



力觉临场感遥操作机器人(3): 环境的动力学描述

摘要

力觉临场感遥操作机器人系统是一个典型的人-机-环交互系统.环境是遥操作机器人系统最终的环节,也是操作者感知和作用的对象,环境的动力学特性对整个遥操作机器人系统的控制性能会产生直接的影响.通过分析环境在力觉临场感遥操作机器人系统中的动力学特性,建立了环境在碰撞接触、线性平稳接触和非线性平稳接触3类情况下的动力学模型,并给出了模型的等效阻抗形式,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;环境;动力学;建模

中图分类号 TP242.3

文献标志码 A

0 引言

一个广义的力觉临场感遥操作机器人系统由5大部分组成:操作者(human operator)、主机械手(master manipulator)、从机械手(slave manipulator)、通信环节(communication line)和环境(environment)^[1],如图1所示.力觉临场感遥操作机器人系统不仅是一个人在回路(human-in-loop)的控制系统,而且也是一个典型的人-机-环交互系统,包括信号的双向交互与能量的双向交互^[2-3].环境是遥操作机器人系统最终的环节,也是操作者感知和作用的对象.环境的动力学特性对整个系统的稳定性会产生直接的影响,环境的任何变化都会改变整个系统的控制性能^[4-5].此外,如果力觉临场感遥操作机器人系统对某一类特定的环境是稳定的,并不能保证它同变化了的环境作用时亦能稳定.

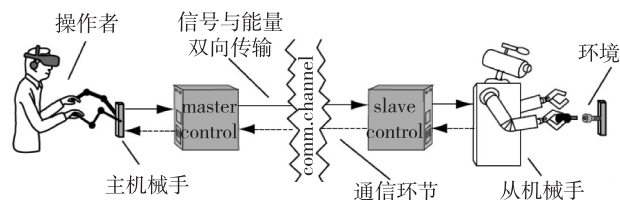


图1 力觉临场感遥操作机器人系统的组成

Fig. 1 Composition of a force telepresence teleoperation telerobot system

力觉临场感遥操作机器人系统中有关环境动力学特性研究方面的文献所占的比例较小,目前对环境动力学特性较为典型的分析是利用机械学和电学之间的等效关系建立环境的阻抗模型^[6-7].环境一般用一个典型的二阶系统即质量-弹簧-阻尼体表示.对环境动力学的描述主要针对于机械手和环境稳定接触下的线性情况.最早对环境动力学的详细描述是美国伊利诺伊大学香槟分校 Anderson 等^[8]将环境分为感性环境和容性环境进行动力学分析.所谓感性环境是指环境的惯性质量起主要的作用,容性环境是指环境的刚度起主要的作用.在此基础上,美国西北大学 Colgate 等^[9]经过分析证明与系统作用时最易产生不稳定的环境是纯惯性环境和纯刚性环境.

实际上,只考虑环境在同机械手稳定接触下的线性动力学行为

收稿日期 2014-03-06

资助项目 国家杰出青年科学基金(61325018);国家自然科学基金(61272379)

作者简介

宋爱国,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

对于力觉临场感遥操作机器人系统的控制性能分析是不够的,因为最易引起遥操作机器人系统不稳定或振荡行为的原因是机械手同环境相接触时发生的碰撞情况和环境的非线性行为.其次环境的动力学行为可能是多样性的,例如考虑如下一个例子:机械手去推动一个柔软的物体如皮球时,此时皮球的动力学可用其运动惯性质量和运动阻尼来表示,即运动动力学起主导作用;当机械手去夹取皮球时,则皮球的动力学应用其表面形变质量、形变刚度及形变阻尼来表示,即表面形变动力学起主导作用;当机械手夹取皮球并向前运动时,则皮球的运动动力学和形变动力学将同时起作用.

在虚拟现实技术中,虚拟环境的模型必须能反映真实环境的动力学特性,仅用单个的二阶质量-弹簧-阻尼体来建立环境的动力学模型是不够全面与准确的,需要一套更为准确的环境动力学模型来描述.因此,需要对环境的动力学特性作进一步的研究,不仅应考虑机械手与环境的碰撞接触时的动力学行为,而且要分析机械手与环境平稳接触时环境的非线性行为.本文的目的就是给出力觉临场感遥操作机器人系统中环境动力学的准确描述与不同情况下的动力学模型.

1 环境及任务的概念及特性

为了能清楚地分析力觉临场感遥操作机器人系统中环境的特征及动力学特性,首先必须给环境及其密切有关的任务下一个较为准确的定义.

定义 1 环境(environment)广义上是指力觉临场感遥操作机器人系统中,从边机器人活动的空间(work space)并包括有机器人操作的对象(object),如要感知与抓取的物体等,狭义上是指机器人操作的对象.

环境从其变化状态上可分为静态环境和动态环境.静态环境是指工作空间不变化,即环境知识是在执行任务前已知的和执行任务过程中不变化的(除工作对象有局部的变化外).动态环境是指环境的知识在执行任务之前或是全部未知,或是部分未知,在执行任务过程中还将不断变化.

力觉临场感遥操作机器人系统的实用性和灵活性正是体现在它能有效地工作在动态环境中.此外,与环境密切相关的一个概念就是任务.

定义 2 任务(task)是指环境(包括工作对象)的 2 种状态之间的差别,即执行任务前的环境起始

状态和执行任务后环境的终结状态之间的差别.

本文所讨论的环境动力学模型主要是指机器人感知与操作对象的动力学模型.

环境的特性有多方面,主要有几何特性和动力学特性.几何特性主要是指环境的结构、组成、体积、大小、形状等,它主要是视觉临场感技术所要研究的环境特性,而力觉临场感技术中主要研究的是环境的动力学特性.当然环境的动力学特性同其几何特性存在着密切的联系,这正如力觉临场感遥操作机器人系统和视觉临场感系统需要互为协调、配合,共同构成临场感系统一样.所谓环境的动力学特性主要是指操作对象的力和运动之间的关系,通常可以将运动作为环境动力学模型的输入量,力是环境动力学模型的输出量.

笔者认为环境的动力学特性应由 2 部分构成:环境的刚体运动动力学和环境柔性表面的形变动力学.环境的 2 种动力学特性,在机械手执行任务的过程中,有时独立地起作用,有时共同起作用.观察图 2 所示的一个典型的作业任务,即操作者控制机械手抓取插销,并移动到插槽处,将插销推入插槽中.

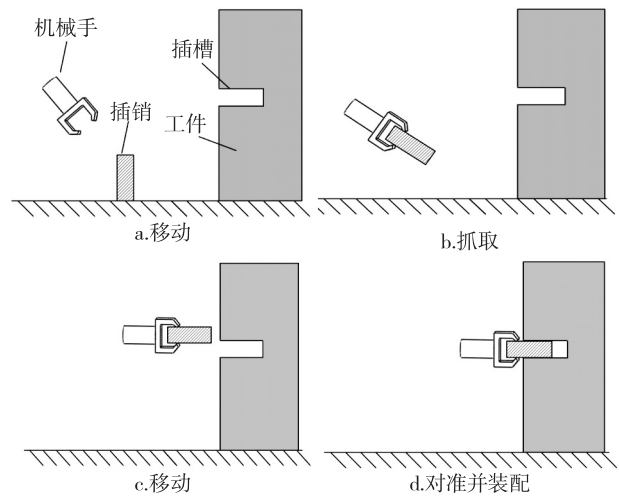


图 2 机械手执行插销入槽的任务过程

Fig. 2 Peg-in-hole process by a manipulator

图 2 表明机械手同环境的相互作用方式有 4 种:1) 无负载自由运动(图 2a);2) 无负载约束运动(图 2b),此时环境(插销)的形变动力学起作用;3) 有负载(质量负载)自由运动(图 2c),此时环境(插销)的运动动力学起主要作用;4) 有负载的约束运动(图 2d),此时环境(插销和工件)的形变动力学起主要作用.

如果将负载(插销)看作是机械手的一部分,则

上述4种方式可以归纳为2种情况:无负载的自由运动和无负载的约束运动。

2 机械手与环境的力交互过程分析

操作者操纵从机械手从无负载的自由运动到无负载的约束运动时,机械手与环境的接触可按照如下情况进行分析。

从机械手与环境接触点的多少,可以分为单点接触与多点接触2种情况,本文主要分析单点接触的情况,因为单点接触的情况可以比较容易地推广到多点接触的情况。

从机械手与环境的接触速度与相互作用力出发,可分为以下3种情况。

1) 碰撞接触:机械手以较大的相对速度接触到环境,并产生较大的冲击力,这是一个典型的非线性过程。碰撞接触通常出现在机械手与刚性环境的高速接触,如图3a所示。

2) 线性平稳接触:机械手以适宜的相对速度接触到环境,两者之间的力变化稳定,未产生明显的冲击力,环境动力学特性仍保持线性,如图3b所示。

3) 非线性平稳接触:机械手以适宜的相对速度接触到环境,两者之间的力变化稳定,未产生明显的冲击力,但是机械手与环境之间的作用力超过某个阈值,导致环境的动力学特性发生非线性变化。非线性平稳接触通常出现在机械手与柔性环境接触的情况下,由于柔性体受力后发生较大的变形,导致环境的动力学特性发生非线性的改变,如等效刚度、阻尼、惯性质量等产生非线性变化。

图3分别表示从机械手与环境接触的三类典型情况。

3 机械手与环境碰撞接触时,环境的非线性模型

力觉临场感遥操作机器人系统的特点在于通过机械手和环境的交互力反馈而使操作者感知到环境的动力学特征,因此碰撞接触是不可避免的一个过程。碰撞接触是一个瞬间现象且具有强烈的非线性,可采用 Hertz-type 模型^[10]来表示此过程:

$$f_e = \begin{cases} (1 + p \cdot \dot{u}) \cdot H \cdot u^{3/2}, & u \geq 0 \text{ 且 } \dot{u} \geq -\frac{1}{p}, \\ 0, & u < 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$u = x_s - x_e, \quad \dot{u} = \dot{x}_s - \dot{x}_e, \quad (2)$$

其中 x_s 、 x_e 分别为从机械手和环境的位置, f_e 为碰撞

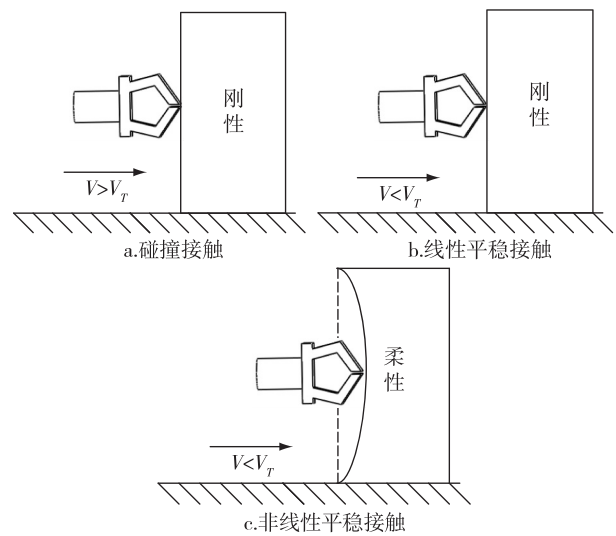


图3 从机械手与环境的接触的三类典型情况

Fig. 3 Three typical conditions in contact space, with for collision contact, for linear steady contact, and for nonlinear steady contact

接触力, p 为能量损失系数,且 $p \geq 0$, H 为 Hertz 排斥力系数,通常为一个很大的确定值,且 $H \geq 0$, H 的大小取决于机械手和环境的刚度。

图4和5为机械手以正弦运动方式与环境发生碰撞接触时,碰撞作用力的变化情况。当 $x \geq 0$ 时,机械手与环境发生接触。图5的正弦运动幅值(10 mm)是图4运动幅值(20 mm)的1/2。

图6和7为机械手以三角波形的运动方式与环境发生碰撞接触时,碰撞作用力的变化情况。图7的三角波形的运动幅值是图6运动幅值的1/2。

图4和5表明,当机械手以正弦运动方式与环境发生碰撞接触时,图4中机械手的运动速度以及与环境的接触位移是图5的2倍,但是机械手与环境的碰撞接触力是图5碰撞接触力的近3倍。同样,图6和7表明,当机械手以三角波形的运动方式与环境发生碰撞接触时,图6中机械手的运动速度以及与环境的接触位移是图7的2倍,但是机械手与环境的碰撞接触力是图7碰撞接触力的近3倍。

比较图4、5中的正弦运动与图6、7中的三角波形的运动,可以发现,在相同的接触位移情况下,正弦运动情况下的碰撞接触力的上升与下降速度大于三角波形运动的情况,而三角波形运动情况下的最大碰撞接触力大于正弦运动的情况,这表明碰撞速度和加速度共同影响碰撞接触力的大小。

由式(1)以及图4—7可知,影响碰撞过程碰撞

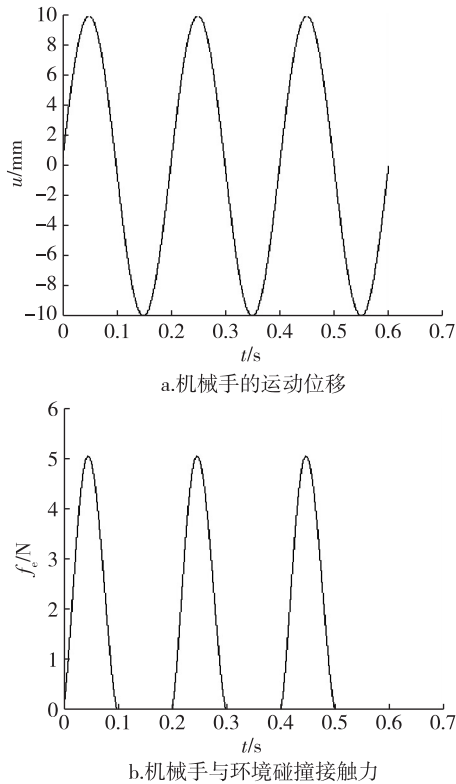


图4 机械手以正弦运动(幅值 20 mm)方式与环境发生碰撞接触时作用力的变化

Fig. 4 Vibrations of contact force when manipulators move in Sin,with for motion displacement,and for contact force

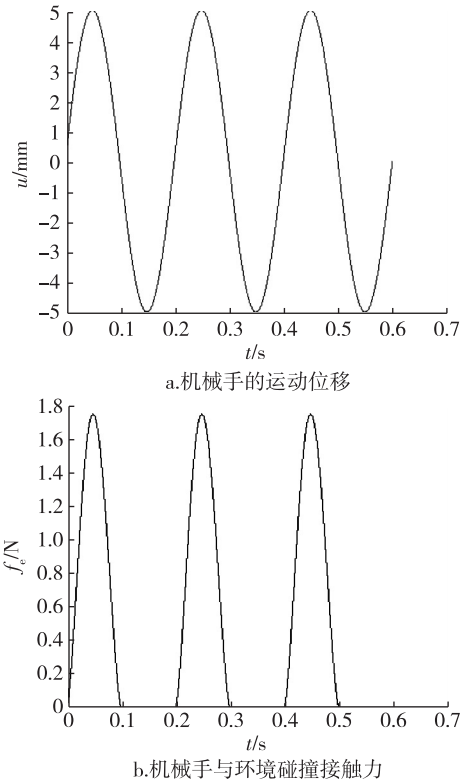


图5 机械手以正弦运动(幅值 10 mm)方式与环境发生碰撞接触时作用力的变化

Fig. 5 Vibrations of contact force when manipulators move in Sin,with for motion displacement,and for contact force

接触力强度的因素有 2 个,一个是机械手与环境之间的相对速度和加速度大小,另一个是 Hertz 排斥力系数 H ,而 H 的大小主要取决于机械手和环境的刚度.因此,可以采用降低机械手与环境之间的相对运动速度以及在机械手的末端加入柔性环节(如增加柔性薄膜或柔性关节等)2 种方法作为减少非线性碰撞的手段.

由于柔性环节的受力变形会造成主从机械手之间存在的位置跟踪误差,因此柔性环节的变形应尽可能地小.另一方面,碰撞过程中力和运动变化的频率很高,最容易造成系统的工作不稳定,而目前的力传感器的工作带宽不大,一般在 5 kHz 以下,无论是操作者或是计算机都难以对此过程准确感知和控制,因此目前最为有效的方法是采用机械手低速运行来减缓碰撞接触的非线性程度或避免碰撞接触.

4 机械手与环境平稳接触时,环境的线性模型

原有的环境动力学描述,主要是针对平稳接触

下环境的线性行为,尽管它们对某一特定过程的分析比较适用,但却不具有普遍意义,其原因在于这些环境的线性模型没有考虑到环境刚体运动动力学和环境表面形变动力学之间的差别和联系.

假定在机械手同环境平稳接触过程中,机械手与环境均未受到损坏,且环境的受力变形处于线性工作区,本文认为环境动力学特性不仅具有刚体的运动动力学特性,而且具有柔性表面的形变动力学特性.环境的线性动力学可表示为 2 个级联的二阶弹簧-质量-阻尼体,如图 8 所示.

图 8 中, m_1 、 b_1 、 k_1 分别表示环境的柔性表面的形变动力学参数(惯性质量、阻尼系数和弹性系数), M_2 、 b_2 、 k_2 分别表示环境的刚体运动动力学参数(惯性质量、阻尼系数和弹性系数). x_1 为环境表面在以环境质心为原点的动坐标系中的位移(即表面相对于质心的变形量), x_2 为环境质心的位移,则环境的形变动力学特性和运动动力学特性可分别用下面 2 个动力学方程描述:

$$f_c = m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1, \tag{3}$$

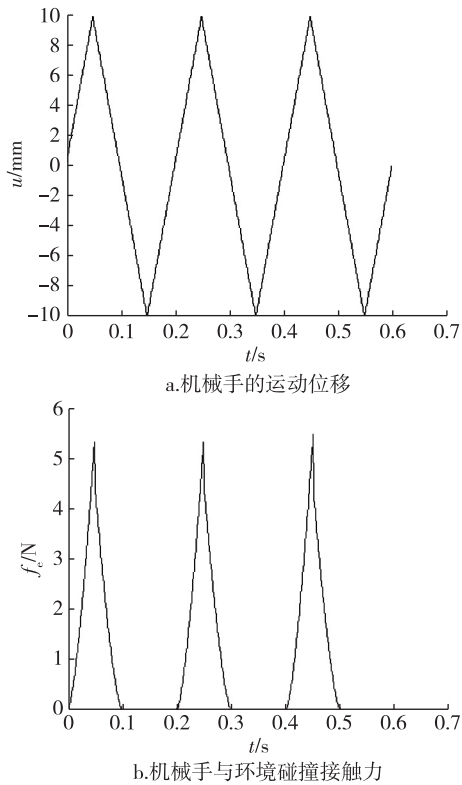


图6 机械手以三角波形的运动方式(幅值 20 mm)与环境发生碰撞接触时作用力的变化

Fig. 6 Vibrations of contact force when manipulators move in Triangle, with for motion displacement, and for contact force

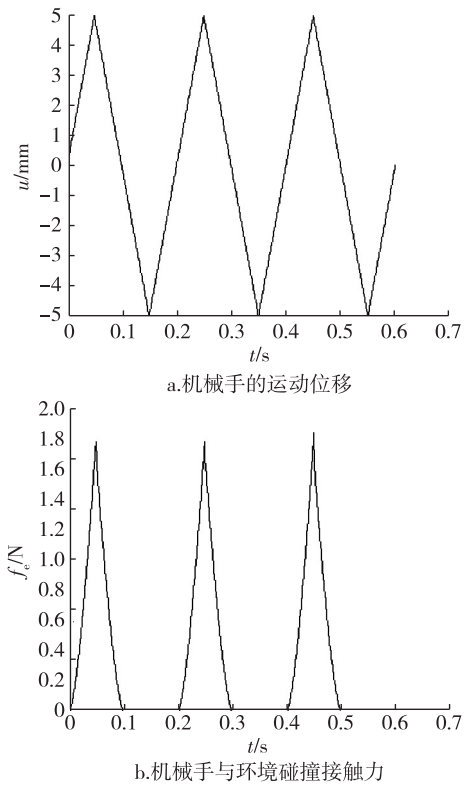


图7 机械手以三角波形的运动方式(幅值 10 mm)与环境发生碰撞接触时作用力的变化

Fig. 7 Vibrations of contact force when manipulators move in Triangle, with for motion displacement, and for contact force

$$f_e = M_2 \ddot{x}_2 + b_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2, \quad (4)$$

$$x_e = x_1 + x_2, \quad (5)$$

式中, f_e 为从机械手末端对环境的作用力, x_e 为环境总的位移。

对于有负载自由运行状态(例如机械手推动工作对象到指定位置处且不受到其他物体阻碍), 此时有 $m_1=0, b_1=0, k_1 \rightarrow \infty, x_1=0, x_e=x_2$, 环境的刚体运动动力学起主要作用。

对于无负载约束运动(例如机械手对一固定的工件施加一定的接触力), 此时有 $M_2 \rightarrow \infty, x_2=0, x_e=x_1$, 环境的形变动力学起主要作用。

为了分析的方便, 本文利用机械系统和电路系统的如下等效关系, 建立环境的阻抗模型。

- 质量 $m \leftrightarrow$ 电感 L ,
 - 阻尼 $b \leftrightarrow$ 电阻 R ,
 - 弹性系数 $k \leftrightarrow$ 电容 $1/C$,
 - 力 $F \leftrightarrow$ 电压 U ,
 - 速度 $V \leftrightarrow$ 电流 I 。
- 对式(3)—(5)两端取拉氏变换, 并用 u 代替 f, i

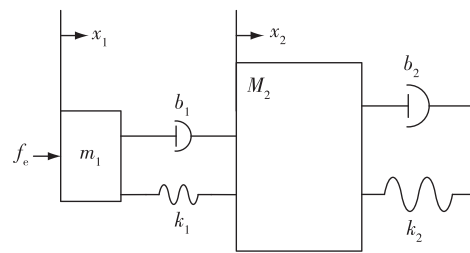


图8 环境的线性动力学描述

Fig. 8 Linear dynamics of environment

代替 \dot{x} , 得

$$U_e(s) = (m_1 s + b_1 + k_1/s) I_1(s) \stackrel{\text{def}}{=} Z_1(s) I_1(s), \quad (6)$$

$$U_e(s) = (M_2 s + b_2 + k_2/s) I_2(s) \stackrel{\text{def}}{=} Z_2(s) I_2(s), \quad (7)$$

$$I_e(s) = I_1(s) + I_2(s), \quad (8)$$

$Z_1(s), Z_2(s)$ 分别定义为环境的形变动力学等效阻抗和刚体运动动力学等效阻抗. 环境动力学阻抗 $Z_e(s)$ 可表示为

$$Z_e(s) = \frac{U_e(s)}{I_e(s)} = Z_1(s) // Z_2(s), \quad (9)$$

因此,环境动力学阻抗 $Z_e(s)$ 是形变动力学阻抗 $Z_1(s)$ 和刚体运动动力学阻抗 $Z_2(s)$ 的并联.

当 $Z_1(s) \rightarrow \infty$ 时, $Z_e(s) \approx Z_2(s)$, 此时对应于有负载的自由运动情况.

当 $Z_2(s) \rightarrow \infty$ 时, $Z_e(s) \approx Z_1(s)$, 此时对应于无负载的受限运动情况.

在平稳接触下, $Z_1(s)$ 和 $Z_2(s)$ 都为线性时不变阻抗, 因此 $Z_e(s)$ 也为线性时不变阻抗.

5 机械手与环境平稳接触时,环境的非线性模型

机械手与环境平稳接触的非线性行为一般是机械手与环境之间的作用力超过某个阈值时, 导致环境的动力学特性产生非线性变化, 由于非线性平稳接触通常出现在机械手与柔性环境接触的情况下, 所以本文主要以柔性物体作为对象进行分析^[11-12].

当机械手以一定的相对速度接触到柔性环境时, 柔性体受力后发生较大的变形, 导致环境的等效刚度、阻尼、惯性质量等动力学参数产生非线性变化^[13]. 为了准确描述柔性环境的这种非线性动力学行为, 本文用均匀分布的二阶弹簧-质量-阻尼体来表示柔性环境的形变动力学特性.

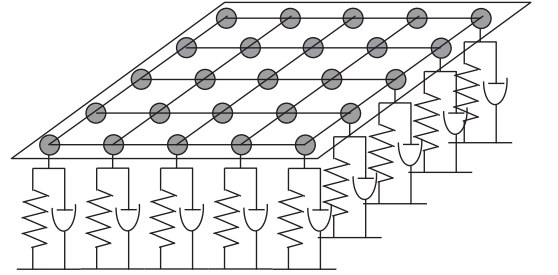
图9为本文所建立的柔性环境的动力学模型, 环境的表面均匀分布着大量相等的二阶弹簧-质量-阻尼体, 每个圆点代表一个质量体, 称为质点. 2个相邻的质点之间的物理联接用联接线段表示. 任意一个质点的受力变形都会造成相邻几个质点发生一定程度的变形. 环境的动力学行为就是所有均匀分布的二阶弹簧-质量-阻尼体共同作用的结果.

为了分析方便, 将位移作为环境的输入量, 力作为环境的输出量, 并定义机械手与环境接触的受力点为第1个质点位置, 其他质点按照与第1个质点的距离从小到大给出序号. 假设每个质点都是同样的二阶弹簧-质量-阻尼体, 即每个质点的等效阻抗都为 $Z(s)$, 机械手与环境接触的受力点即第1个质点的位移为 x_e , 因此, 可以给出环境动力学的等效阻抗表达式如下:

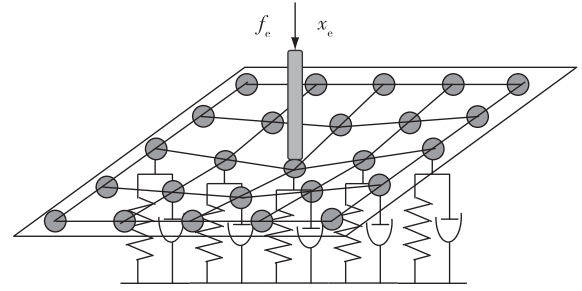
$$Z_e(s) = \frac{U_e(s)}{I_e(s)} = \frac{I_e(s)Z(s) + I_e(s)h_2Z(s) + \dots + I_e(s)h_NZ(s)}{I_e(s)}, \quad (10)$$

$$Z_e(s) = Z(s) + h_2Z(s) + h_3Z(s) + \dots + h_NZ(s), \quad (11)$$

其中, N 表示质点的总数, $h_i (i=2, 3, \dots, N)$ 表示第 i



a. 均匀分布的二阶弹簧-质量-阻尼体



b. 环境一点受力变形的情况

图9 环境的非线性动力学模型

Fig. 9 Nonlinear dynamics of environment, with for uniformly distributed second order spring-particle-damper, and for environment-point stress deformation

个质点的位移传递衰减系数, 也就是第1质点发生形变位移后导致与它相邻的第 i 个点发生变形位移的程度, 即

$$h_i = \frac{x_i}{x_e}, \quad (12)$$

因为 x_i 是由于 x_e 所引起的, 所以 $h_i \in [0, 1]$.

为了避免 N 过大造成环境动力学等效阻抗计算过于复杂与耗时, 采用如下的分层结构来简化环境动力学等效阻抗的计算过程. 将机械手与环境接触的受力点即第1个质点作为第1层, 将与第1个质点距离最小的4个质点作为第2层, 将第2层以外与第1个质点距离最小的4个质点作为第3层, 将第3层以外与第1个质点距离最小的4个质点作为第4层, 将第4层以外与第1个质点距离最小的8个质点作为第5层, 以此类推, 可以将 N 个质点按照与中心受力点即第1个质点距离的远近分成 M 层, 如图10所示.

因此, 式(11)可以改写为

$$Z_e(s) = Z(s) \left(1 + \sum_{i \in \text{layer2}} h_i + \sum_{i \in \text{layer3}} h_i + \dots + \sum_{i \in \text{layerM}} h_i \right). \quad (13)$$

为了实现快速准确的环境动力学等效阻抗建模计算, 必须确定需要计算到哪一层. 本文只考虑各向

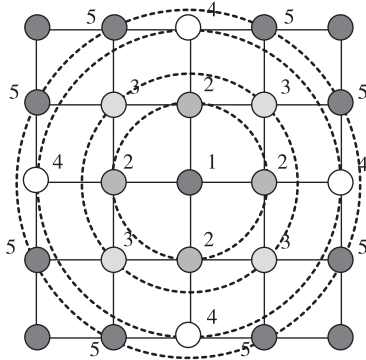


图 10 环境的分层描述非线性动力学模型

Fig. 10 Nonlinear dynamic model of environment by hierarchical description

同性的柔性环境情况,当柔性物体受到点接触力后的表面变形可以用一个锥形凹陷来描述^[14],其剖面如图 11 所示.柔性环境表面受点接触力后发生锥形凹陷区域的半径 r 可计算如下:

$$r = x_e \tan \theta, \quad (14)$$

其中, θ 定义为柔性环境的受力变形角,它是与柔性环境的特性有关的一个常数, θ 越大,环境的柔性也越大.

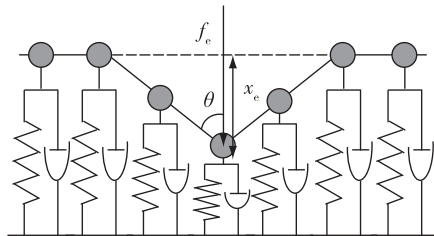


图 11 柔性环境受力变形时各质点的位移关系

Fig. 11 Displacement relationship between particles for soft environment under deformation

令位于锥形凹陷区域半径 r 之内的最大分层数为 T ,则式(13)可进一步表达如下:

$$Z_e(s) = Z(s) \left(1 + \sum_{j=2}^T \sum_{i \in \text{layer } j} h_i \right), \quad (15)$$

$$h_i = \frac{x_i}{x_e} = \frac{x_e - d_i / \tan \theta}{x_e} = 1 - \frac{d_i}{x_e \tan \theta}, \quad (16)$$

d_i 为环境受力变形前的第 i 个质点到第 1 个质点的距离.因此可得:

$$Z_e(s) = Z(s) \left(1 + \sum_{j=2}^T \sum_{i \in \text{layer } j} \left(1 - \frac{d_i}{x_e \tan \theta} \right) \right), \quad (17)$$

式(17)表明柔性环境的动力学等效阻抗是一个与环境接触变形位移 x_e 相关的非线性阻抗.接触变形位

移 x_e 越大,环境的动力学等效阻抗也越大.

图 12 为利用式(17)的动力学阻抗模型对机械手与非线性柔性环境平稳时接触力计算的结果.其中,图 12a 中环境非线性模型参数设置为 $\theta = 40^\circ$,每个质点之间距离 $d = 1 \text{ cm}$,每个质点的等效刚度 $k = 100 \text{ N/m}$.图 12b 中环境非线性模型参数设置为 $\theta = 60^\circ$,每个质点之间距离 $d = 1 \text{ cm}$,每个质点的等效刚度 $k = 100 \text{ N/m}$.

图 12 表明机械手与柔性环境的接触力随接触位移的增加而迅速增大.在同等情况下,环境的柔性越大(即 θ 越大),这种非线性越强.

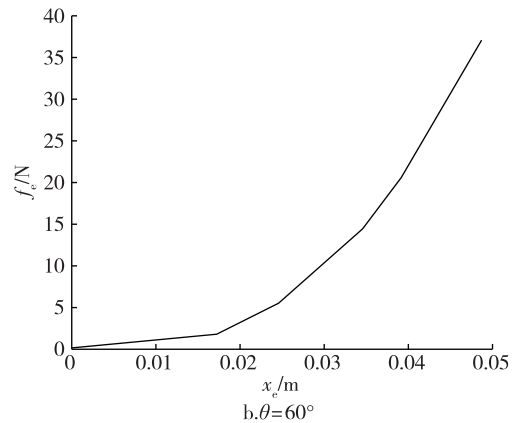
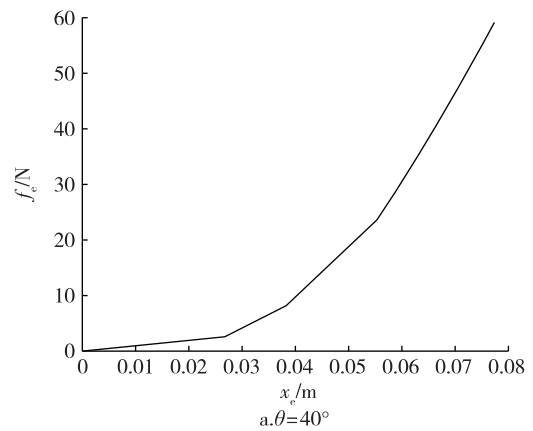


图 12 机械手与非线性柔性环境平稳时接触力的非线性变化

Fig. 12 Nonlinear change of contact force when manipulators stably contact nonlinear soft environment

6 结论

本文通过分析环境在力觉临场感遥操作机器人系统中的动力学特性,建立了环境在碰撞接触、线性平稳接触和非线性平稳接触 3 类情况下的动力学模型.用 Hertz-type 模型来描述机械手与环境碰撞接触时的强非线性动力学,认为柔性环节的加入能够减

少这种非线性过程对稳定性的影响.建立了机械手与环境平稳接触时环境动力学的线性等效阻抗模型,它是刚体运动阻抗和形变阻抗的并联形式,并分析了不同作业方式下2种动力学的作用.分析了机械手与环境平稳接触时,环境的非线性动力学行为,建立了机械手与环境平稳接触时环境的分层非线性阻抗模型,它是一个与环境接触变形位移相关的非线性阻抗.本文建立的环境动力学模型同以往的环境动力学模型相比,具有物理意义清晰、模型结构简单、准确的特点,为力觉临场感遥操作机器人系统的分析和虚拟环境技术中的力触觉实时再现提供了理论基础.

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 & 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/robot interaction via the transfer of power and information signals. I: Dynamics and control analysis. II: An experiment analysis[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989, 3: 1632-1647
- [4] Li H J, Song A G. Virtual-environment modeling and correction for force-reflecting teleoperation with time delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1227-1233
- [5] Sirosypour S. Modeling and control of cooperative teleoperation systems [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(6): 1220-1225
- [6] Hogan N. Controlling impedance at the man-machine interface [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989: 219-224
- [7] 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
- [8] Anderson R J, Spong M W. Hybrid impedance control of robotic manipulators [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(5): 549-556
- [9] Colgate J E, Hogan N. An analysis of contact instability in terms of passive physical equivalents [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989, 1: 404-409
- [10] Shoji Y, Inaba M, Fukuda T, et al. Stable contact force control of a link manipulator with collision phenomena [C] // Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1990, 1: 501-507
- [11] Song A G, Morris D, Colgate J E, et al. Real time stiffness display interface device for perception of virtual soft object [C] // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005: 139-143
- [12] 吴涓,宋爱国,李建清.用于虚拟力觉再现的弹簧-质点力/变形模型研究[J].系统仿真学报,2006,18(11):3152-3156
WU Juan, SONG Aiguo, LI Jianqing. Research on mass-spring force/deformation modeling for Haptic display [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3152-3156
- [13] Cui T, Song A G, Wu J. A mass-spring model for haptic display of flexible object global deformation [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2007: 2753-2757
- [14] Song A G, Morris D, Colgate J E. Haptic telemanipulation of soft environment without direct force feedback [C] // Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Information Acquisition, 2005: 21-25

Force telepresence telerobot(3): Environment dynamics modeling

SONG Aiguo¹ MA Junqing¹

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

Abstract The force telepresence telerobot system is a typical human-robot-environment-interaction system. The environment as a terminal unit of the whole teleoperation system is the object perceived and manipulated by the telerobot. The environment dynamics directly affects the control performance of the teleoperation system. This paper analyzes the characteristics of environment dynamics, then proposes three kinds of dynamics models of environment under three contact conditions such as collision contact, linear steady contact, and non-linear steady contact, and gives their equivalent impedance forms, respectively. The research results in this paper provide a basis for the force telepresence telerobot system analyzing.

Key words force telepresence; teleoperation; environment; dynamic; modeling