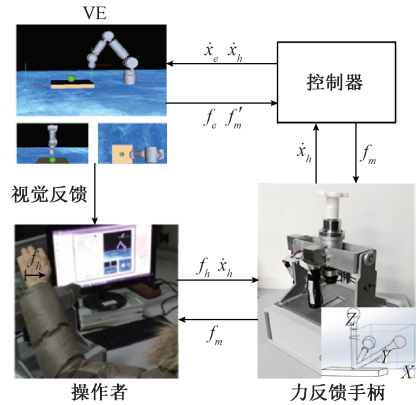


图 1 VE 力反馈系统结构

Fig.1 Structure of the VE force feedback system

力反馈交互软件用于为操作者提供视觉反馈和力反馈。本系统软件在 Microsoft Visual Studio2008 平台开发,基于 MFC 的框架,利用 OpenGL 作为图形接口渲染三维虚拟场景,完成虚拟场景动态物体加载和虚拟交互力计算仿真。系统采用的计算机硬件配置为 3.2 GHz 的英特尔 i5-3470 处理器,4 G 内存,NVIDIA GeForce GT630 显卡。上位机软件在 Visual Studio 2 010 开发环境,基于 MFC 框架和 Measurement Studio 控件混合使用搭建框架,并且利用 OpenGL 开源图形库建立 VE。

2 力反馈交互系统建模

VE 力反馈交互系统的建模主要包括操作者、力反馈设备和 VE 等模块建模。

2.1 操作者模型

操作者是人-交互设备-VE 回路中重要的一环,在整个系统中起着感知和决策的作用^[4]。操作者本身是一个复杂的大系统,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。操作者模型用于描述操作者在人机交互系统工作过程中的控制调节作用。操作者施加适当的力给力反馈手柄,控制虚拟物体运动,并保持手部与力反馈手柄末端的运动一致,通常用阻抗模型来描述这一过程。操作者模型如图 2 所示,图中 \dot{x}_e 表示操作者运

动指令, \dot{x}_h 为力反馈手柄末端的连续运动信息, 操作者自动调节自身阻抗输出力 f_h , 保证系统运动响应与操作者的运动指令一致。

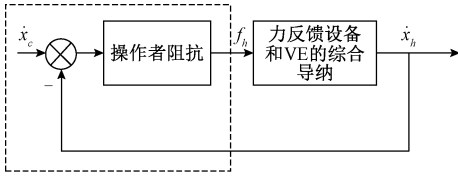


图2 操作者阻抗模型

Fig.2 The operator impedance model

操作者模型很难用一个非常准确的模型来表达, 但是通常用质量-弹簧-阻尼模型来表达操作者环节输入和输出信号的一般规律^[15]。

$$Z_h(s) = m_h s + b_h + \frac{k_h}{s} \quad (1)$$

式中: m_h 、 b_h 、 k_h 分别是操作者的等效惯量、等效阻尼和等效传动刚度。操作者通常以较低的频率操作力反馈设备, 等效刚度是影响模型稳定性的主要因素, 简化为:

$$Z_h(s) = \frac{k_h}{s} \quad (2)$$

2.2 力反馈手柄模型

力反馈手柄通常有一个以上的自由度, 以一个自由度为例进行建模分析。单自由度的力反馈存在操作者手臂对手柄的驱动和电机对手柄的反馈驱动 2 个驱动点, 操作者控制手柄进行运动, 测控模块检测获得手柄运动信息控制虚拟代理运动, 并根据 VE 计算的反馈交互力驱动电机, 实现操作者对虚拟交互力的感知。设手柄的操作杆为刚性, 则其动力学模型如图 3 所示。图 3 中, I_m 是电机的转动惯量, B_m 是电机的转动阻尼, I_l 是手柄的转动惯量。操作者在手柄的末端施加力 f_h , 即施加了转矩 M_h , 手柄末端的转动角速度 $\dot{\theta}_h$, 转换为水平运动即以 \dot{x}_h 的速度平动。在电机驱动点, 电机产生转矩 M_m 并施加于手柄末端。

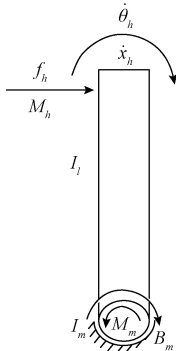


图3 力反馈设备动力学模型(一个自由度)

Fig.3 The dynamic model of the force feedback device (1-DOF)

设电机轴的半径为 r , 电机转矩等效为电机输出轴外侧的力 f_m , 手柄末端到旋转中心的长度为 R , 则力反馈手柄的动力学方程为:

$$\begin{cases} M_h - M_m = I_l \ddot{\theta}_h + I_m \ddot{\theta}_h + B_m \dot{\theta}_h \\ M_h = R f_h \\ x_h = R \theta_h \\ M_m = r f_m \end{cases} \quad (3)$$

拉普拉斯变换得到反馈力 f_m 、输出运动 \dot{x}_h 和力反馈手柄输入力 f_h 之间的关系为:

$$F_h(s) = \left[\frac{(I_m + I_l)s + B_m}{R^2} \right] \dot{X}_h(s) + \frac{r}{R} F_m(s) \quad (4)$$

式中: F_m 根据 VE 模型和虚拟代理的交互状态计算, 并经过一个零阶保持器后输出。

本系统使用 Maxon RE30 电机, 电机输出轴半径 $r = 6$ mm, 机械时间常数 $t = 2.96$ ms, 转动惯量 $I_m = 34.7$ g·cm², 手柄末端到旋转中心 $R = 15$ cm。则电机转动阻尼^[13]为 11.72 g·cm²/ms。连接的圆柱形杆采用铝合金, 密度为 3.5 g/cm³, 体积约为 70 cm³, 质量约 245 g, 则手柄转动模块相对于转轴的转动惯量为 4 593.75 g·cm²。

2.3 VE 模型

VE 是操作者控制和交互的对象, 其参数和特性直接影响力反馈系统的稳定性, 现有的研究大多是利用机电等效关系建立阻抗模型对其动力学特性进行分析^[16-17]。对于 VE, 输入是位置控制指令, 输出是反馈的交互力信息, 其等效阻抗为:

$$Z_e(s) = \frac{F_e(s)}{\dot{X}_e(s)} = \frac{f_m'(s)}{\dot{X}_h(s)} \quad (5)$$

根据不同的交互需求和作业特性, 需要建立不同属性的 VE 动力学模型, 通常采用质量-弹簧-阻尼模型表示。

$$f_m' = K_e x_h + B_e \dot{x}_h + M_e \ddot{x}_h \quad (6)$$

式中: K_e 、 B_e 、 M_e 分别为 VE 的弹性系数、阻尼系数和惯性质量。

拉普拉斯变换可得虚拟环境的等效阻抗为:

$$Z_e(s) = M_e s + B_e + \frac{K_e}{s} \quad (7)$$

对于不同作业任务建立的 VE 性质不同。依据 Gil 等^[9]的研究, 弹簧阻尼模型是刚性物体力反馈的典型应用, 本文主要分析刚性系统的稳定性, 将环境模型简化为带有阻尼环节的弹簧主导型 VE 模型, 等效阻抗为:

$$Z_e(s) = B_e + \frac{K_e}{s} \quad (8)$$

2.4 VE 力觉交互系统模型

由于操作者阻抗的不确定性和不可控性, 首先假设任意操作者阻抗条件, 探讨系统参数对稳定性的影响, 然

后将操作者作为控制系统的环节,建立力反馈交互整体系统的闭环控制模型,分析操作者阻抗等各个模块参数的稳定性条件。

VE 模块的输入为操作者施加的力,输出是力反馈手柄的运动响应,则该模块是为不含操作者模型的开环控制系统,可分为力反馈手柄模块、VE 模块和零阶保持器等,如图 4 所示。

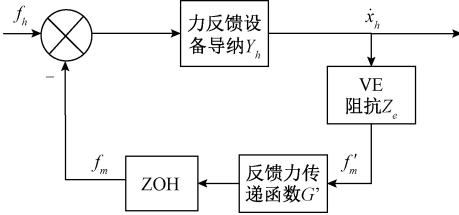


图 4 不含操作者的开环系统模型

Fig.4 The open-loop system model not including operator

根据 VE 模型计算交互作用力 f'_m , 经过零阶保持器 ZOH 后产生反馈力 f_m , 通过力反馈设备电机作用于操作者。设零阶保持器延时为 T , 则传递函数:

$$G_{ZOH} = \frac{F_m(s)}{f'_m(s)} = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \approx \frac{2}{2 + sT} \quad (9)$$

前述已建立力反馈手柄和 VE 模型, 根据式 (4)、(7)、(10), 可得开环系统输入力 f_h 与运动输出 \dot{x}_h 的关系:

$$F_h(s) = \left[\frac{(I_m + I_l)s + B_m}{R^2} \right] \dot{X}_h(s) + \frac{r}{R} \cdot \frac{2}{2 + Ts} \cdot Z_e(s) \cdot \dot{X}_h(s) \quad (10)$$

式中: $\frac{(I_m + I_l)s + B_m}{R^2}$ 为力反馈手柄的阻抗, VE 阻抗为

$Z_e(s)$, 交互反馈力传递函数 G' 即 $\frac{r}{R}$ 。

综合上述分析, 交互力反馈开环系统传递函数为:

$$G(s) = Y_s(s) = \frac{\dot{X}_h(s)}{F_h(s)} =$$

$$\frac{R^2(Ts + 2)}{T(I_m + I_l)s^2 + [2(I_m + I_l) + TB_m]s + 2B_m + 2rRZ_e(s)} \quad (11)$$

将虚拟环境的弹簧阻尼模型代入式中, 可得

$$G(s) = Y_s(s) =$$

$$\frac{R^2s(Ts + 2)}{T(I_m + I_l)s^3 + [2(I_m + I_l) + TB_m]s^2 + 2(B_m + rRB_e)s + 2rRK_e} \quad (12)$$

对于人在环中的力反馈交互闭环控制系统, 其模型如图 5 所示。

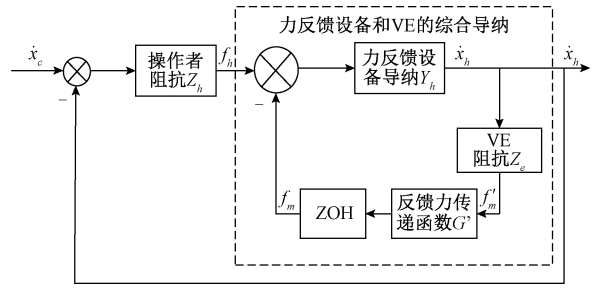


图 5 力反馈交互系统闭环模型

Fig.5 The close-loop model of the force feedback interaction system

人机交互力反馈系统闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{Z_h(s) Y_s(s)}{1 + Z_h(s) Y_s(s)} \quad (13)$$

式中: $Y_s(s)$ 是力反馈设备和 VE 的综合导纳; $Z_h(s)$ 是操作者阻抗。将式 (2)、(12) 代入, 得到力反馈闭环系统的传递函数:

$$G(s) = [R^2k_h Ts + 2R^2k_h] / [T(I_m + I_l)s^3 + [2(I_m + I_l) + TB_m]s^2 + [2(B_m + rRB_e) + Rk_h T]s + 2R(rK_e + k_h)] \quad (14)$$

3 力反馈交互系统稳定性分析

力反馈交互系统中, VE 阻抗、采样保持时间等都会影响系统的稳定性, 各个模块的设计参数需要满足一定的条件才能保障系统的稳定性。

3.1 VE 阻抗的稳定性条件

分析 VE 参数对系统稳定性的影响时, 采用不考虑操作者阻抗的控制模型。VE 一般为刚性交互, 弹性系数是主导元素, 可以用 VE 中所允许的最大刚度作为力反馈交互系统稳定性性能的依据。

力反馈交互系统开环传递函数特征根方程为:

$$T(I_m + I_l)s^3 + [2(I_m + I_l) + TB_m]s^2 + 2(B_m + rRB_e) + 2rRK_e = 0 \quad (15)$$

赫尔维兹行列式为:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \cdots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix} \quad (16)$$

式中: $a_0 = T(I_m + I_l)$, $a_1 = [2(I_m + I_l) + TB_m]$, $a_2 = 2(B_m + rRB_e)$, $a_3 = 2rRK_e$ 。依据赫尔维兹稳定性判据, 系统稳定的充要条件为:

$$\begin{cases} a_0 = T(I_m + I_l) > 0 \\ a_1 = 2(I_m + I_l) + TB_m > 0 \\ a_2 = 2(B_m + rRB_e) > 0 \\ a_3 = 2rRK_e > 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$$

式中： $\Delta_2 = 2[2(I_m + I_l) + TB_m](B_m + rRB_e) - 2rRK_e T(I_m + I_l) > 0$

计算得到保证系统稳定的虚拟刚度条件为：

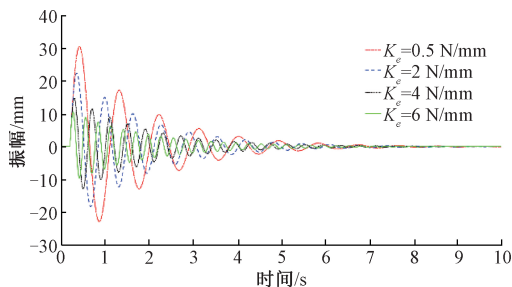
$$K_e < \frac{[2(I_m + I_l) + TB_m](B_m + rRB_e)}{rRT(I_m + I_l)} \text{g/s}^2 \quad (18)$$

由式(18)可知,虚拟刚度 K_e 、虚拟阻尼 B_e 和零阶保持器的时间间隔 T 必须满足上述条件才能保证系统稳定。为保证系统稳定所能接受的虚拟刚度随着虚拟阻尼增大而增大,随着零阶保持器时间间隔增大而减小。

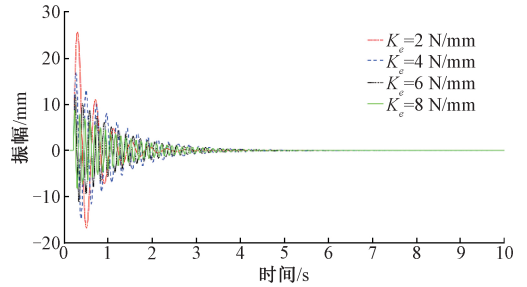
代入本系统力反馈手柄参数,得

$$K_e < \frac{(11\ 720T + 9\ 256.9)(9B_e + 11\ 720)}{41\ 656.1T} \text{g} = \frac{(11\ 720T + 9\ 256.9)(9B_e + 11\ 720)}{41\ 656.1T} \times 10^{-6} \text{N/mm} \quad (19)$$

采用不同刚度和阻尼系数的 VE 模型进行分析。首先分析 VE 刚度的影响,设零阶保持器的时间周期 $T = 0.001 \text{ s}$ 。考虑到 Gil 等^[10]提出的稳定性判据在虚拟阻尼较小情况下有效,为了验证本系统在不同虚拟阻尼情况下的稳定性条件,设置虚拟阻尼从 0 变化到一个特定数值,设 $B_e = 0 \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$, $B_e = 30 \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$,并分别进行仿真分析。图 6(a)和 6(b)分别显示 2 种情况下改变虚拟刚度的系统阶跃响应。从图 6 可以看出,在弹簧阻尼主导的 VE 中,系统的衰减速度随着虚拟刚度的增大而变慢,系统稳定性变差,而虚拟刚度增大到一定数值,就会到达临界稳定状态;虚拟阻尼增大时,系统的临界稳定刚度也增大,与 Colonnese 等^[18]的研究成果一致。



(a) $B_e = 0 \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$ 时不同虚拟刚度系数
(a) Different virtual stiffness coefficients when $B_e = 0 \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$



(b) $B_e = 30 \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$ 时不同虚拟刚度系数
(b) Different virtual stiffness coefficients when $B_e = 30 \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$

图 6 不同虚拟刚度开环模型的阶跃响应

Fig.6 The step responses of the open loop model for different virtual stiffness

3.2 零阶保持器的稳定性条件

变换式(19)的稳定性条件,得 $T < \frac{2(I_m + I_l)(B_m + rRB_e)}{rRK_e(I_m + I_l) - B_m(B_m + rRB_e)} \text{ s}$,即零阶保持器的信号保持周期在一定的数值范围内,才能保证系统稳定。设 $B_e = 30 \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$, $K_e = 10 \text{ N/mm}$,分析零阶保持器的信号保持周期条件下的系统响应。仿真结果如图 7 所示。

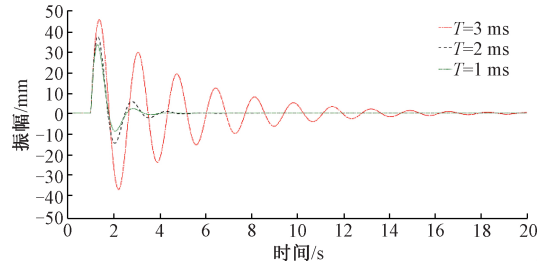


图 7 零阶保持器周期时间的阶跃影响分析

Fig.7 The step response analysis of the cycle time of the zero-order holder

图 7 显示了不同零阶保持器周期时间条件下的系统阶跃响应。可以看出,零阶保持器周期时间增大时,系统响应的超调量增大,系统稳定性变差。因此,VE 反馈交互系统中,较高的反馈力刷新率有利于系统的稳定性,如果反馈力频率低于一定的数值时,系统就会变得不稳定。

3.3 操作者阻抗对系统稳定性的影响

在交互过程中,操作者根据接收的力反馈信息,施加相应的操作力到力反馈手柄,操作者的自身阻抗和作业方式等都可能影响系统的稳定性。

前述建立了人在环中的力反馈系统闭环模型,其特征方程为:

$$T(I_m + I_l)s^3 + [2(I_m + I_l) + TB_m]s^2 + [2(B_m + rRB_e) + Rk_h T]s + 2R(rK_e + k_h) = 0 \quad (20)$$

根据赫尔维兹稳定性判据可推导出系统稳定的充要

条件为:

$$\begin{cases} a_0 = T(I_m + I_l) > 0 \\ a_1 = 2(I_m + I_l) + TB_m > 0 \\ a_2 = 2(B_m + rRB_e) + Rk_h T > 0 \\ a_3 = 2R(rK_e + k_h) > 0 \\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中:

$$\Delta_2 = [2(I_m + I_l) + TB_m][2(B_m + rRB_e) + Rk_h T] - 2RT(I_m + I_l)(rK_e + k_h) > 0$$

计算得到系统稳定的操作者阻抗条件为:

$$k_h > \frac{2rRTK_e(I_m + I_l) - 2[2(I_m + I_l) + TB_m](B_m + rRB_e)}{T^2RB_m} \quad (22)$$

从式(22)可以看出,操作者手臂的阻抗必须大于特定值,才能保证系统稳定。设零阶保持器的时间周期 $T=0.001\text{ s}$,代入前述系统参数,设 $B_e=30\text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$, $K_e=10\text{ N/mm}$,则操作者手臂的阻抗需大于 153 N/mm 。仿真分析如图 8 所示。

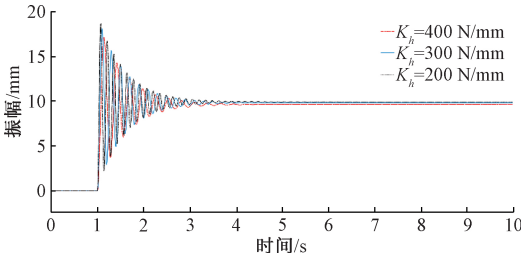


图 8 不同操作者刚度闭环模型阶跃影响分析
Fig.8 The step response analysis of the close-loop model for different operator stiffness

图 8 显示了操作者刚度不同时系统的阶跃响应,可以看出,系统的超调量随着操作者刚度的增大而减小,系统衰减的速度变快,稳定性增强。通常人体手臂放松时等效刚度较小,而手臂紧绷时等效刚度较大。当操作者在利用手柄进行力反馈交互作业时,保持手臂紧张有利于增强系统的稳定性。由于操作者是一个复杂系统,在设计力反馈交互系统时,应该尽可能改善其它环节的参数,以保证在不同操作者和操作方式下系统的稳定。

4 基于预测插值的力反馈控制方法

力反馈交互系统中,输入的是操作者作用于手柄的连续作用力,输出是一个离散的力反馈信息。从前文可知,零阶保持器的时间周期越大,系统就越不稳定。其

次,为了使操作者产生平滑的力觉感受,力反馈信号的刷新必须达到 $500\sim 1\,000\text{ Hz}$ 。为了提高力反馈的刷新率和系统的稳定性,提出一种预测和插值组合的方法。

4.1 预测和插值组合的反馈力计算

采用自回归模型预测系统的交互力反馈,利用历史信息预测出下一个采样点的位置,据此计算交互作用力,然后根据最近 3 个采样点的力反馈数值 f_{i-2}, f_{i-1}, f_i 和计算出的预测力反馈值 f_{i+1} 进行插值,计算出从时长 T 这一时间段内的反馈力。插值算法缩小了零阶保持器的时间周期,增大输出信号的连续性,增强系统的稳定性。

采用 3 次 B 样条曲线进行插值,根据历史已知的和预测计算的力或力矩控制点进行如下插值:

$$F^m(u) = U^T M F = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} f_{i-2} \\ f_{i-1} \\ f_i \\ f_{i+1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: M 为参数矩阵; $l1$ 表示虚拟代理和虚拟交互力的更新频率; $l2$ 表示交互力反馈的输出频率,在更新点到预测点的时间周期内插入 $\frac{l2}{l1}$ 个点,并输出到力反馈手柄。自变量 $u = \frac{l1}{l2}i (0 \leq i < \frac{l2}{l1})$ 。

在力觉刷新过程当中, B 样条插入算法根据最近更新的 3 个数据点 f_{i-2}, f_{i-1}, f_i 和基于预测算法预测出的数据点 f_{i+1} 来计算下一个输出点的力, f_u^m 代表在当前更新点到下一个预测点之间以 $l2$ 频率在较小时间周期内的输出力。

4.2 实验及分析

在基于手柄的 VE 力反馈交互系统中,通常要求对不同的操作者都能保证系统稳定,不同任务的 VE 其模型也甚至是变化的,比如在利用 VE 进行医学穿刺训练时,不同刺入深度的阻抗是变化的。为了验证系统稳定性和操作性能,构建了 VE 力反馈交互实验系统,如图 9 所示。

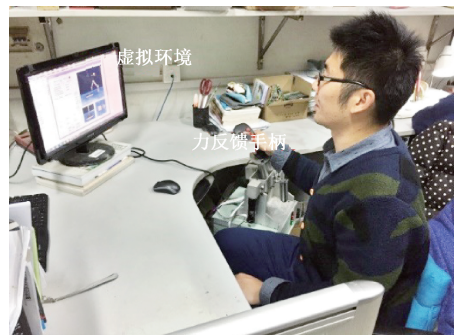


图 9 VE 力反馈交互实验系统
Fig.9 The VE force feedback interaction experiment system

1) 不同力反馈刷新率的稳定性实验

为了验证力反馈刷新率对系统稳定性的影响,建立弹性小球虚拟场景,分别使用预测插值算法和不使用预测插值算法进行了弹性碰撞反馈力实验。一般在刚性碰撞的 VE 中,弹性系数是主导元素,而力反馈交互系统的稳定性能也可以用 VE 中所允许的最大刚度作为依据,即人操作力反馈设备时系统稳定和系统出现不稳定临界点的刚度,可通过 VE 临界稳定刚度验证力反馈交互系统的稳定性。

5 个志愿者参与了系统稳定性分析的最大刚度对比实验。VE 起始刚度设为 3 N/mm,以 0.1 N/mm 的速度递增,在不同刚度条件下控制力反馈手柄操作小球碰撞墙面的实验,直到系统不稳定为止,记录系统稳定的最大刚度。结果如表 1 所示。

表 1 最大虚拟刚度对比实验结果

Table 1 Comparison experiment results for maximum virtual stiffness

实验对象	最大刚度/(N/mm)	
	未采用预测插值算法	采用预测插值算法
1	3.9	4.5
2	3.6	4.0
3	3.8	4.3
4	4.1	4.7
5	3.9	4.5

从表 1 可以看出,由于操作者操作力反馈手柄的阻抗差异,不同操作者测得的最大刚度有所不同,这符合式(24)的结论,即在力反馈交互系统中,系统临界稳定的 VE 刚度与操作者阻尼正相关。此外,对比插值前后系统临界稳定的最大 VE 刚度可知,对于所有操作者,加入预测插值算法后得到的系统稳定的 VE 模型最大刚度都比未加入预测插值算法得到的最大刚度平均增大 14%。这主要是因为插值算法减小了虚拟力反馈的间隔时间,有利于提高系统的稳定性。这以一实验结果与前述理论分析得到的结论式(21)是一致的,即当采样保持器延时减小时,系统临界稳定的 VE 最大刚度增大,力反馈交互系统的稳定性增强。

2) 不同 VE 阻抗的稳定性实验

为了分析操作者利用力反馈手柄与不同 VE 进行交互时的系统稳定性,设计了不同的虚拟刚度和虚拟阻尼进行稳定性实验。在此实验中,操作者以放松的姿态用拇指和食指握住手柄末端,设置 VE 阻尼从 0 g·cm²/s 开始,以 5 g·cm²/s 为速度递增至 30 g·cm²/s。对于每一个设定的虚拟阻尼,设置 VE 起始刚度为 2 N/mm,之后以 0.5 N/mm 的速度递增进行实验。给系统提供相同的冲

击,记录不同虚拟阻抗条件下系统的响应。在设定虚拟阻尼条件下,虚拟刚度增大到一定数值时检测到增大的振荡,收敛时间增长,即系统稳定性变差。不同虚拟阻抗条件下的系统冲击响应如图 10 所示,局部细节图显示了不同刚度条件下系统的收敛情况。

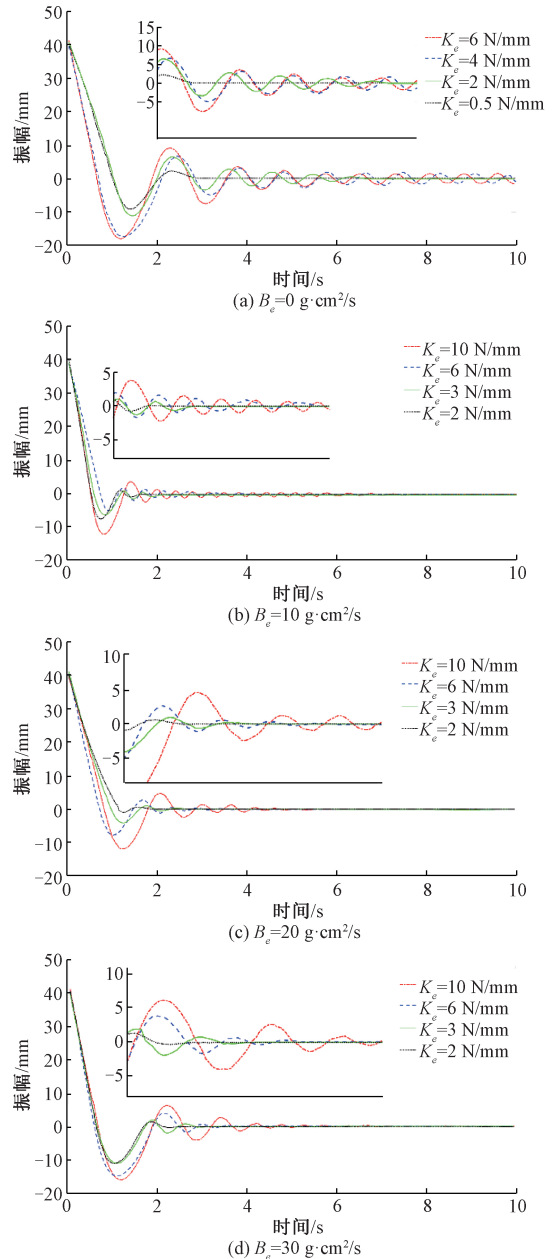


图 10 不同虚拟阻抗条件下的稳定性实验

Fig.10 The stability experiment under different virtual impedance conditions

从图 10 可以看出,在虚拟阻尼较小的情况下,系统极易出现振荡,如图 10(a)所示,在 $K_e = 2$ N/mm 时即出现不稳定响应,系统稳定性差。比较图 10(a)~(d)中不同虚拟刚度条件下的系统响应,可以看出给定虚

拟阻尼条件下,随着 VE 刚度增大,系统振荡幅值变大,收敛时间增长,系统稳定性变差,即在硬接触条件下力反馈系统容易出现不稳定振荡,这时需要操作者绷紧肌肉增大自身阻尼以维护系统的稳定性。比较图 10(a)~(d),在虚拟刚度同为 $K_e = 6 \text{ N/mm}$ 的情况下,图 10(a) $B_e = 0 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ 情况下,系统是不稳定的,而随着阻尼的增大,在图 10(c)和(d)中,系统响应是稳定的,且稳定时间随着阻尼增大而减小。因此,相同虚拟刚度条件下,虚拟阻尼增大可使得系统振荡幅度减小,收敛时间变短,有利于增加系统的稳定性,与理论分析结果一致。因此,在设计 VE 力反馈交互系统时,需充分考虑环境刚度和阻尼的关系,以增加系统在不同操作条件下的稳定性。

5 结 论

针对基于手柄的力反馈 VE 人机交互系统,分别讨论了 VE 参数、零阶保持器、操作者阻抗对系统稳定性的影响,给出了力反馈人机交互系统的稳定性条件。构建了基于手柄的 VE 力反馈实验系统,分别对不同力反馈刷新率和不同 VE 阻抗进行了系统稳定性对比实验,结果表明实验结果与理论分析结果一致。本文得出的稳定性条件和结论可以作为 VE 力反馈人机交互系统设计的参考依据。

参考文献

[1] MADDAHI Y, ZAREINIA K, TOMANEK B, et al. Challenges in developing a magnetic resonance-compatible haptic hand-controller for neurosurgical training[J]. *Journal of Engineering in Medicine*, 2018, 232(12): 1148-1167.

[2] 惠文珊,李会军,陈萌,等.基于 CNN-LSTM 的机器人触觉识别与自适应抓取控制[J].*仪器仪表学报*,2019, 40(1): 211-218.

HUI W SH, LI H J, CHEN M, et al. Robotic tactile recognition and adaptive grasping control based on CNN-LSTM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019,40(1): 211-218.

[3] 宋爱国. 人机交互力觉临场感遥操作机器人技术研究[J]. *科技导报*,2015, 33(23):100-109.

SONG AI G. Research on human-robot interaction telerobot with force telepresence [J]. *Science &*

Technology Review, 2015, 33(23):100-109.

[4] LI H B, ZHANG L, KAWASHIMA K. Operator dynamics for stability condition in haptic and teleoperation system: A survey [J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2018, 14(2): e1881.

[5] DIMEAS F, ASPRAGATHOS N. Online stability in human-robot cooperation with admittance Control [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2016, 9(2): 267-278.

[6] BAUD-BOVY G, TATTI F, BORGHESE N A. Ability of low-cost force-feedback device to influence postural stability [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2015, 8(2): 130-139.

[7] DIMEAS F, ASPRAGATHOS N. Online stability in human-robot cooperation with admittance control [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2016, 9(2):267-278.

[8] COLGATE J E, BROWN J M. Factors affecting the Z-width of a haptic display [C]. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994: 3205-3210.

[9] GIL J J, CIÁURRIZ P, DÍAZ I. Controlling two haptically-coupled devices: System modeling and stability analysis [J]. *Mechatronics*, 2018, 49: 224-234.

[10] HULIN T, ALBU-SCHÄFFER A, HIRZINGER G. Passivity and stability boundaries for haptic systems with time delay [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(4): 1297-1309.

[11] LIU Y W, MENG F W, GUAN B W, et al. Robust stability analysis based on LMI for haptic interface systems with uncertain delay [J/OL]. *Complexity*, 2018 (2). <https://doi.org/10.1155/2018/9342479>.

[12] 倪得晶,宋爱国,李会军.基于虚拟现实的机器人遥操作关键技术研究[J].*仪器仪表学报*,2017, 38(10): 2351-2363.

NI D J, SONG AI G, LI H J. Survey on robot teleoperation based on virtual reality [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017,38(10): 2351-2363.

[13] SHOUSHARI A L, DARIO P, MAZZOLENI S. A

review on the evolvement trend of robotic interaction control[J]. *Industrial Robot*, 2016, 43(5): 535-551.

- [14] LI H J, SONG AI G, LI B W, et al. Experiments and assessments of a 3-DOF haptic device for interactive operation [J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018(1): 94.
- [15] DONG R G, WELCOME D E, XU X Y S, et al. Mechanical impedances distributed at the fingers and palm of the human hand in three orthogonal directions[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331 (5): 1191-1206.
- [16] HOGAN N. Controlling impedance at the man/machine interface[C]. 1989 International Conference on Robotics and Automation, 1989(3):1626-1631.
- [17] PASSENBERG C, PEER A, BUSS M. A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems[J]. *Mechatronics*, 2010, 20(7): 787-801.
- [18] COLONNESE N, OKAMURA A. Stability and quantization-error analysis of haptic rendering of virtual stiffness and damping [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(9): 1103-1120.

作者简介



E-mail: lihuijun@ seu.edu.cn

Li Huijun received her B.Sc. degree in 1999 and M.Sc. degree in 2002 both from Zhengzhou University, received her Ph.D. degree in 2005 from Southeast University. Now, she is an associate research fellow in Southeast University. Her main research interests include human-machine interaction and robotics.



E-mail: a.g.song@ seu.edu.cn

Song Aiguo received his B.Sc. degree in 1990 and M.Sc. degree in 1993 both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, received his Ph.D. degree in 1996 from Southeast University. Now, he is a professor in Southeast University. His main research interests include human-machine interaction and robotics.

李会军,分别在 1999 年和 2002 年于郑州大学获得学士学位,硕士学位,2005 年于东南大学获得博士学位,现为东南大学副研究员,主要研究方向为人机交互与机器人技术。

宋爱国,分别在 1990 年和 1993 年于南京航空航天大学获得学士学位,硕士学位,1996 年于东南大学获得博士学位,现为东南大学教授,主要研究方向为人机交互与机器人技术。