

# 基于虚拟现实的机器人遥操作关键技术研究\*

倪得晶, 宋爱国, 李会军

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

**摘要:** 机器人遥操作是实现空间、医疗及深海等领域作业的重要手段, 基于虚拟现实的机器人遥操作是克服时延的有效方法, 具有透明性强、稳定性高的优点, 成为当前机器人遥操作的主要方式。首先分析了基于虚拟现实的机器人遥操作系统的关键组成部分, 并对其关键模块的具体作用进行了介绍; 其次, 归纳分析了各类虚拟现实环境建模方法, 主要从几何建模和动力学建模方面展开, 阐述了每种方法的应用领域、主要特点; 此外, 进一步分析了遥操作虚拟夹具设计的构建方法及适用领域。最后对当前存在的难点进行总结, 指出今后研究的思路。

**关键词:** 虚拟现实; 遥操作; 环境建模; 虚拟夹具

**中图分类号:** TP242.3 TP249 V11 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.10 460.40

## Survey on robot teleoperation based on virtual reality

Ni Dejing, Song Aiguo, Li Huijun

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

**Abstract:** Robot teleoperation is the key technology to implement tasks in space, telesurgery, deep ocean areas. Robot teleoperation based on virtual reality is an efficient way to overcome the time delay problem, which can provide with a teleoperation with high-transparency and strong-stability performance, and it is currently the main way to realize robot teleoperation. Firstly, the key components of the robot teleoperation system based on virtual reality are analyzed, and the function of each module is introduced. Secondly, methods to realize virtual reality environment modelling are reviewed, including the geometric modelling and the dynamic modelling methods. The performance of each modelling method is analyzed. Besides, the construction methods and application areas of virtual fixtures are discussed. Furthermore, current problems in this area are summarized and analyzed, and some research directions are proposed.

**Keywords:** virtual reality; teleoperation; environment modelling; virtual fixture

## 0 引言

近年来随着空间探索、深海开发、核辐射探测、医疗机器人等领域的快速发展, 人类亟需智能机器人完成自主作业。虽然智能机器人领域已有较大突破, 但是受制于现有传感、机构、控制等技术, 研究出能在未知环境中自主作业的智能机器人仍是长期内难以实现的。因此, 人与机器人交互式遥操作技术是实现远程复杂环境作业的主要手段<sup>[1]</sup>。

交互式遥操作系统主要由5个部分构成<sup>[2]</sup>, 包括操作者、主端控制回路、通信链路、从端控制回路及机器人。

在遥操作作业过程中, 操作者通过主端控制回路, 经由通信链路, 向从端发出控制指令, 从端控制回路接收指令控制机器人完成作业, 同时将机器人与环境的交互信息反馈给主端, 帮助操作者了解环境状况, 并做出进一步的规划和决策。良好的交互式遥操作系统不仅可以高效地实现危险作业, 而且可以让操作者感受机器人与环境交互时的“感受”, 在本地端实现“临场感”<sup>[3]</sup>操作。

然而, 由于主端与从端地理位置的差异, 时延成为影响遥操作系统性能不可避免的因素之一。在遥操作应用领域, 时延可由100 ms到数十秒<sup>[4]</sup>, 这不仅降低了遥操作系统的稳定性、影响操作性能, 而且极大地弱化了操作

者的临场感受。为了消除时延问题带来的负面影响,研究者们一方面优化遥操作控制算法<sup>[5]</sup>,提高系统的稳定性,一方面探索其他方法降低时延对遥操作临场感的影响。

随着人机交互设备的研制、计算机运算性能的提升、图形学的发展,虚拟现实技术<sup>[6]</sup>(virtual reality, VR)作为提升临场感的关键技术被应用到遥操作中。通过虚拟现实技术,可在主端模拟一个类似从端的三维虚拟世界。假想在遥操作系统中,结合预知信息与从端反馈的多种传感器信息,在主端重构一个与从端环境完全一致的虚拟现实环境,操作者直接通过人机交互设备与虚拟现实环境交互,即时产生视觉、听觉、触觉、力觉等感官感受,同时,交互指令被同步发送到从端,这样便可忽略时延的消极影响,实现真正的无时延交互。

鉴于基于虚拟现实的机器人遥操作的重大意义及应用前景,各国研究机构纷纷对该领域进行了深入的探索<sup>[7-8]</sup>。本文将调研虚拟现实技术在遥操作领域应用的基础架构,分析归纳该领域研究的关键技术,并探究基于虚拟现实的遥操作机器人发展方向。

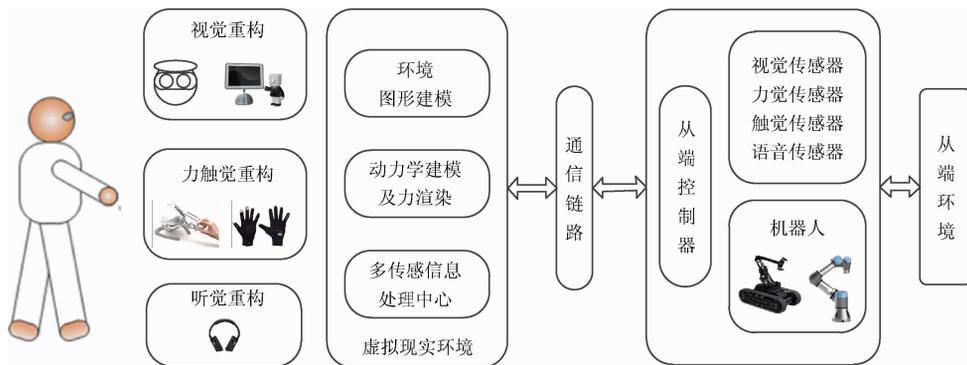


图1 基于虚拟现实的遥操作系统基本组成

Fig.1 Components of the robot teleoperation system based on VR

机器人位于从端环境。从端控制回路接收主端执行指令,并驱动机器人完成作业。从端环境可安装视觉传感器、力触觉传感器、位置传感器等,传感器采集机器人与环境的交互信号,并将其通过通信链路反馈给主端,结合预知信息实现虚拟现实环境建模。

基于虚拟现实的遥操作系统主要难点如下:

- 1) 如何结合预知信息,根据多种反馈信息实现未知环境的虚拟现实环境的几何建模、动力学建模;
- 2) 对于非结构化、未知环境,当环境变化时,如何在线辨识模型参数;
- 3) 在环境建模的过程中,当主端环境模型与从端环境模型出现偏差时,如何实现模型偏差修正;
- 4) 人的生理因素,主要有身体抖动、心理压力大等因素,都会造成操作者输入错误指令,根据作业任务的不同,如何在虚拟现实环境中设计虚拟夹具。

## 1 基于虚拟现实的遥操作系统组成及难点

基于虚拟现实的机器人遥操作是解决时延问题的有效手段,因此被广泛应用到多作业领域<sup>[9-11]</sup>。鉴于基于虚拟现实的遥操作系统的成功应用,遥操作中的关键技术需要进行深入调研,首先需要对系统框架进行分析。图1所示为系统的基本组成部分<sup>[12]</sup>,主要包括操作者、人机交互设备、虚拟现实环境、通信链路、从端控制回路、从端机器人、多种传感器、环境。人机交互设备为操作者提供虚拟现实环境交互接口,操作者通过人机交互设备输入机器人控制指令,并通过虚拟现实环境获得视、力触、听觉的反馈,产生临场感。虚拟现实环境建模,首先分析从端反馈的多传感器信息,然后结合预知信息完成真实环境的图形化渲染表达、环境动力学建模及力触觉渲染。通过构建与真实环境一致的虚拟现实环境,实现机器人遥操作系统的稳定性、透明性。

## 2 虚拟现实环境几何建模技术

虚拟现实环境几何建模是指重构从端环境几何特性,包括机器人系统的建模,真实环境的纹理、形状、尺寸、位置等。精准的几何建模是基于虚拟现实的机器人遥操作的关键保证。20世纪末到21世纪初,遥操作多应用于预定义环境,通过预定义几何模型实现作业任务<sup>[13-15]</sup>,详细的前期调研可参考文献<sup>[16]</sup>。然而,遥操作的作业任务多针对未知环境,预先建模不现实。近年来,随着传感器技术的发展,未知环境的几何信息更易精确获取,因此本文将对未知环境下虚拟现实环境建模进行调研。

为了实现虚拟现实环境的构建,环境的几何信息以及外观纹理信息必不可少。获取环境几何信息不仅受制

于计算机视觉的发展,而且依赖于传感器技术的发展。早期视频信息作为远端环境描述的主要方式,虚拟现实环境几何建模的精度主要依赖于图像的三维重构算法。1997年,NASA<sup>[17]</sup>发射的火星探测器,通过立体视觉传感器采集火星表面的立体图像,并在地面端离线实现了火星表面虚拟现实环境的几何建模;2000年,Barth M 等人<sup>[18]</sup>使用双目摄像机采集环境图像,通过基于边缘提取物体识别的方法及坐标配准技术,分别对作业背景及目标物体进行了几何建模,实现了从端环境的实时三维重构;2005年,Cobzas D 等人<sup>[19]</sup>使用单目摄像头并通过基于运动流恢复立体信息的方法,实现了虚拟环境几何建模。近年来,计算机视觉领域取得一定的进步,基于图像恢复的三维重构也在环境几何重构上得到了更多的应用<sup>[20-23]</sup>,然而对于大时延下的遥控操作领域的适用性仍需要探索。

同时,一些研究者考虑到在实际应用过程中,物体之间可能存在遮挡、摄像头校准误差大等情况,通过二维图像恢复三维信息难以精确实现。因此,他们考虑将图像信息与距离传感器结合获得几何模型。2009年 Kelly A 等人<sup>[24]</sup>结合激光测距雷达与摄像头,通过坐标配准,实现了远端动态环境的几何模型重构。

近年来,三维扫描传感器得到了飞速发展,基于结构光、三维激光等立体视觉传感器,可直接用于获取环境三维信息。2014年,Xu X 等人<sup>[25]</sup>将微软推出的 Kinect 摄像头用于遥控操作虚拟环境重构,该传感器可直接获取环境纹理信息及三维点云数据,为虚拟现实环境的几何重构提供了很大的便利;2016年,东南大学 Ni D 等人<sup>[26]</sup>通过配准三维点云数据,实现了从端大场景虚拟现实环境重构。

### 3 环境动力学建模与参数辨识

遥控操作系统中,力触觉反馈信息是实现透明化操作的重要依赖。因此,重构机器人与环境交互的动力学信息至关重要。由于先前的调研大多集中在静态一维碰撞动力学模型,与真实遥控操作系统有所偏差,本文将拓展该领域的调研,分别从静态环境动力学建模、动态环境动力学建模、线性模型参数估计、非线性模型参数估计、模型偏差修正等方面展开详细调研。

#### 3.1 静态环境动力学建模

##### 3.1.1 一维碰撞动力学建模

关于一维碰撞动力学建模的方法已有详实的调研<sup>[27]</sup>,其中弹簧-阻尼-质子线性模型, Kelvin-Voigt 线性模型, Hunt-Crossley 非线性模型在环境动力学建模中得到了广泛的应用,其表达式如下。

弹簧-阻尼-质子线性模型:

$$f(t) = kx(t) + b\dot{x}(t) + m\ddot{x}(t) \quad (1)$$

Kelvin-Voigt 线性模型:

$$f(t) = \begin{cases} kx(t) + b\dot{x}(t), & x(t) \geq 0 \\ 0, & x(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Hunt-Crossley 非线性模型:

$$f(t) = \begin{cases} kx^n(t) + b\dot{x}(t)x^n(t), & x(t) \geq 0 \\ 0, & x(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中; $f(t)$ 表示简化的机器人端点与环境表面的接触力, $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $\ddot{x}(t)$ 分别为机器人端点刺入物体表面位移、速度、加速度。

弹簧-阻尼-质子线性模型对碰撞建模具有自由度、高、线性的特性,虽然可以保证建模的准确性,但由于加速度项的存在,系统容易不稳定。Kelvin-Voigt 线性模型对理想的碰撞建模比较简单方便,更适用于刚性碰撞。Hunt-Crossley 非线性模型含有刺入深度与速度耦合项,更适用于软接触的碰撞过程。

然而,由于传统的 Kelvin-Voigt 线性模型和 Hunt-Crossley 非线性模型存在碰撞初期能量不连续的特性,与真实碰撞情况不相符,Achhammer A 等人<sup>[28]</sup>对这两种模型分别进行分段优化,保证碰撞开始瞬间能量守恒。优化的 Kelvin-Voigt 线性模型为:

$$f(t) = \begin{cases} kx(t) + b\dot{x}(t), & x(t) \geq 0 \ \& \ \dot{x}(t) \geq 0 \\ kx(t), & x(t) \geq 0 \ \& \ \dot{x}(t) < 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

优化的 Hunt-Crossley 非线性模型:

$$f(t) = \begin{cases} kx^n(t) + b\dot{x}(t)x^n(t), & x(t) \geq 0 \ \& \ \dot{x}(t) \geq 0 \\ kx^n(t), & x(t) \geq 0 \ \& \ \dot{x}(t) < 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

优化后的 Kelvin-Voigt 模型和 Hunt-Crossley 模型不仅保留了其传统特性,而且保证了能量守恒,因此,可以更真实地反映碰撞过程。

##### 3.1.2 多维碰撞力建模

当遥控操作交互环境具有复杂易变形的特性时,简单的一维碰撞模型并不能对环境动力学进行精确建模。力学中的多点弹簧-阻尼-质子模型及有限元分析方法,虽然可以有效拟合易变形物体的动力学模型,但是参数估计是难以解决的问题。Xu X 等人<sup>[29]</sup>通过对环境进行部分假设,包括环境为弹性模型、各项同性、环境单元点间无交互力等,采用六阶径向函数多项式拟合局部曲面,提出基于径向函数的可变形环境动力学线性模型,并从法向和切向方向分别进行动力学建模。

如图 2(a)所示,机器人与环境交互刺入深度定义为 $z_{\max}$ , $R$ 是由环境材料决定的局部变形半径, $z(r)$ 为环境局

部曲面描述,其中 $z$ 正比于 $1/r$ , $c$ 由环境材料决定,形变曲面描述公式如下:

$$z(r) = \begin{cases} c \cdot (R^2 - r^2)^3, & r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases} \quad (6)$$

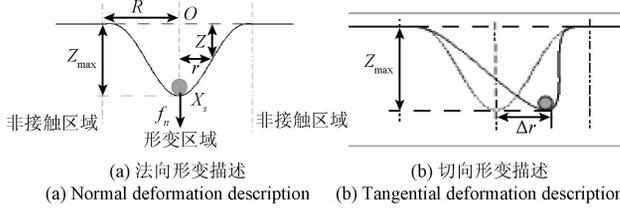


图2 多维碰撞力建模

Fig. 2 Modelling of multidimensional contact forces

法向动力学模型采用二阶弹簧-阻尼模型实现, $v_s^n$ 为法向速度。

$$\hat{f}_s^n = k_1 \cdot z_{\max} + k_2 \cdot z_{\max}^2 + b \cdot v_s^n \quad (7)$$

切向动力学模型主要考虑了在法向刺入方向为基准的侧向位移 $\Delta r$ ,如图2(b)所示,该侧向位移计算主要采用了一种剪切算法,引入剪切参量 $s$ 来描述物体切向形变,该参量由切向受力以及材料属性决定。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & s \\ 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (8)$$

切向动力学模型也采用了二阶弹簧-阻尼模型实现, $v_s^t$ 为切向速度。

$$\hat{f}_s^t = k_1 \cdot \Delta r + k_2 \cdot (\Delta r)^2 + b \cdot v_s^t \quad (9)$$

$$\Delta r|_{z=z_{\max}} = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}|_{z=z_{\max}} \quad (10)$$

与复杂易变形的环境交互过程中,碰撞力建模及在虚拟现实环境中实现碰撞形变重构是难点,Xu X通过上述方法不仅可以实现碰撞力建模,而且可实现物体变形部分的几何重构。虽然该方法主要基于部分前提假设,但不失为该方向的有效尝试。

### 3.2 动态环境动力学建模

早期的遥操作系统多只考虑静态环境碰撞动力学建模,而实际上环境中大部分对象是可移动的物体。由于环境对象受力的复杂性(包括碰撞力、摩擦力等)以及几何模型的不规则性,导致动态环境对象的动力学建模难度极高。目前该方向的少量研究,主要针对环境对象为规则物体、运动为平面运动(平动和转动)的情况,且只考虑摩擦力对环境动力学建模的影响。

#### 3.2.1 平动环境动力学建模

Richard D<sup>[30]</sup>最早在进行遥操作摩擦力建模及其力触觉渲染方法的研究中提出动态环境动力学建模问题。由于环境对象运动摩擦力不能直接测得,且摩擦力在物体静、动状态的属性不同,因此动力学建模必须综合考虑

环境对象的运动状态及整体受力情况。Richard D首先对摩擦力模型进行了分析比较,包括库伦模型、Karnopp模型<sup>[31]</sup>、Dahl模型<sup>[32]</sup>,然后兼顾遥操作从端设备精度,提出了改进的Karnopp模型,如下:

$$f_{\text{friction}} = \begin{cases} C_n \text{sgn}(\dot{x}) + b_n \dot{x}, & \dot{x} < -\Delta v \\ \max(D_n, F), & -\Delta v < \dot{x} < 0 \\ \min(D_p, F), & 0 < \dot{x} < \Delta v \\ C_p \text{sgn}(\dot{x}) + b_p \dot{x}, & \dot{x} > \Delta v \end{cases} \quad (11)$$

式中: $C_p$ 和 $C_n$ 分别代表正反向动摩擦力值, $b_p$ 和 $b_n$ 表示动摩擦粘滞系数, $\dot{x}$ 为交互对象与接触面的相对速度, $D_p$ 和 $D_n$ 表示正反向静摩擦力, $F$ 为环境对象除摩擦力外其他受力的总和。作者只考虑了平行于接触面,沿正方体物体轴线方向的推动运动。其中 $D_p$ 和 $D_n$ 由位置传感器精度和经验值决定,其他参数需通过整体动力学建模分析,平动物体动力学模型如下:

$$F = Ma + C_p \text{sgn}(vel_p) + b_p vel_p + C_n \text{sgn}(vel_n) + b_n vel_n \quad (12)$$

式中: $F$ 为施加在物体上的交互力, $M$ 为环境对象质量, $vel_p$ 和 $vel_n$ 分别为正向速度和反向速度。

#### 3.2.2 转动环境动力学建模

近年来,Xu X等人<sup>[33]</sup>采用了Richard D提出的方法进行动态环境物体动力学建模,此外他提出了转动物体动力学建模,主要对正方体对象进行了方法研究,所采用的物体转动动力学模型如下:

$$M = I \cdot \dot{\omega} + e \cdot \text{sgn}(\omega) \quad (13)$$

式中: $M$ 为机器人施加在物体上的转矩, $I$ 为物体的转动惯量, $\omega$ 为物体角速度, $e$ 为由接触面摩擦力产生的转矩。

动态环境动力学建模不仅需考虑局部碰撞过程,而且需结合对象质量、几何结构、运动状态等因素,因此该方向的研究需基于特定的假设进行。

### 3.3 参数在线辨识技术

在遥操作系统中,环境的动力学特性并不能在最初准确获取。因此,为使环境动力学模型能实时描述真实环境,遥操作系统必须具有参数在线辨识的能力。本文对遥操作领域中参数在线辨识技术进行总结。

#### 3.3.1 线性模型参数辨识

由于线性模型的可实现性高,线性模型的参数辨识得到了广泛的研究。早期Erickson D等人<sup>[34]</sup>便对机器人与环境碰撞动力学模型的参数估计方法进行了总结,近年来,Yamamoto T等人<sup>[35]</sup>对新兴的参数估计方法进行了分类。王永等人<sup>[36]</sup>对参数估计中基于信号处理、间接自适应方法进行了总结。为了避免重复描述,本文将补充前人文献中未提到的方法。

##### 1) 基于最小二乘法

最小二乘法是参数辨识的最基本的方法<sup>[37]</sup>。在机

器人与环境交互的过程中,环境模型参数需要实时更新,线性模型参数估计具有如下的形式:

$$\mathbf{F}(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\mu}(k) \quad (14)$$

式中:  $\boldsymbol{\mu}$  是模型误差以及测量误差,  $\boldsymbol{\varphi}^T$  是输入矩阵, 根据前面描述的碰撞模型, 矩阵参数主要由碰撞速度, 刺入深度, 或由碰撞速度、刺入深度以及碰撞加速度组成,  $\boldsymbol{\theta}$  为对应估计的参数矩阵。

在遥操作领域中, 参数在线辨识性能主要通过模型变化跟踪速度、运算收敛速度、拟合精度等进行考量评估。

(1) 滑动窗口最小二乘法

在 2005 年, 东南大学 Song AI. G. 等人<sup>[38]</sup>用弹簧-阻尼-质子线性模型来实现机械臂末端与环境碰撞建模, 为了能实时跟踪环境模型变化, 并能减弱对随机噪声的影响, 该团队将滑动最小二乘法应用到遥操作中。

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_e(k) \\ \hat{b}_e(k) \\ \hat{k}_e(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=k-N+1}^k \ddot{x}_e^2(i) & \sum_{i=k-N+1}^k \ddot{x}_e(i) \dot{x}_e(i) & \sum_{i=k-N+1}^k \ddot{x}_e(i) x_e(i) \\ \sum_{i=k-N+1}^k \dot{x}_e(i) \ddot{x}_e(i) & \sum_{i=k-N+1}^k \dot{x}_e^2(i) & \sum_{i=k-N+1}^k \dot{x}_e(i) x_e(i) \\ \sum_{i=k-N+1}^k x_e(i) \ddot{x}_e(i) & \sum_{i=k-N+1}^k x_e(i) \dot{x}_e(i) & \sum_{i=k-N+1}^k x_e^2(i) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=k-N+1}^k \ddot{x}_e(i) f_e(i) \\ \sum_{i=k-N+1}^k \dot{x}_e(i) f_e(i) \\ \sum_{i=k-N+1}^k x_e(i) f_e(i) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $N$  为取样点个数。在该方法中, 窗口过大即采样点过多时, 参数变化容易被平滑, 而采样点过少, 参数估计容易受测量误差等影响。后来该实验室提出自适应长度滑动窗口最小二乘法<sup>[39]</sup>。

设置最小窗口长度值  $N_{\min}$ 、最大窗口长度值  $N_{\max}$ 、加速度和碰撞力最大变化值, 动态自适应调整窗口大小。

$$N = N_{\max} - (N_{\max} - N_{\min}) \left[ (1 - \lambda) \frac{\Delta a_h}{\Delta a_{\max}} + \lambda \frac{\Delta f_h}{\Delta f_{\max}} \right], \quad N \in [N_{\min}, N_{\max}] \quad (16)$$

滑动窗口最小二乘法通过矩阵求解的方法计算参数, 该方法运算复杂度相对较高且存在无最优解的可能性。

(2) 迭代最小二乘法

迭代最小二乘法方法相对于滑动窗口最小二乘法运算复杂度低、收敛速度快, 已被广泛应用到机器人系统中<sup>[40-41]</sup>。迭代最小二乘法更新方程可以写成:

$$\mathbf{L}(k+1) = \frac{\mathbf{P}(k) \boldsymbol{\phi}(k+1)}{\lambda + \boldsymbol{\phi}^T(k+1) \mathbf{P}(k) \boldsymbol{\phi}(k+1)} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = \lambda^{-1} (\mathbf{P}(k) - \mathbf{L}(k+1) \boldsymbol{\phi}^T(k+1) \mathbf{P}(k)) \quad (18)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) + \mathbf{L}(k+1) (\mathbf{F}(k+1) - \boldsymbol{\phi}^T(k+1) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k)) \quad (19)$$

式中:  $\mathbf{P}(k)$  是在时刻  $k$  的协方差矩阵。  $\lambda$  为遗忘因子, 当  $\lambda = 1$ , 为常规迭代最小二乘法。

在常规迭代最小二乘法方法中, 一旦参数估计收敛, 协方差矩阵  $\mathbf{P}$  达到极小值, 参数估计将不跟踪环境变化, 这样对于新的碰撞过程难以在线跟踪。

针对此类问题, 自扰动迭代最小二乘法被应用到遥操作中。该方法中, 协方差矩阵中加入一项与预测误差有关的项<sup>[28,42]</sup>。

$$\mathbf{P}(k+1) = \mathbf{P}(k) - \mathbf{L}(k+1) \boldsymbol{\varphi}^T(k+1) \mathbf{P}(k) + \beta \cdot \text{NINT}[\gamma \cdot e^2(k)] \cdot \mathbf{I} \quad (20)$$

$$\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{F}(k+1) - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T(k) \boldsymbol{\varphi}(k+1) \quad (21)$$

式中:  $\beta$  为常数,  $e(n)$  为前向预测误差, NINT 函数为四舍五入取整函数,  $\gamma$  为增益系数, 根据系统测量噪声的大小调整该值。

2) 梯度下降法

为了能够快速跟踪动态环境, 及时重构动态环境的动力学模型, 基于梯度下降法的参数在线辨识方法被提出<sup>[43]</sup>。

基于梯度下降法的参数在线辨识方法的基本思想是, 首先定义参数估计迭代公式:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) + \lambda(k) \boldsymbol{\mu}(k) \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\mu}(k) = - \frac{\mathbf{g}(k)}{\|\mathbf{g}(k)\|} \quad (23)$$

$$\mathbf{g}(k) = \frac{\partial \mathbf{J}(k)}{\partial \boldsymbol{\theta}(k)} =$$

$$- \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{F}(k) + \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\varphi}(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{E}(k) \quad (24)$$

式中:  $\lambda(k)$  是迭代步长,  $\boldsymbol{\mu}(k)$  为梯度单元矢量。在每一次迭代中, 根据该公式更新参数。  $\mathbf{J}(k)$  为损失函数,  $\mathbf{E}(k)$  为预测误差。

$$\mathbf{J}(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=k-L+1}^k [\mathbf{F}(j) - \boldsymbol{\varphi}(j) \hat{\boldsymbol{\theta}}(j)]^2 \quad (25)$$

合适的迭代步长  $\lambda(k)$  应满足  $\frac{\partial \mathbf{J}(k)}{\partial \lambda(k)} = 0$ , 通过解算可获得

$$\lambda(k) = \frac{\boldsymbol{\mu}^T(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{E}(k)}{\boldsymbol{\mu}^T(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\varphi}(k) \boldsymbol{\mu}(k)} \quad (26)$$

此外, 为了优化运算复杂度, Haddadi A 等人<sup>[44]</sup>提出了三阶数值解算公式。由于该方法运算复杂度相对于基于最小二乘法类方法较高, 因此暂未得到广泛应用。

3.3.2 非线性模型参数辨识

非线性 Hunt-Crossley 模型可拟合复杂交互任务, 但

限于其非线性化特性,参数在线辨识困难,限制了其在遥操作系统中的实际应用。最早 Dialaiti N 等人<sup>[45]</sup>采用双阶段参数估计思想,实现了 Hunt-Crossley 模型参数的在线估计。2008 年, Hunt-Crossley 模型线性化思想被 Haddadi A 等人<sup>[46]</sup>首次提出,该想法的提出使得 Hunt-Crossley 模型在碰撞建模中得到了更广泛的应用。

1) 双阶段参数估计

双阶段参数辨识的基本思想是把将  $K$  和  $B$  的估计与  $n$  的估计分离,在第 1 阶段  $\Gamma_1$ ,假设  $n$  已知,通过迭代最小二乘法计算  $K$  和  $B$  的值,在第 2 阶段  $\Gamma_2$ ,利用估计的  $K$  和  $B$  值,辨识参数  $n$ 。

双阶段参数估计示意图如图 3 所示。通过图 3 可以看出,第 2 阶段的估计依赖于第一阶段,反之亦然。该方法要求用于估计模型的样本数量要足够大,同时对参数初值设定极度敏感,不正确地选择初始值将导致极大估计误差,导致慢收敛甚至不稳定估计。

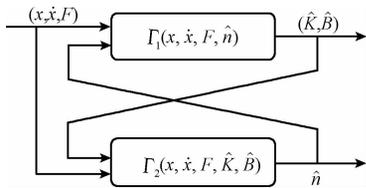


图 3 双阶段参数估计示意图

Fig. 3 Diagram of two-stage parameter estimation

2) 非线性模型线性化

为了能够将  $K$ 、 $B$ 、 $n$  3 个参数分离开, Haddadi A 提出 Hunt-Crossley 模型线性化思想,通过线性化模型对其进行参数辨识。其思想主要是,首先对模型公式两侧进行对数运算,公式如下:

$$\ln(F) = \ln(k) + n\ln(x) + \ln(1 + k^{-1}b\dot{x} + (kx^n)^{-1}\varepsilon) \quad (27)$$

如果系统可以满足以下条件:

$$|k^{-1}b\dot{x} + (kx^n)^{-1}\varepsilon| \leq |k^{-1}b\dot{x}| + |(kx^n)^{-1}\varepsilon| \ll 1 \quad (28)$$

那通过  $\ln(1 + \alpha) \approx \alpha$  ( $|\alpha| \ll 1$ ) 定理, Hunt-Crossley 模型可被近似线性表示为:

$$\ln(F) = \ln(k) + n\ln(x) + k^{-1}b\dot{x} + (kx^n)^{-1}\varepsilon \quad (29)$$

上述假设要求  $\|\dot{x}\|_\infty < 0.1k/b$ , 且系统噪声足够小。前者的要求可以很容易地满足,因为实际上接触中的操作速度不高并且刚度通常大于阻尼参数,后者则要求在建模前对传感器信号进行滤波处理。线性化的 Hunt-Crossley 模型可采用前面章节所总结的线性化参数辨识方法实现参数在线辨识。

3.3.3 基于神经网络的非特定模型参数辨识

由于特定的动力学模型并不一定适用于实际交互环境,尤其是当机器人进入一个部分或完全未知的环境中。使用预定义模型是很难真实反应碰撞过程的。在这种情况下,可以使用非特定模型环境建模方法<sup>[47]</sup>。

非特定模型环境建模的主要思想:设定输入碰撞刺入深度  $x_e$ , 速度  $\dot{x}_e$  和加速度  $\ddot{x}_e$ , 输出为测量的碰撞力  $F_e$ , 通过神经网络的在线估计方法来实现环境的动力学建模,如图 4 所示。在远端环境实现神经元权重在线估计,同时权重值  $W$  将作为环境描述参数,发送到主端,并在主端虚拟环境中重构出相应的神经网络,通过主端机器人与虚拟环境交互的刺入深度、速度和加速度重构交互力。

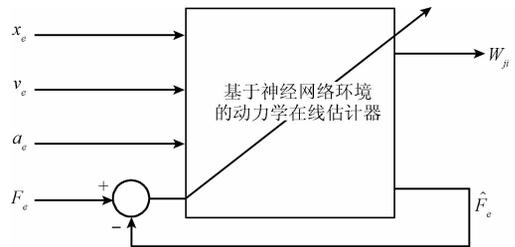


图 4 非特定模型环境建模方法

Fig. 4 Environment modeling method based on non-specific models

基于上述的描述,对各模型参数估计方法进行总体分析如表 1 所示,表中  $N$  为需要估计的参数数目。

表 1 几种典型方法的性能分析比较

Table 1 Performance Analysis of several typical methods

	线性/非线性运算	适用模型	运算复杂度	敏感因素
滑动窗口最小二乘法	线性	线性模型	$N^3$	滑动窗长度
迭代最小二乘法	线性	线性模型	$N^2$	遗忘因子
梯度下降法	线性	线性模型	$> N^3$	迭代步长
双阶段估计方法	非线性	Hunt-Crossley 模型	$> N^3$	预设初始值
非线性模型线性化方法	线性	Hunt-Crossley 模型	依赖于线性化后采用的估计方法	线性化约束条件
基于神经网络参数估计	非线性	非特定模型	依赖于神经元的数量	模型变化

### 3.4 模型偏差修正

由于基于虚拟现实的遥操作对几何建模与环境动力学建模的误差极其敏感,当建模存在误差时,真实机器人难以跟随虚拟机器人运动。因此,虚拟现实环境建模的精准性是有效操作的关键。然而受到通讯丢包、传感器测量误差等因素的影响,完全精确的虚拟现实环境模型难以构建。因此,模型偏差修正起着至关重要的作用。

20 世纪 90 年代初, JPL 实验室将增强现实技术应用到遥操作中,提出图形图像叠加技术<sup>[48]</sup>。增强现实技术是指将图形渲染产生的虚拟模型与真实世界结合起来,构建虚拟环境。在遥操作中,将虚拟机器人模型与从端反馈的真实图像叠加在同一个显示窗口中,实时判断主端与从端的运动是否一致,观察模型偏差,当误差累计超过一定阈值时,需进行模型修正。虽然该方法可有效减弱模型偏差带来的弊端,但是该方法不仅需要实时传输从端视频信息,占据带宽,而且只观察几何模型,不能提供力反馈。

为了对主端动力学模型进行修正,并适当减轻模型修正的带宽压力, Xu X 等人<sup>[25,33]</sup>定义了“死区”方法,比较最近估计模型与最新计算的模型下所产生的交互力值,当两者偏差超过一个预定义的阈值时,进行模型修正,该阈值称为“死区”参数如图 5 所示,以此可减轻模型更新造成的传输压力。

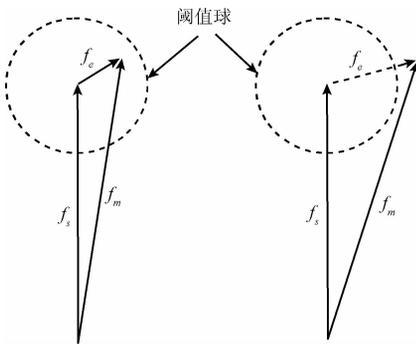


图 5 “死区”阈值区域定义

Fig. 5 "Deadband" definition

## 4 辅助虚拟夹具建模

当操作者通过虚拟现实环境完成遥操作任务时,操作者通过人机交互设备控制虚拟机器人与虚拟现实环境进行交互,然而由于操作者操作经验不足、徒手控制不精确、心理负担大,很容易导致操作失误,难以完成精确的操作任务。因此辅助虚拟夹具建模是虚拟现实环境中必不可少的模块。

虚拟夹具的理念最早是由斯坦福 Rosenberg A. L. B.<sup>[49]</sup>提出,通过在遥操作系统反馈的多传感器信息上额外叠加虚拟力觉、视觉和听觉等感知信息,提高操作者执行效率。Rosenberg A. L. B. 设计了 8 类虚拟夹具,并将其应用到遥操作插孔实验,通过实验验证了虚拟夹具可提高效率 70%,随后虚拟夹具在遥操作中得到了广泛应用。目前,虚拟夹具主要分为引导型虚拟夹具和禁止区域型虚拟夹具。顾名思义,引导型虚拟夹具可以使机器人沿着特定轨迹运动,禁止区域型虚拟夹具可以限制机器人进入预设区域。不同虚拟环境几何模型描述决定了虚拟夹具的设计各不相同,本文将从虚拟夹具的构造方法方面展开调研。

### 4.1 基于点结构

基于点结构的虚拟夹具通常是在机器人的任务空间中定义特定点,设置虚拟夹具引导机器人到达特定位置,多为引导型虚拟夹具。Prada R 等人<sup>[50]</sup>在虚拟训练环境中实现了针对特定目标的引导型虚拟夹具,为了提高学员在虚拟环境中的可操纵性技能。Kapoor A 等人<sup>[51]</sup>在医疗机器人领域,定义操作对象的入口点和出口点,设定引导型虚拟夹具辅助操作者控制医疗机器人末端到达目标位置。

基于点结构的虚拟夹具构建方法多基于图像识别或人为设定特定位置的方式,对特定位置进行标识,然后通过力引导辅助操作者控制操作对象完成任务。

### 4.2 基于线结构

基于线结构的虚拟夹具通常是在机器人的任务空间中定义特定的路径,采用虚拟夹具限制机器人跟随特定路径运动。2003 年, Li M 等人<sup>[52]</sup>使用虚拟夹具限制机器人跟踪二维正弦曲线运动。随后, Aarno D 等人<sup>[53]</sup>使用隐马尔科夫链的方法将跟踪曲线任务分割成多个子直线跟踪运动,实现了虚拟夹具的构建。近年来, Tian X 等人<sup>[54]</sup>在空间遥操作中,首先通过人为设置切割路线,然后依据切割路线设置引导型虚拟夹具,保证操作者精确地输入指令完成遥切割任务,如图 6(a) 所示。Navkar N. V. 等人<sup>[55]</sup>在医疗机器人控制过程中,在实时核磁共振图像上识别边界特征点,然后通过 Kochanek -Bartels 曲线插值法拟合手术机器人曲线,设计引导型虚拟夹具。

由于线结构对于控制稳定性要求极高,因此一些学者在曲线周围设置一定半径的管道,实现管道约束,通过管道约束可以限制机器人在管道内一定范围内运动,以降低控制精度,保证系统稳定性<sup>[56-57]</sup>,如图 6(b) 所示。

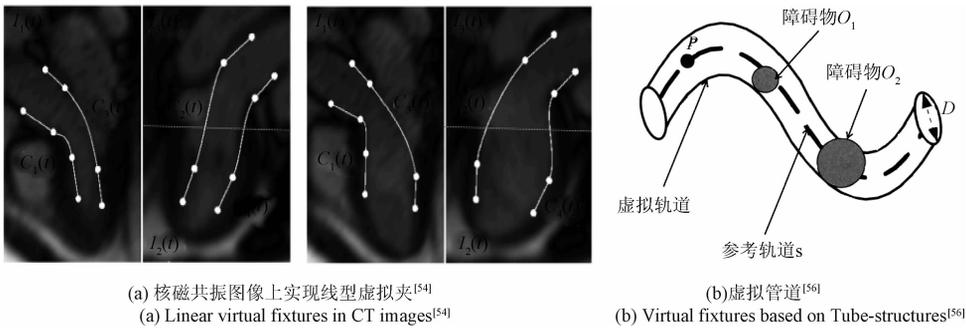


图6 基于线结构的虚拟夹具  
 Fig. 6 Virtual fixtures based on the line structure

### 4.3 基于曲面结构

基于曲面结构的虚拟夹具多用于构建禁止区域虚拟夹具,在特定物体(主要包括障碍物、需保护的操对象)表面上方设置一定形状的曲面实现虚拟夹具,在主从式医疗机器人操作中应用较多。Dewan M 等人<sup>[58]</sup>基于立体成像系统重构环境曲面,并设置曲面约束保证机器人始终在曲面垂直上方一定高度;Ren J 等人<sup>[59]</sup>在手术机器人系统中,预先获取操作对象的三维计算机断层扫描(computed tomography, CT)图像获取器官,通过重构手术区域三维曲面实现动态禁止区域虚拟夹具,在文献[60]也进行了类似的研究。

### 4.4 基于几何体结构

由于基本的几何体,如圆柱、椎体、立方体等可以用简单的数学表达式定义,因此,虚拟夹具可通过这些基本几何体实现,不仅可以实现简单的引导型虚拟夹具,而且可以设计保护区域的禁止区域虚拟夹具。

2000年 Otmane S 等人<sup>[61]</sup>在遥操作系统中,开发了基于基本几何体、复合几何体和形变几何体的虚拟夹具如图7所示,主要用于引导操作者完成特定任务,Prada R 等人<sup>[62]</sup>也进行了相似的研究。Arata J 等人<sup>[63]</sup>在手术机器人系统中,采用球形几何体实现禁止区域虚拟夹具,限制机器人末端的活动范围。国内张斌等人<sup>[64]</sup>在空间遥操作中设计了基于多种几何体的虚拟夹具,提高了作业任务的精准性。

### 4.5 基于点云结构

环境的点云数据描述主要通过三维扫描设备、距离传感器等获得,不同于曲面结构的虚拟夹具,基于点云结构的虚拟夹具不需要重构物体表面描述,直接利用点云数据实现,降低了数据的运算量。目前,Yamamoto T 等人<sup>[65]</sup>采用 Bumblebee 双目摄像头采集操作对象三维点云

信息,并基于局部法向量设置一定高度的禁止区域虚拟夹具,对操作对象进行保护,该方法主要是针对静态点云虚拟夹具构建。Kosari S. N. 等人<sup>[66]</sup>采用 Kinect 设备实时采集环境点云信息如图8所示,依据点云力渲染方法提出了一种基于点云约束的动态禁止区域虚拟夹具方法。

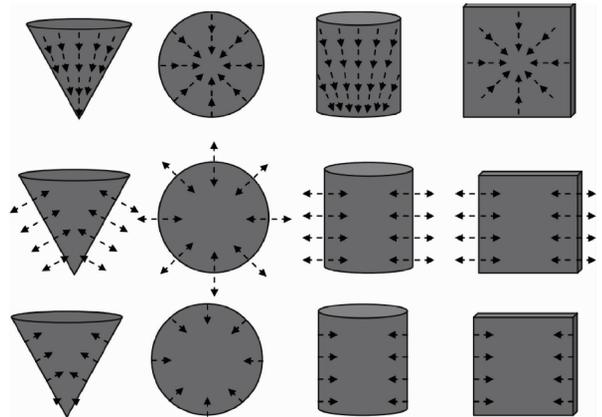


图7 基于基本几何体实现虚拟夹具方法<sup>[61]</sup>  
 Fig. 7 Virtual fixtures based on basic primitives<sup>[61]</sup>

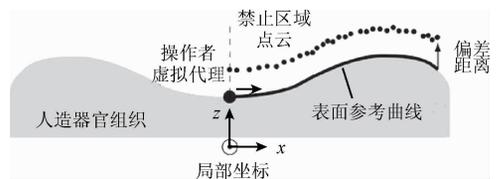


图8 基于点云的虚拟夹具构建<sup>[65]</sup>  
 Fig. 8 Virtual fixtures based on point cloud<sup>[65]</sup>

基于上述的描述,对多种虚拟夹具构建方法的适用领域进行总结分析如表2所示。

表 2 虚拟夹具构建方法适用领域比较

Table 2 Application scope analysis of virtual fixture construction methods

构造方法	相关研究	禁止型	引导型	静态	动态	适用领域
基于点结构	文献[50]		*	*		牵引执行器到达特定目标位置
	文献[51]		*	*		
基于线结构	文献[52]		*	*		约束执行器沿特定轨迹运动
	文献[53]		*		*	
	文献[54]		*	*		
	文献[55]		*		*	
	文献[56]	*	*	*		
	文献[57]	*	*		*	
基于曲面结构	文献[58]	*			*	保护特定对象
	文献[59]	*			*	
	文献[60]	*			*	
基于几何体结构	文献[61]		*	*		牵引执行器到达特定目标位置, 保护特定对象
	文献[62]	*	*	*		
	文献[63]	*		*		
	文献[64]		*	*		
基于点云结构	文献[65]	*		*		保护特定对象
	文献[66]	*			*	

## 5 研究难题与思路

### 5.1 需进一步研究的问题

虽然基于虚拟现实的遥操作机器人已得到深入的研究,但受制于传感器精度、数据运算误差、人为因素等,目前该领域仍不能实现理想的机器人临场感操作,主要在下列几个方面存在大量的问题。

1) 未知、非结构化环境几何建模困难。早期针对预定义环境的虚拟现实环境几何建模方法并不适用未知、非结构化的作业环境。未知环境复杂多变,虽然可通过视觉传感器、距离传感器等对环境进行几何测量,但受到传感器的精度、所处场景的光照、传感器安装位置的影响,环境的精准测量仍难以实现。此外,几何模型的数据需要经过通讯链路传输到主端,数据量严重受制于通讯带宽,保证几何模型的精准性和降低通讯链路传输压力是需要平衡的两大难题。

2) 复杂动力学建模难实现。在机器人与环境的交互中,传统的动力学建模只考虑了一维碰撞模型,与真实的碰撞过程不相符。虽然多维碰撞模型已初步用于重构环境碰撞,但此类模型依赖参数较多,参数估算难以实现。此外,可变形环境的动力学模型的构建依赖于环境多维度形变量的精准测量,难度较大。

3) 人性化、普适性、实时性的虚拟夹具难设计。由于人为因素的多样性、作业任务的复杂性,针对不同操作者、多样作业任务以及未知操作环境,虚拟夹具的设计也应具有人性化、普适性、实时构造性。

4) 时变时延问题难克服。虽然理想的基于虚拟现实的机器人遥操作具有稳定透明的特性,但当环境模型存在误差,通讯链路时延不确定的情况下,如何在系统应用中实现从端的准确预测是下一步需要去探讨的问题。

### 5.2 今后的研究思路

鉴于上述基于虚拟现实的机器人遥操作在各方面存在的问题,本文认为今后的研究应遵循提高透明性、稳定性、减弱时延影响的原则,重点从面向重点领域应用的共性基础问题、建模与变时延控制方面展开研究,主要在以下几个分支实现突破。

1) 虚拟环境几何建模方面。随着高精度触觉、触须传感器的研究,触须传感器被用作一种高精度的三维定位传感器,未来可结合此类传感器与视觉传感器,通过多信息融合技术,实现虚拟现实环境的精准几何建模。

2) 虚拟环境动力学建模方面。物理学中碰撞动力学建模的理论研究已接近成熟,而目前该方向的研究严重受制于传感器的测量精度。在实际应用中,可提前预估环境动力学特性,采用适当的动力学模型。此外,传感器领域的发展及计算机运算能力的进步是该方向得到突破

的主要途径。

3) 虚拟夹具设计方面。为了提高人性化设计,可通过考量操作者的操作效率及感受评估,建立评估体系。此外,对于不同作业任务、应用场景,通过提高图形处理能力与控制算法,实现动态虚拟夹具构建。

4) 时变时延建模与控制方面。为了克服时变时延中模型不匹配的问题,一方面可以通过加载信息戳的方式,采用主从双端确认机制确保从端接收正确连续的数据指令。另一方面,研究模型更新控制算法,降低大时延对模型建立准确性的消极影响。

## 6 结 论

基于虚拟现实的遥操作机器人技术是可以同时保证系统透明性、稳定性的有利手段,由于该技术可被应用到空间、医疗、深海等多个领域,其发展一直受到各界的广泛关注。随着高精度传感器技术的发展,真实环境的特征信号越来越易准确获取,加之数据运算能力的提高、智能技术的引入、人机交互设备的研制,将推动该方向为遥操作领域的发展前沿。

本文对基于虚拟现实的遥操作机器人的关键技术进行了探讨总结,主要从虚拟现实环境的几何建模、环境动力学建模以及虚拟夹具方面进行了更深入、更充分的回顾与归纳,并指出了该领域发展所需进一步探讨的难点与思路。

## 参考文献

- [ 1 ] 陈俊杰, 黄惟一, 宋爱国. 虚拟现实力觉临场感系统中操作者的动力学模型[J]. 传感技术学报, 2002, 15(1): 230-236.  
CHEN J J, HUANG W Y, SONG AI G. Dynamic model of human operator in force telepresence system based on virtual reality technology [J]. Journal of Translucation Technology, 2001, 15(1): 230-236.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] YUICHIRO A. Human-robot-computer interaction: a new paradigm of research in robotics [J]. Advanced Robotics, 1993, 8(4): 357-369.
- [ 4 ] ARCARA P, MELCHIORRI C. Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2002, 38(1): 49-64.
- [ 5 ] NUNO E, BASANEZ L, ORTEGA R. Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial [J]. Automatica, 2011, 47(3): 485-495.
- [ 6 ] SHERMAN W R, CRAIG A B. Understanding virtual

reality [J]. Journal of Documentation, 2003, 59(4): 483-486.

- [ 7 ] PARK J H, SHERIDAN T B. Supervisory teleoperation control using computer graphics [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991: 493-4981.
- [ 8 ] KUAN C P, YOUNG K Y. VR-Based teleoperation for robot compliance control [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2001, 30(4): 377-398.
- [ 9 ] LIN Q, KUO C. Virtual tele-operation of underwater robots [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997: 1022-1027.
- [ 10 ] SEKINE T. Mobile robot teleoperation system utilizing a virtual world [C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999: 1727-1732.
- [ 11 ] GUO J, GUO S, TAMIYA T, et al. A virtual reality-based method of decreasing transmission time of visual feedback for a tele-operative robotic catheter operating system [J]. International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery, 2015, 12(1): 32-45.
- [ 12 ] KUAN C P, YOUNG K Y. Challenges in VR-based robot teleoperation [C]. Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), 2003: 4392-4397.
- [ 13 ] BEJCZY A K, KIM W S, VENEMA S C. The phantom robot: Predictive displays for teleoperation with time delay [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990: 546-551.
- [ 14 ] KOTOKU T. A predictive display with force feedback and its application to remote manipulation system with transmission time delay [C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992: 239-246.
- [ 15 ] YOON W K, GOSHOZONO T, KAWABE H, et al. Model-based space robot teleoperation of ETS-VII manipulator [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 2004, 20(3): 602-612.
- [ 16 ] 张涛, 陈章, 王学谦, 等. 空间机器人遥操作关键技术综述与展望 [J]. 空间控制技术与应用, 2014, 40(6): 1-9.  
ZHANG T, CHEN ZH, WANG X Q, et al. Overview and prospect of key technologies of teleoperation of space robot [J]. Aerospace Control and Application, 2014, 40(6): 1-9.
- [ 17 ] LUMIA R. Using NASREM for real-time sensory interactive robot control [J]. Robotica, 1994, 12(2):

- 127-135.
- [18] BARTH M, BURKERT T, EBERST C, et al. Photo-realistic scene prediction of partially unknown environments for the compensation of time delays in telepresence applications [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2000;3132-3137.
- [19] COBZA D, JÄGERSAND M, ZHANG H. A panoramic model for remote robot environment mapping and predictive display [J]. International Journal of Robotics & Automation, 2005, 20(1):25-33.
- [20] RACHMIELOWSKI A, BIRKBECK N, JAGERSAND M. Performance evaluation of monocular predictive display [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010: 5309- 5314.
- [21] COBZAS D, JAGERSAND M. Tracking and predictive display for a remote operated robot using uncalibrated video [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005:1847-1852.
- [22] JAGERSAND M, RACHMIELOWSKI A, LOVI D, et al. Predictive display from computer vision models [C]. Proceedings of the 10th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space I-SAIRAS. 2010: 673-680.
- [23] JAGERSAND M, BIRKBECK N, COBZAS D. A three-tier hierarchical model for capturing and rendering of 3d geometry and appearance from 2d images [C]. Proceedings of 3DPVT'08 -the Fourth International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2008.
- [24] KELLY A, CAPSTICK E, HUBER D, et al. Real-time photorealistic virtualized reality interface for remote mobile robot control [J]. International Journal of Robotics Research, 2011, 30(3):384-404.
- [25] XU X, CIZMECI B, AL-NUAIMI A, et al. Point cloud-based model-mediated teleoperation with dynamic and perception-based model updating [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63 (11): 2558-2569.
- [26] NI D, SONG AI G, XU X, et al. 3D-point-cloud registration and real-world dynamic modelling-based virtual environment building method for teleoperation [J]. Robotica, 2016, doi:10.1017/S0263574716000631.
- [27] 曹登庆, 初世明, 李郑发, 等. 空间可展机构非光滑力学模型和动力学研究 [J]. 力学学报, 2013, 45(1): 3-15.
- CAO D Q, CHU SH M, LI ZH F. Study on the non-smooth mechanical models and dynamics for space deployable mechanisms [J]. Chinese Journal of Theoretical & Applied Mechanics, 2013, 45(1):3-15.
- [28] ACHHAMMER A, WEBER C, PEER A, et al. Improvement of model-mediated teleoperation using a new hybrid environment estimation technique [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010;5358-5363.
- [29] XU X, STEINBACH E. Towards real-time modeling and haptic rendering of deformable objects for point cloud-based Model-Mediated Teleoperation [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops, 2014:1-6.
- [30] RICHARD C, CUTKOSKY M R, MACLEAN K. Friction identification for haptic display [C]. Proceeding of the ASME IMECE Nashville, 1999: 14-19.
- [31] KARNOPP D. Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1985, 107 (1): 100-103.
- [32] DAHL P R. Solid friction damping of mechanical vibrations [J]. AIAA Journal, 1976, 14 (12): 1675-1682.
- [33] XU X, CHEN S, STEINBACH E. Model-mediated teleoperation for movable objects: dynamics modeling and packet rate reduction [C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games, 2015:1-6.
- [34] ERICKSON D, WEBER M, SHARF I. Contact stiffness and damping estimation for robotic systems [J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1):41-58.
- [35] YAMAMOTO T, BERNHARDT M, PEER A, et al. Techniques for environment parameter estimation during telemanipulation [C]. Proceedings of IEEE Ras & Embs International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2008:217-223.
- [36] 王永, 谢圆, 周建亮. 空间机器人实时遥操作技术研究综述 [J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 299-306.
- WANG Y, XIE Y, ZHOU J L. A research survey on teleoperation of space robot through time delay [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2):299-306.
- [37] GOODWIN B. Adaptive filtering prediction and control [M]. Upper Saddle River: Prentice-hall, 1992.
- [38] SONG AI G, MORRIS D, COLGATE J E. Haptic telemanipulation of soft environment without direct force feedback [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Information Acquisition, 2005:5.

- [39] XU X, SONG A, NI D, et al. Visual-haptic aid teleoperation based on 3d environment modeling and updating [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (10):6419-6428.
- [40] HADDADI A, HASHTRUDI-ZAAD K. Online contact impedance identification for robotic systems [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008:974-980.
- [41] HADDADI A, HASHTRUDI-ZAAD K. Real-time identification of hunt - crossley dynamic models of contact environments [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(3):555-566.
- [42] PARK D J, JUN B E. Selfperturbing recursive least squares algorithm with fast tracking capability [J]. Electronics Letters, 1992, 28(6):558-559.
- [43] WALACH E, WIDROW B. The least mean fourth (LMF) adaptive algorithm and its family [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30 (2): 275-283.
- [44] HADDADI A, HASHTRUDI-ZAAD K. A new fast online identification method for linear time-varying systems [C]. Proceedings of American Control Conference, IEEE, 2008:1322-1328.
- [45] DIOLAITI N, MELCHIORRI C, STRAMIGIOLI S. Contact impedance estimation for robotic systems [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(5):925-935.
- [46] HADDADI A, HASHTRUDI-ZAAD K. A new method for online parameter estimation of Hunt-Crossley environment dynamic models [C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008:981-986.
- [47] SMITH A C, HASHTRUDI-ZAAD K V. Neural network-based teleoperation using Smith predictors [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2005:1654-1659.
- [48] 李会军. 空间遥操作机器人虚拟预测环境建模技术研究[D]. 南京:东南大学, 2005.  
LI H J. Research on predictive environment modeling for space tele-robot [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [49] ROSENBERG A L B. Virtual fixtures as tools to enhance operator performance in telepresence environments [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1993:2057, doi:10.1117/12.164901.
- [50] PRADA R, PAYANDEH S. A study on design and analysis of virtual fixtures for cutting in training environments [C]. Proceedings of Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, IEEE, 2005:375-380.
- [51] KAPOOR A, LI M, TAYLOR R H. Spatial motion constraints for robot assisted suturing using virtual fixtures [C]. Proceedings of International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 2005:89-96.
- [52] LI M, OKAMURA A M. Recognition of operator motions for real-time assistance using virtual fixtures [C]. Proceedings of Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, IEEE, 2003:125-131.
- [53] AARNO D, EKVAL S, KRAGIC D. Adaptive virtual fixtures for machine-assisted teleoperation tasks [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005:1139-1144.
- [54] TIAN X, LEONARD S, DEGUET A, et al. Augmented reality environment with virtual fixtures for robotic telemanipulation in space [C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012:5059-5064.
- [55] NAVKAR N V, DENG Z, SHAH D J, et al. Visual and force-feedback guidance for robot-assisted interventions in the beating heart with real-time MRI [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012:689-694.
- [56] 蒋再男, 赵京东, 刘宏. 力反馈柔性虚拟夹具辅助遥操作[J]. 机器人, 2011, 33(6): 685-690.  
JIANG Z N, ZHAO J D, LIU H. Haptic flexible virtual fixture for teleoperation [J]. Robot, 2011, 33 (6): 685-690.
- [57] 田志宇, 黄攀峰, 刘正雄. 辅助空间遥操作的虚拟管道设计与实现[J]. 宇航学报, 2014, 35(7): 834-842.  
TIAN ZH Y, HUANG P F, LIU ZH X. Design and implementation of virtual tube as an aid for space teleoperation [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(7): 834-842.
- [58] DEWAN M, MARAYONG P, OKAMURA A M, et al. Vision-based assistance for ophthalmic microsurgery [C]. Proceedings of Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-Miccai, 2004: 49-57.
- [59] REN J, PATEL R V, MCISAAC K A, et al. Dynamic 3-D virtual fixtures for minimally invasive beating heart procedures [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008, 27(8):1061.
- [60] SEUNG S, KANG B, KIM W, et al. Development of image guided master-slave system for minimal invasive brain surgery [C]. Proceedings of Robotics, IEEE, 2010:1-6.

- [61] OTMANE S, MALLEM M, KHEDDAR A, et al. Active virtual guides as an apparatus for augmented reality based telemanipulation system on the Internet [C]. Proceedings of Simulation Symposium, IEEE, 2000:185-191.
- [62] PRADA R, PAYANDEH S. On study of design and implementation of virtual fixtures [J]. Virtual Reality, 2009, 13(2):117-129.
- [63] ARATA J, KOZUKA H, KIM H W, et al. Open core control software for surgical robots [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2010, 5(3):211-220.
- [64] 张斌, 黄攀峰, 刘正雄, 等. 基于虚拟夹具的交互式空间机器人遥操作实验 [J]. 宇航学报, 2011, 32(2):446-450.  
ZHANG B, HUANG P F, LIU ZH X, et al. An interactive space robot teleoperation experiment based on virtual fixtures [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(2):446-450.
- [65] YAMAMOTO T, ABOLHASSANI N, JUNG S, et al. Augmented reality and haptic interfaces for robot-assisted surgery [J]. International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery, 2012, 8(1):45-56.
- [66] KOSARI S N, LENDVAY T S, HANNAFORD B, et al. Forbidden region virtual fixtures from streaming point

clouds [J]. Advanced Robotics, 2014, 28(22):1507-1518.

## 作者简介



**倪得晶**, 2012年于东南大学获得学士学位, 现为东南大学博士研究生, 主要研究方向为机器人遥操作、力触觉再现、虚拟现实。  
E-mail: ndj\_seu@163.com

**Ni Dejing** received her B. Sc. degree in Measurement and Control from Southeast University in 2012. Now she is a Ph. D. candidate in Southeast University. Her main research interests include teleoperation, haptic display, and virtual reality.



**宋爱国** (通讯作者), 1993年于南京航空航天大学获得硕士学位, 1996年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授, 主要研究方向为遥操作技术、人机交互、康复机器人等。  
E-mail: a.g.song@seu.edu.cn

**Song Aiguo** (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 1993 from Nanjing Aeronautics and Astronautics University, and his Ph. D. degree from Southeast University in 1996. Now he is a professor in Southeast University. His main research interests include teleoperation, human computer interaction, and rehabilitation robot.