

文章编号 : 1002-0446(2004)02-0097-05

约束切换与阻抗显示力反馈设备的稳定性研究*

王党校¹, 张玉茹¹, 王玉慧¹, 吕培军², 王勇²

(1. 北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100083; 2. 北京大学口腔医学院计算机应用中心, 北京 100081)

摘要: 研究了虚拟现实力觉交互系统中基于阻抗显示原理的交互设备丧失稳定性的原因以及振荡抑制方法. 通过分析单边约束的特点, 将复杂虚拟物体形状的感知和交互过程归结为动态单边约束的接触问题. 采用力反馈设备 Phantom^(R) 建立试验平台, 通过分析不同类型的单边约束下虚拟力信号的时间和空间分布规律, 发现了动态单边约束交互仿真中产生振荡的原因. 给出了基于虚拟力信号空间梯度的消除振荡的方法. 试验表明, 该方法可以有效抑制振荡, 实现稳定的力觉交互控制.

关键词: 单边约束; 阻抗显示; 力信号空间梯度; 稳定性

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Constraint Switching and Stability Issues in Impedance Display Force Feedback Device

WANG Dang-xiao¹, ZHANG Yu-ru¹, WANG Yu-hui¹, LU Pei-jun², WANG Yong²

(1. Robotics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Computerized Dentistry Center, Stomatology School, Peking University, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper discusses stability problem of haptic device in haptic display systems. Based on the analysis of impedance display device, the interaction between tools and arbitrary-shaped objects is simplified as a dynamic unilateral constraint contact problem. Using Phantom^(R) as the experiment platform, force distribution relative to time and to device position in several typical unilateral constraints is compared, and the reasons leading to vibration in complex unilateral constraint are uncovered. Compared with passivity-based stability analysis method, a force filtering method based on force-position gradient is proposed. Experiment results indicate that the proposed method can effectively eliminate vibration and stable interaction can be realized.

Key words: unilateral constraint; impedance display; gradient of force signal in space domain; stability

1 引言 (Introduction)

力觉交互系统通过带有力反馈功能的人机交互设备,使操作者操作计算机内的虚拟环境,感受到交互过程的操作力.借助于计算机提供的三维图形显示和力觉设备的力觉显示,增强操作真实感,提高操作效率.力觉交互技术在机器人遥操作、手术模拟和培训、虚拟现实游戏娱乐、计算机辅助产品设计等领域具有广泛的应用前景^[1].

力觉交互系统主要由操作者、力觉交互设备、虚拟仿真环境几部分组成,属于一种特殊的机器人系统.交互设备一般为串联或并联的机械臂,操作者抓持设备,通过虚拟仿真环境生成不同的力控制规律,模拟人与不同虚拟物体交互的力觉感受.与传统机器人控制相比,力觉交互系统具有两个特点:一是

由于人与机器人直接接触,人成为机器人的环境,操作者操作方式和抓持方式不同,导致对机器人的约束状况的改变;二是虚拟仿真环节类似机器人控制器,由于交互系统模拟的操作类型差别很大,控制器可能表现出时变、非线性等特点,因此,在力觉交互设备控制时,会出现振荡、噪音等丧失稳定性的情况.这种振荡不仅导致力觉感受真实感的丧失,还可能对操作者造成伤害,所以力觉交互系统的稳定性是系统设计的重要指标^[2].

力觉交互系统的稳定性主要取决于力觉交互设备的设计和控制.虚拟环境模型的设计^[3].前者主要包括控制器的超边界行为、交互设备未知的动力学模型、编码器的量化噪声、零阶保持器的能量滞后等,都会导致控制系统不稳定^[4].本文基于商用

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275003).
收稿日期: 2003 - 07 - 12

觉交互设备 Phantom^(R) 讨论稳定性问题,控制器和机械系统参数均已经确定.

在分析稳定性时,虚拟环境的模型大都集中在“虚拟墙壁”问题上,通过分析单边约束来描述交互模型和振荡问题. Gillespie 建立了人的可重复运动的动力学显式模型,将这个模型作为系统传递函数的一个环节,指出“能量泄漏”是导致虚拟墙壁模拟时产生振荡的原因^[4]. Adams 等提出基于被动性的控制方法,不要求建立人的显式模型,将人看作被动环节时,基于被动性假设,忽略人的因素对稳定性的影响,采用虚拟匹配或能量方法,保证力觉交互系统对于任意被动虚拟环境的稳定性^[2,5].在工具与复杂形状的三维物体交互时,单边约束不能描述交互过程环境阻抗变化的非线性因素,因此本文重点考虑虚拟环境模型造成的失稳和振荡问题,讨论复杂虚拟环境计算模型对稳定性的影响.

2 单边约束交互 (Unilateral constraint interaction)

力觉交互系统为如图 1 所示的连续和离散环节混合系统.交互设备根据工作原理不同分为阻抗显示和导纳显示两种类型.

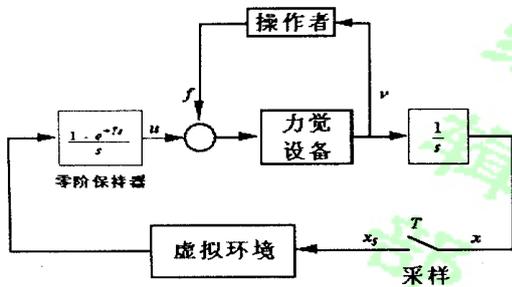


图 1 力觉交互系统组成简图

Fig.1 Components of force interaction system

目前研究界主要采用基于阻抗显示原理的力觉装置,图 2 所示为美国 Sensable 公司产品 Phantom^(R) Desktop.使用时,操作者抓持设备末端的手柄,位置传感器测量装置末端位置信号,送入虚拟仿真环境,计算得到虚拟力,发送给设备控制器,通过力控制将交互力施加给操作者,实现逼真的力觉感受.

单边约束是自然界中一种广泛存在的运动约束^[6],力觉交互系统的目标是模拟物理交互过程,因此,“虚拟墙壁”作为一种典型的单边约束,得到了广

泛的研究^[6].虚拟墙壁的计算模型如图 3.

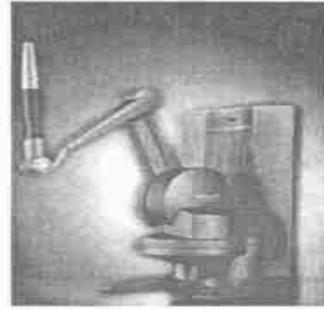


图 2 阻抗显示设备 Phantom^(R)

Fig.2 Phantom^(R) impedance display device

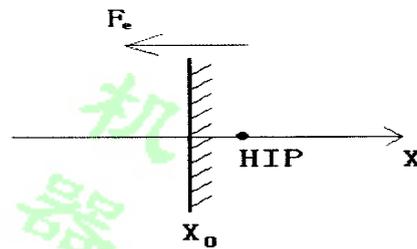


图 3 虚拟墙壁交互模型

Fig.3 Virtual wall interaction model

其式为:

$$\begin{cases} F_e = K_e (X_h - X_0) \dots X_h \geq X_0 \\ F_e = 0 \dots X_h < X_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 X_h 为装置的位置信号, X_0 为虚拟墙壁边界的位置坐标, K_e 为虚拟墙壁的接触刚度, F_e 为虚拟力信号.

Phantom^(R) 作为阻抗显示原理的设备,通过测量运动来衡量人的运动趋势(即主动力方向和大小),由于交互设备刚度的有限性^[6],在模拟单边约束(虚拟墙壁)时,力觉装置末端位置(HIP)必定嵌入约束边界内部.当装置位置处于约束外侧,称为装置位于自由空间内.当装置进入约束内部时,称为装置位于约束空间内.当装置进入约束空间内,虚拟力计算需要保证虚拟力信号和装置运动之间的关系,反映物体交互属性的变化要求(如挤压深度对接触力幅值的影响、接触力方向、摩擦、纹理等).

在虚拟墙壁模拟中,动态工具采用质点描述,静态墙壁采用解析模型,属于基本单边约束的求解问题^[7].在与复杂形状物体交互时,如牙齿交互仿真系统中,工具为球体形状,牙齿为采用三角片模型表达的复杂形体,如图 4 所示.

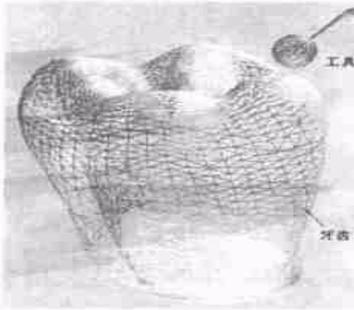


图 4 牙齿的三角片网格模型

Fig.4 Triangle mesh model of tooth

为了获得逼真的仿真效果,需要对球体外形和三角片网格进行实时碰撞检测,计算嵌入深度,然后基于弹簧力模型计算接触力.在切削过程中,牙齿三角片网格的边界随着牙齿材料的去除在实时改变.与基本单边约束区别在于:①虚拟力计算的离散化,导致单边约束对应的等效接触刚度在变化,即式(1)中的 K_c 成为变量;②由于切削导致约束的空间位置 X_0 在变化,因此,可以将工具与复杂形状物体交互抽象为动态的单边约束交互问题.给出如下两个定义:物理约束边界——自由空间和约束空间分界点;虚拟约束边界——在物理约束空间的内部,不同接触刚度的分界点.接触刚度的变化可能由于被接触物体本身的非线性刚度造成(如生物体组织接触刚度非线性),也可能由于虚拟力计算方法造成等效接触刚度的变化而造成.

基于上述分析,牙齿交互问题变成动态单边约束的模拟问题.为了分析动态单边约束模拟中力和运动的关系,下一节针对几种典型的动态单边约束,分析力信号的时间和空间分布,以便得到动态单边约束交互时产生振荡的原因.

3 动态单边约束交互 (Dynamic unilateral constraint interaction)

3.1 力的时间和空间梯度

如图 1 所示,虚拟环境对稳定性的影响体现在虚拟力和运动的关系(力的空间分布和时间分布)上,本节通过比较几种单边约束交互模型的区别,来分析不同的力的空间和时间分布规律对力觉交互稳定性的影响.

在力觉仿真中,位置信号和虚拟力信号通过离散采样和计算得到.定义离散力信号随时间的变化率 $\dot{F}(t)$,即力的时间梯度为:

$$\dot{F}(t) = \|\Delta \vec{F}\| / \Delta t \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta t = t_k - t_{k-1} \\ \Delta \vec{F} = \vec{F}_k - \vec{F}_{k-1} \end{cases} \quad (3)$$

t_k, t_{k-1} 分别为当前采样时刻和上一个采样时刻;
 \vec{F}_k, \vec{F}_{k-1} 分别为当前采样时刻和上一个采样时刻计算得到的虚拟力向量.

定义力的空间梯度,即离散力信号随装置末端位置变化率为 K_{ec} ,计算过程如下:

$$\begin{cases} \Delta \vec{X} = \vec{X}_k - \vec{X}_{k-1} \\ \Delta \vec{F} = \vec{F}_k - \vec{F}_{k-1} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta \vec{X}' = \Delta \vec{X} \Delta \vec{F} / \|\Delta \vec{F}\| \quad (5)$$

$$K_{ec} = \|\Delta \vec{F}\| / \|\Delta \vec{X}'\| \quad (6)$$

其中, X_k, X_{k-1} 分别为当前采样时刻和上一个采样时刻力觉装置末端的位置向量.

3.2 不同单边约束试验比较

几种典型单边约束试验设计如下:

- (1) 按照等刚度变化,即经典虚拟墙壁的模型,记为约束交互模型 1;
- (2) 随位置变化,由小刚度进入大刚度的虚拟墙壁模型,记为约束交互模型 2;
- (3) 基于球体工具外形的碰撞检测,球形工具和牙齿三角片网格接触交互,记为约束交互模型 3;
- (4) 基于球体工具外形的碰撞检测,球形工具和牙齿三角片网格切削交互,即牙齿三角片网格发生动态变形,导致约束边界的变化,记为约束交互模型 4.

约束 1 的计算模型如式 (1) 所示,分别选取 $K_c = 1 \text{ N/mm}$, $K_c = 3 \text{ N/mm}$,试验发现,前者可以稳定交互,后者发生振荡.

约束 2 的计算模型为:

$$\begin{cases} F_c = K_c (X_h - X_0) \dots X_h \geq X_0 \\ F_c = 0 \dots X_h < X_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_c = K_{c1} \dots X_h \geq X_1 \\ K_c = K_{c2} \dots X_0 \leq X_h < X_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $|K_{c1}| > |K_{c2}|$.按照如下参数进行试验, $K_{c1} = -1 \text{ N/mm}$, $K_{c2} = -0.5 \text{ N/mm}$, $X_0 = 0$, $X_1 = 2.5 \text{ mm}$,交互时产生振荡.

对比上述四个模型,分别计算交互过程中,离散力信号的时间梯度 K_{et} 、力的空间梯度 K_{ec} ,图 58 给

出了模型2和模型4的试验结果,其他试验结果表现出类似特性,由于篇幅所限没有给出.

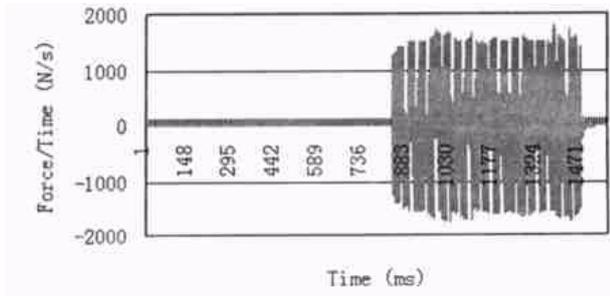


图5 模型2力的时间梯度

Fig.5 Force-time gradient in model 2

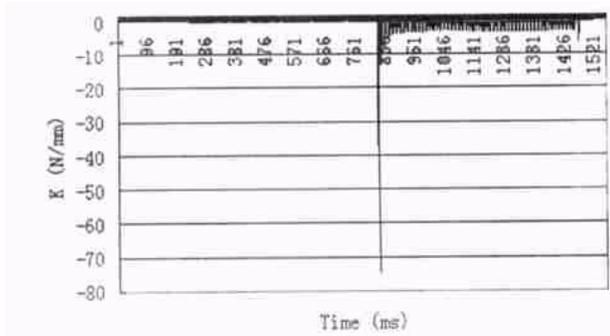


图6 模型2力的空间梯度

Fig.6 Force-position gradient in model 2

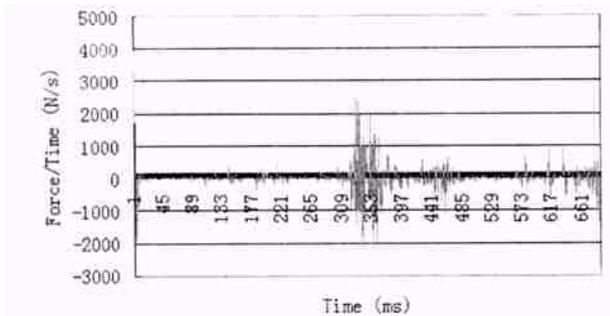


图7 模型4力的时间梯度

Fig.7 Force-time gradient in model 4

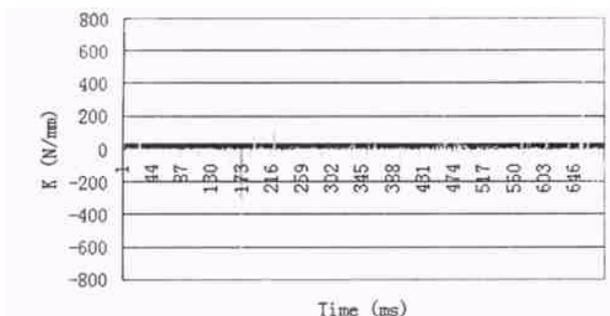


图8 模型4力的空间梯度

Fig.8 Force-position gradient in model 4

对试验结果分析,可以得到如下结论:

- 固定刚度虚拟墙壁在刚度过大时,在墙壁边界处由于自由空间和约束空间的切换发生振荡;变刚度虚拟墙壁在约束空间内,不同刚度切换位置处(即虚拟约束边界)产生振荡;

- 虚拟墙壁模拟属于基本单边约束的交互问题,特点是交互力 \vec{F}_k 和装置运动信号 \vec{X}_k 之间存在线性关系,只要保证线性比例系数小于某一给定值,即可避免振荡;

- 在复杂形状物体交互时,虚拟力计算方法导致从力觉设备的运动到交互力成为非线性映射关系,因此装置在约束空间内运动时,仍然会因为等效接触刚度的变化,导致装置不断穿越“虚拟约束边界”,虽然虚拟力模型中弹性系数小于给定阈值,但计算造成的等效刚度在变化,可能会超出给定阈值;

- 比较不同交互模型下 $\dot{F}(t)$ 的变化,发现保证力随时间的连续性并不能保证稳定交互,据此判断振荡不取决于力信号随时间变化规律;

- 在工具与牙齿的接触和切削交互中,力的空间梯度呈现大幅度阶跃变化,据此判断力的空间梯度超过给定阈值 K_{lim} 是导致振荡的原因.基于该判据可以研究消除振荡的方法.

4 振荡消除方法 (Vibration elimination method)

目前消除力觉设备振荡的方法主要有虚拟匹配方法^[2]和时间域被动性控制方法^[5].

虚拟匹配方法的基本原理是对进入虚拟环境的运动信号和虚拟环境输出的力信号同时进行处理,使最终信号关系满足双端口网络无条件稳定的范围.具体实现形式表现为由弹簧和阻尼元素串并联构成信号处理环节.对解析形式表示的一维虚拟墙壁,可以推导出解析的信号处理计算表达式,但对于采用三角片模型描述的物体,计算算法比较复杂.

时间域被动性控制方法基于被动性假设,将操作者、力觉交互设备、虚拟环境分别看作电网络端口环节,定义能量观测器来描述一个端口元件被动性损失的程 度,在被动性损失时,对力信号进行修正,达到保证整个系统被动性的目的.这种方法在计算能量时需要进行速度微分,在低速操作时会引入比较大的计算噪声,造成力觉设备的振荡和噪音.

本文基于力的空间梯度概念,设计一种消除振荡的简化方法,以便实现稳定的力觉交互仿真.

基于力觉交互设备 Phantom[®] 的性能参数,选择力的空间梯度阈值 $K_{lim\ it}^{cc}$,对力信号进行修正,保证力信号空间梯度与力觉交互设备的阻抗范围相匹配,达到消除振荡的目的.修正模型如下:

$$\begin{cases} \vec{F}'_k = \vec{F}_k + \Delta\vec{F} (K_{im\ it}^{cc} / K_c) \dots K_c > K_{im\ it}^{cc} \\ \vec{F}'_k = \vec{F}_k \dots K_c \leq K_{im\ it}^{cc} \end{cases} \quad (9)$$

其中 \vec{F}'_k 为修正后的虚拟力信号.

对于 3.2 节的模型 2 的变刚度虚拟墙壁,选择 $K_{im\ it}^{cc} = 1.5\text{ N/mm}$,试验测量得到力觉装置位置信号随时间的变化曲线如图 9 所示,图 10 为交互力的空间梯度变化曲线.由图可见,信号处理后力的空间梯度变化幅度大大减小,有效地抑制了振荡.

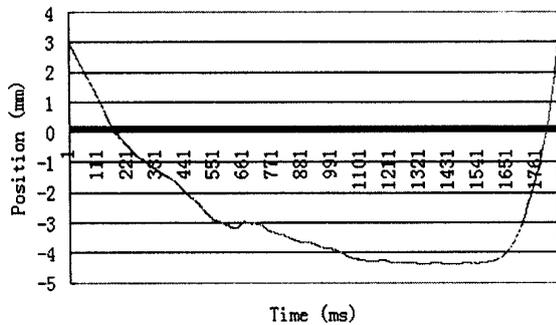


图 9 模型 2 经力滤波处理后的位置信号
Fig.9 Position signal after force filtering in model 2

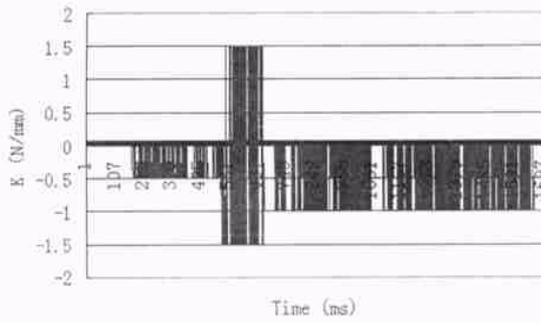


图 10 模型 2 经力滤波处理后的力空间梯度
Fig.10 Force-position gradient after force filtering in model 2

本文的方法集成在牙科手术力觉交互仿真系统中,实现了操作球形工具对牙齿进行滑动接触和表面切削的模拟.在工具沿牙齿表面滑动的接触试验中,交互过程中嵌入深度的变化如图 11 所示,在工具沿牙齿表面切削试验中,交互过程中嵌入深度的变化如图 12 所示.采用该方法前后,操作者感受的效果存在明显的差别,试验结果表明,该方法可行地实现了仿真系统稳定性和逼真度的折衷.

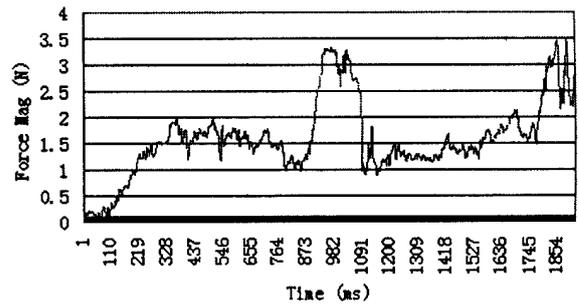


图 11 表面探测交互力信号

Fig.11 Force signal during surface probing

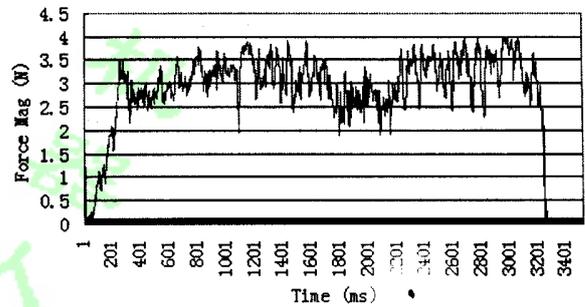


图 12 切削过程交互力信号

Fig.12 Force signal during cutting

5 结论 (Conclusion)

本文基于阻抗原理交互设备,讨论复杂形状物体感知和切削时振荡问题的产生原因和消除的方法.首先将复杂物体形状的感知和交互过程归结为动态单边约束的接触问题;然后通过分析力的时间和空间分布梯度,对比基本单边约束和复杂单边约束的区别,指出由于约束切换,导致力信号空间梯度过大,这是复杂单边约束交互产生振荡的原因;通过对虚拟力信号进行滤波,保证力信号空间梯度与力觉交互设备的阻抗范围相匹配,达到了消除振荡的目的.通过试验验证了该方法的有效性.未来的研究将探讨基于力的空间梯度修正方法对于力觉仿真系统逼真度的影响,对该方法进行优化.

参考文献 (References)

[1] Srinivasan M A, Basdogan C. Haptics in virtual environments: taxonomy, research status, and challenges[J]. Computer & Graphics, 1997, 21(4): 393 - 404.

[2] Adams R J, Hannaford B. Stable haptic interaction with virtual environments[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(3): 465 - 474