

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.12.004

# 面向航天员虚拟训练的人机交互系统研制和测试

胡素芸 邵斌澄 李坤 曾欣 宋爱国

(东南大学 仪器科学与工程学院 南京 210096)

**摘要:**根据航天员地面虚拟训练的需求,设计了一套面向航天员虚拟训练的人机交互系统,研制了具有真实感与临场感的多自由度手臂力反馈设备,实现了航天员虚拟训练环境中的抓握、推拉等带力觉感受的各种交互操作,增强虚拟仿真环境的沉浸感受,提高仿真训练的逼真度。面向航天员虚拟训练的人机交互系统包括手臂力反馈设备、硬件系统以及软件系统。手臂力反馈设备具有7个运动自由度,包括三自由度平动、三自由度转动以及食指运动的自由度;硬件系统主要是下位机采集光电编码器的信号发送给上位机以解算力反馈设备末端位置,以及接收上位机的力反馈执行参数以控制力反馈执行器;软件系统基于Unity3D平台,搭建了虚拟空间舱训练环境,并且实现了上位机与下位机的接口通讯以及位置和力的解算。还提出了基于磁流变液控制的力反馈方法,独立设计了一种新型的磁流变液阻尼器作为力反馈执行器。整个系统工作空间可达 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ,位置测量精度高达 $3\text{ mm}$ 。系统结构设计上的创新实现了机械解耦、力和力矩的解耦,整个系统工作空间大、安全性能高、输出力大、位置测量精度高,并且还可广泛应用于康复医疗、虚拟手术等领域,应用面广。

**关键词:**多自由度;虚拟现实交互;力反馈;Unity3D

**中图分类号:** TP242.6;TP212.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Design and evaluation of a human-machine system for astronauts virtual training

Hu Suyun Shao Bingcheng Li Kun Zeng Xin Song Aiguo

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

**Abstract:** A human-machine system for astronauts virtual training was designed and evaluated in this paper based on the real ground training tasks. This system can simulate kinds of manipulations, such as grasping, pulling and pushing. It can help to build a high level of immersion and improve the fidelity of the simulation training. This system is mainly composed of a 7 DOF haptic device, hardware systems and software systems. The haptic device, with a hybrid structure, has a 3 DOF translational mechanism, a 3 DOF rotational mechanism and a 1 DOF finger mechanism. The hardware systems includes the signals-obtaining of photoelectric encoders and reception of Force feedback parameters. Unity3D-based virtual scenes have been built in the software systems. The software systems also connect the scenes and the haptic device. A control methodology based on MR brake was proposed in this paper. A MR brake was designed and used as actuator in this virtual training system. The whole system has a large workspace, reaching  $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ . It also has features of high position tracking accuracy and high output capability. It can also be widely used in rehabilitation training, virtual surgery and other fields.

**Keywords:** multi-DOF; virtual reality interaction; force feedback; Unity3D

## 0 引言

随着航天事业的发展,我国航天员将会面临更多的空间操作任务,如何有效进行航天员在地面的任务训练将成为保证载人航天任务顺利完成的一个重要环节。

天宫2号的成功发射标志着我国开始迈入空间站时

目前我国航天员地面训练采用的主要训练方式包括

固定基全任务飞行训练模拟器<sup>[1]</sup>、中性浮力水槽、EVA程序训练模拟器等,这些设备都是采用实物或半实物仿真的方式进行舱内、舱外操作任务训练<sup>[2]</sup>。这些训练方式一般要求建造大型的训练设备,其占地大、造价高、支持能力有限,每次训练的维护成本和软消耗也很高。航天员的地面训练方法亟待扩充以满足航天员在地面的训练需求。为了解决这个问题,基于虚拟现实人机交互的训练系统开始被用于地面训练。

传统的航天员虚拟现实训练系统中的人机交互技术主要给操作者提供视觉和听觉信息,而缺乏力触觉的感受。没有力触觉的虚拟训练缺乏真实感和沉浸感,航天员在虚拟训练时只能看见模拟空间舱的环境,没有触觉感受,无法很好的模拟操作任务的训练。运用力反馈技术可以在虚拟训练中提供力觉交互。力反馈技术通过力反馈设备输出力和力矩,模拟真实环境中的作用力,从而给人提供逼真的力觉临场感<sup>[3]</sup>。利用力反馈人机交互系统进行虚拟训练,可以模拟物体或环境的接触力感,提高了虚拟训练的真实感和沉浸感<sup>[4-5]</sup>。力觉交互是航天员在地面训练虚拟环境的关键技术,是虚拟训练系统模拟航天员在空间进行接触性操作任务时具有真实性的基础。力觉反馈的人机交互技术对于航天员的虚拟训练具有适用性和实用价值。

面向航天员虚拟训练的人机交互系统,利用虚拟现实技术和力反馈设备,构建虚拟的空间站环境,使航天员能够在虚拟环境中进行运动和操作,与虚拟环境进行交互,构成人机交互的虚拟现实训练系统<sup>[6]</sup>。利用此系统可提供视觉、听觉、力反馈等综合信息,能够模拟空间的运动操作以及与环境物体的交互<sup>[7]</sup>,是一种有效可行的训练手段。

目前,应用最广泛的力反馈设备是美国 SensAble 公司的 Phantom 系列。Phantom Omni 是一种被广泛使用的笔式力反馈设备,它的串联运动机构结构较为简单,运动约束少。Phantom Omni 可以进行 6 维位置检测,但是其输出的反馈力较小,一般不超过 3.3 N。因为体积小,价格低廉且支持 CHAI-3D 软件平台,常被高校等用于力反馈技术的研究。瑞士 Force Dimension 公司研制的 Delta. 6、Omega. 7 和 Sigma. 7 采用了 Delta 并联结构,可提供 3 个自由度的达 20 N 的力反馈,但这种结构机械耦合度高,带来了软件解耦计算的难度。这些力反馈设备结构较简单,体积较小,操作方便易携带,但工作空间和反馈力的输出远远不如工业遥操作机械臂。

英国雷丁大学的 McKnight 等人利用 3 台 Phantoms 力反馈设备设计了一种力反馈设备末端的方案,研究人员在 3 台 Phantoms 的末端装上特制的指套,每个指套连接一台力反馈设备。3 根手指分别套上指套后,3 台力反馈设备就可以检测到 3 根手指的末端位置,并分别在 3

根手指处产生力反馈。但是这样的设计非常笨重,安装繁琐,通用性差。

从上述力反馈设备的发展现状可知,对于航天员地面虚拟训练,需要设计一种运动空间大、机械耦合度低、输出力大、惯量低的力反馈设备,以满足航天员在地面进行模拟训练的空间、精度等的要求。

本文就是面向航天员虚拟训练的人机交互系统的研制和测试。本文研制了一套具有真实感与临场感的手臂力觉反馈装置,实现虚拟训练环境中的抓握、推拉等带力觉感受的各种交互操作,增强虚拟仿真环境的沉浸感受,提高仿真训练的逼真度。整个面向航天员虚拟训练的人机交互系统由手臂力反馈设备、硬件系统、软件系统构成,手臂力反馈设备作为人机交互的接口,硬件系统和软件系统共同支撑整个系统运作。

## 1 力反馈设备结构设计

### 1.1 机械结构

较同类型力反馈设备而言,力反馈设备的主要设计目标是在提供力反馈的同时达到更大的工作空间、输出力。机械结构上的耦合将带来软件解耦的难度和位置测量的误差,并降低整个人机交互系统的效率。为了解决机械运动耦合的问题,本文采用了并联连杆结构+菱形拉伸结构+手部三维转动机构的设计方案。这种结构不仅可以提供 3 个平动自由度和 3 个旋转自由度,还实现了平动和转动的机械解耦和力/力矩的输出解耦,整个结构工作空间大,六维运动位置跟踪和力反馈精度高。

本文还设计了一种复合人机功效学的手指末端穿戴式力反馈结构,其安装在力反馈设备的末端以给食指提供力反馈。力反馈设备的实物如图 1、2 所示。它主要由高度可调的基座、并联连杆机构、菱形拉伸机构、手部三维转动机构和手指力反馈装置组成。

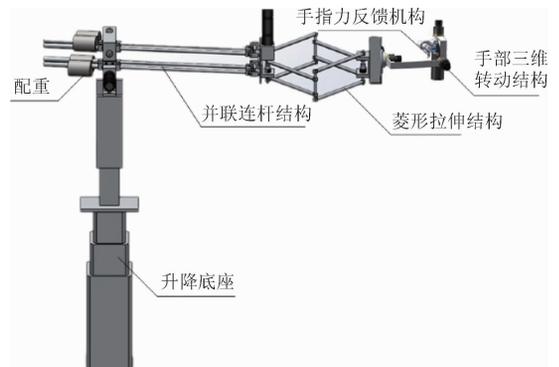


图1 手臂力觉反馈设备结构

Fig.1 Schematic diagram of haptic device



图2 手臂力觉反馈设备实物图  
Fig.2 Picture ofhaptic device

图3所示为并联连杆和菱形结构串联。当平面 $A_1B_1C_1D_1$ 固定,平面 $A_2B_2C_2D_2$ 在上下和左右平动的过程中, $A_1A_2、B_1B_2、C_1C_2、D_1D_2$ 相互平行,双平行连杆确保了平面 $A_1B_1C_1D_1$ 始终平行于平面 $A_2B_2C_2D_2$ ,而不会产生额外的倾斜或旋转。在三维空间中,并联连杆末端 $A_2B_2C_2D_2$ 的平移轨迹是一个球面弧。这个球面弧可以满足 $xOy$ 平面上的大距离位移,但在 $z$ 轴上只能产生一个小的位移,不能用来满足 $z$ 轴方向的位移。鉴于这个问题,本文采用菱形拉伸结构来产生 $z$ 轴方向的位移。菱形拉伸结构是由4个相同的直杆组成的对称结构。在运动过程中,如果两相邻菱形杆绕点 $P_1$ 的转动不同步,会出现菱形结构的偏转。为了确保菱形结构不产生其他偏转,本文在点 $P_1、P_2、Q_1$ 和 $Q_2$ 处增加了齿轮啮合约束。

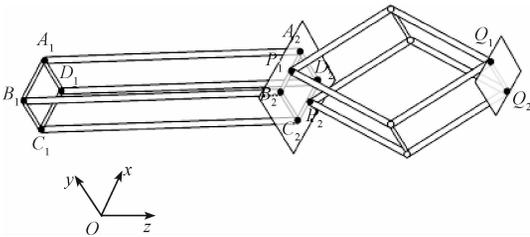


图3 手臂力觉反馈设备平动结构示意图  
Fig.3 Schematic diagram oftranslational structure

并联连杆结构串联菱形拉伸结构的设计实现了 $x、y、z$ 3个方向的平动自由度,并且3个方向的空间运动耦合度较低,大大降低了正向解算末端空间位置和逆向解算力反馈执行器控制参数的计算复杂度,整个系统的效率随之提升。为了实现整个机构的平动自由度和转动自由度的解耦,在平动机构的末端设计了一个三维转动机构。如图4所示,此机构可以实现3个轴向的旋转,并输出适当的力矩。

当操作者握住操作手柄并转动时,安装在轴4、5、6上的光电编码器随轴转动,输出每个轴向的旋转角度。3个磁流变液阻尼器作为力反馈执行器也安装在3个轴向上,这3个阻尼器彼此两两垂直。当虚拟环境中的手部

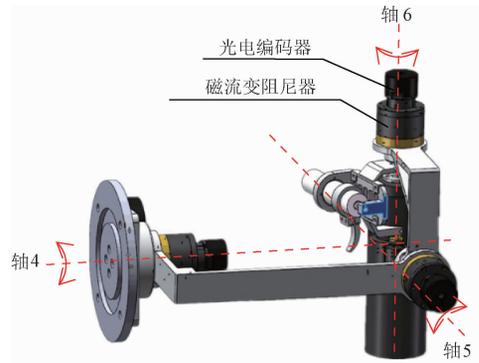


图4 手部三维转动结构示意图  
Fig.4 Schematic diagram of rotating structure

虚拟代理在空间舱环境中触碰到物体时,3个磁流变液阻尼器也同时向操作者输出适当的反馈力矩。本文独立设计了一款复合人机功效学的手指末端穿戴式力反馈结构,安装在手部转动结构的手柄上,该结构采用扳机式设计,对操作者的食指进行一个自由度的力反馈,可实现食指的抓握等动作。操作员可以握住手柄,用手指扣住扳机,通过移动旋转机构来驱动整个力反馈装置,以控制虚拟手部在虚拟模拟环境中的移动。

1.2 力反馈执行器及编码器的选择

本文所选用的力反馈执行器主要包括直流电机和磁流变液阻尼器两种,它们负责产生适当的力和力矩。本文采用瑞士Maxon公司生产的EC-MAX30272763型直流电机作为平动机构部分的力反馈执行器。该产品具有良好的转矩特性、高功率、非常宽的可调速范围以及非常长的使用寿命,一般响应较快<sup>[8]</sup>。此外,Maxon电机还具有较强的负载能力,适用于低速大扭矩的力反馈设备。

三维转动机构所装配的磁流变液阻尼器由本研究组自行设计制造。通常,磁流变液阻尼器包括活塞式设计和旋转式设计。其中,活塞式设计冲程有限,并且关态阻力较高,不适用于人机交互的触觉应用。相较而言,旋转式设计结构更加紧凑、关态摩擦较低,对于人机交互更为可行。根据转子的形状和流体间隙的几何形状,旋转式设计可以分为以下几种结构中:鼓<sup>[9]</sup>、反转鼓<sup>[10]</sup>、T型转子<sup>[11]</sup>、单盘<sup>[12]</sup>和多盘<sup>[13]</sup>。其中,盘式设计是力反馈设备最常用的设计之一。这种盘式设计的阻尼器易于制造,结构紧凑。采用多盘设计较单盘设计而言可以实现更高的动态范围和转矩/体积比。本文选择了具有三盘设计的磁流变液阻尼器。所设计的磁流变液阻尼器的总体装配图和实物图如图5、6所示。

如图5所示,本文独立设计的磁流变液阻尼器的主要部件包括轴、线圈、壳体、两个固定盘、3个旋转盘、两个密封轴承和两个密封环。旋转盘和固定盘、固定壳体之间的间隙填充了磁流变液,线圈缠绕在线轴上。3个旋

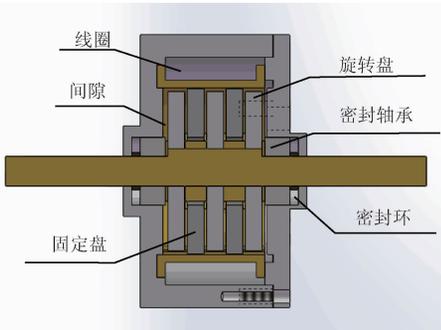


图 5 磁流变液阻尼器剖面图

Fig. 5 Sectional view of MRF actuator



图 6 磁流变液阻尼器实物图

Fig. 6 Picture of MRF actuator

转盘可以与轴同步旋转,而固定盘保持固定。为了防止磁流变液泄漏,采用密封轴承和密封环。考虑到一些零件的强度和所需的无磁特性,使用铜作为轴和卷材料。阻尼器的外壳和磁盘由具有高磁导率的 DT4 钢制成。三维转动结构的 3 个轴向上安装 3 个磁流变液阻尼器,磁流变液阻尼器只能输出被动力,使用自行设计研发的磁流变液阻尼器代替传统电机,将主动阻尼转化为被动阻尼,安全性能大大提高,交互的真实度好,体积小,输出力大,输出力/质量比是一般直流力矩电机的 50 倍以上。

力反馈设备每个力反馈关节处的角度传感器用于测量每个轴的旋转角度。本文选用 HKT22 型分体式光电编码器作为角度传感器。其体积小,重量轻,方便安装,适用于低惯量的力反馈设备。编码器安装在各个轴上,当轴旋转时,编码器将随之输出方波脉冲。

## 2 力反馈设备末端位置及控制参数的解算

航天员通过手臂力觉反馈设备与虚拟空间舱环境的交互,主要为力反馈设备输入末端位置,上位机出力反馈控制参数。利用安装在力反馈设备各个轴向的光电编码器传输的各轴转动的角度,结合手臂力觉反馈设备的机械几何原理,在上位机软件解算出设备末端的空间位置坐标,从而控制虚拟手部和实际设备末端同步运动。

虚拟手部在虚拟空间舱中触碰到物体时,根据软件建模中的力模型,通过逆向求解算法计算每个轴向上力反馈执行器的控制参数,从而驱动手臂力觉反馈设备产生与真实环境中相似的反馈力或力矩。

本文的三自由度的平动由并联连杆结构串联菱形拉伸结构来实现,整个手臂力觉反馈设备的末端位置可看作为平动结构的末端位置,即点  $Q$  的位置。平动结构的解算原理如图 7 所示,由上文描述的机械结构可知,平面  $A_1B_1C_1D_1$ 、平面  $A_2B_2C_2D_2$  和末端平面互相平行,不会产生倾斜或者转动。平动结构的 3 个转动轴为图中的轴 1、轴 2 和轴 3,所以要解算设备末端的空间位置,就是已知三轴的转动角度,求解点  $Q$  的空间坐标。

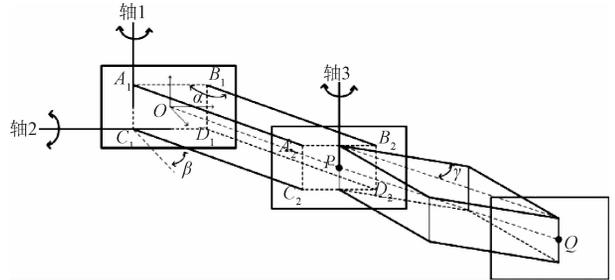


图 7 平动结构解算原理

Fig. 7 Solution schematic of translational structure

假设末端移动时,轴 1 和轴 2 的产生的转动角度分别为  $\alpha$  和  $\beta$ ,菱形拉伸结构在轴 3 产生的转动角度为  $\gamma$ 。设并联连杆结构中的四杆长度均为  $L_1$ ,菱形拉伸结构中的杆长均为  $L_2$ ,并且将平面  $A_1B_1C_1D_1$  的中点定为空间坐标系的原点  $O$ ,点  $Q$  的空间坐标表示为  $(x, y, z)$ ,平面  $A_2B_2C_2D_2$  的中间点  $P$  坐标表示为  $(x', y', z')$ 。由图中几何关系可知:

$$\begin{cases} x = x' \\ y = y' \\ z = z' + L_{PQ} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可看出,先求解点  $P$  坐标  $(x', y', z')$ ,再计算  $L_{PQ}$  的长度,便可求解点  $Q$  坐标。

由于并联连杆结构末端的运动轨迹在以坐标原点  $O$  为圆心、 $L_1$  为半径的球形弧面上,所以  $P$  点空间坐标位置与并联连杆结构绕轴 1 和轴 2 转动的角度  $\alpha$  和  $\beta$  的关系可以利用球面坐标系与直角坐标系之间的转换解出,其计算公式如下:

$$\begin{cases} x' = \frac{L_1 \cos\beta \cos\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} \\ y' = \frac{L_1 \sin\beta \sin\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} \\ z' = \frac{L_1 \cos\beta \sin\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

根据菱形结构的特性,  $L_{PQ}$  的长度为:

$$L_{PQ} = 2L_2 \cos\gamma \quad (3)$$

综合式(2)和(3), 可得  $Q$  点空间坐标为:

$$\begin{cases} x = \frac{L_1 \cos\beta \cos\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} \\ y = \frac{L_1 \sin\beta \sin\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} \\ z = \frac{L_1 \cos\beta \sin\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} + 2L_2 \cos\gamma \end{cases} \quad (4)$$

由上述末端位置解算过程可知, 三自由度平动是由轴 1、2、3 的转动产生的, 因此平动机构的反馈力的计算就是求解轴 1、2、3 输出的 3 个轴向力。由于机械结构设计的解耦, 平动力反馈和转动力矩反馈可以分开来解算。

设轴 1、轴 2、轴 3 应输出的力矩为  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ , 平动结构末端应输出的反馈力在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的分力为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 。

对平动结构进行力学分析可得:

$$\begin{cases} F_x = \frac{M_1}{d} \\ F_y = \frac{M_2}{d} \end{cases} \quad (5)$$

其中  $d$  是  $M_1$  和  $M_2$  的力臂, 为  $Q$  点到平面  $A_1B_1C_1D_1$  的距离, 即点  $Q$  的  $z$  轴坐标, 可得:

$$d = \frac{L_1 \cos\beta \sin\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} + 2L_2 \cos\gamma \quad (6)$$

$F_z$  取决于菱形拉伸机构的力学分析, 但由于菱形拉伸结构有四根连杆, 分析每根连杆的受力来求解  $F_z$  比较复杂, 因此采用虚位移原理进行求解<sup>[14-15]</sup>。对菱形机构进行力学解算, 如图 8 所示。假设在点  $P$  处安装的两个力矩电机产生力等价于  $M_3/2$ , 点  $Q$  受到沿  $z$  轴的力  $F_z$  作用下移动了微小位移  $\Delta$ , 所做虚功大小为  $\delta W$ , 则:

$$\begin{cases} \delta W = F_z \times \Delta \\ \delta W = 2 \times \frac{M_3}{2} \times \delta\theta \\ \Delta = 2L_2 \times \sin\theta \times \delta\theta \end{cases} \quad (7)$$

综合式(7)可得:

$$\begin{cases} F_x = \frac{M_1}{\frac{L_1 \cos\beta \sin\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} + 2L_2 \cos\gamma} \\ F_y = \frac{M_2}{\frac{L_1 \cos\beta \sin\alpha}{\sqrt{(\cos\beta)^2 + (\sin\beta \sin\alpha)^2}} + 2L_2 \cos\gamma} \\ F_z = \frac{M_3}{2L_2 \sin\gamma} \end{cases} \quad (8)$$

根据三维转动部分的机构分析, 轴 4、5、6 处磁流变

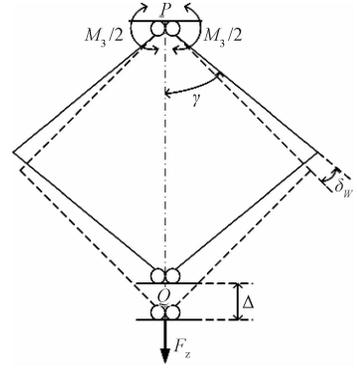


图 8 菱形结构力学解算分析

Fig. 8 Analysis of mechanical analysis of rhombus structure

阻尼器应产生的力矩与手柄绕 4、5、6 轴的反馈力矩相等:

$$\begin{cases} M_4 = M_4 \\ M_5 = M_5 \\ M_6 = M_6 \end{cases} \quad (9)$$

手指末端穿戴式力反馈机构采用一个电机来控制食指上的反馈力, 电机的输出力矩和旋转结构的杆长决定了手指反馈力的大小, 设旋转结构的杆长为  $L_7$ , 则其输出力的大小可以用如下表达式计算:

$$F_7 = \frac{M_7}{L_7} \quad (10)$$

### 3 系统设计

本文所研制的面向空间站虚拟训练的人机交互系统, 其中包含一个力反馈设备机构作为航天员的手部可操纵的末端, 装有硬件结构充当下位机的控制箱, 上位机的软件搭建虚拟现实环境。

#### 3.1 硬件系统设计

本文的硬件系统设计主要包括下位机的测控电路设计和软件设计。本系统在硬件系统设计中采用 STM32F429 单片机, 采集各轴光电编码器的数据, 驱动力反馈执行器输出合适的力或力矩。

下位机测控电路主要由光电编码器接口电路、力反馈执行器驱动电路以及主控电路 3 部分组成。光电编码器接口电路利用差分电路获得信号, 供后续电路处理。驱动电路用于控制驱动器给阻尼器提供恒定的电流使其稳定工作。使用 STM32F429 作为主控电路的核心处理器可以有效的简化相关电路的设计, 提高整个硬件系统的集成度和稳定性。

下位机软件设计分为数据通信设计和基于 STM32 的下位机程序设计两方面。数据通信设计主要是处理数

据收发的帧格式,保证数据的完整性。下位机程序设计采集手臂力觉反馈设备的编码器数据发送给上位机,同时接收上位机发送的力反馈控制参数,采用串口中断接收的方式来处理上位机发来的指令,输出到驱动器驱动各个力反馈执行器。

本项目组的控制箱部分主要由一个 24 V 稳压电源,7 个电流控制器,一块基于 STM32F429 控制板组成。图 9 所示为手臂力反馈设备硬件系统工作原理。

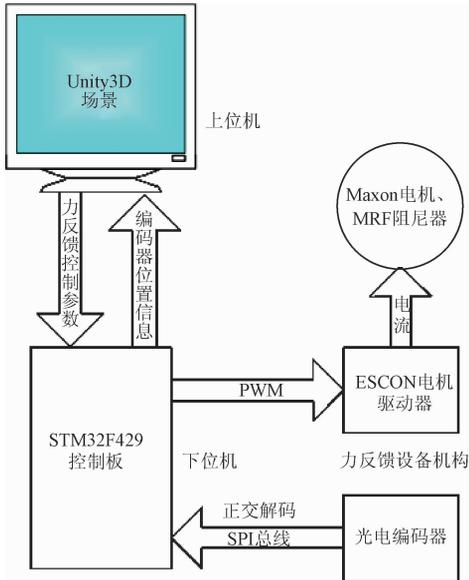


图 9 手臂力反馈设备硬件系统工作原理

Fig. 9 Hardware system diagram

本项目力反馈设备的机械结构共有 7 轴,其中末端手部机构的三维平动和手指末端穿戴式力反馈机构采用的是 4 个 MAXON 电机,三维旋转部分采用的是 3 个磁流变液阻尼器。7 个轴的每个轴都包含一个编码器,光电编码器会检测每个轴转动的角度,输出每个轴的位置信息。7 轴编码器线通过总线盒集成到一股排线上,通过排线输送到控制箱之中。考虑到 STM32F429 芯片的计数器数量有限,本文采用了解码芯片 LS7366R 对各个编码器进行 AB 相解码,然后进行信号调理,然后通过 SPI 总线输送到 STM32F429 中进行处理。

STM32F429 主控板将编码器采集的脉冲值数据通过串口 (RS232) 发送给上位机,上位机的 Unity 读取串口数据。Unity 程序读取到编码器的脉冲值,根据每转动  $1^\circ$  得到的脉冲值 = 减速比  $\times 4 \times$  编码器线数 / 360,解算出转动的角度,进而解算出虚拟手的姿态信息进行控制。同时,虚拟手在虚拟场景里产生动作时,根据碰撞检测结果解算出应该输出力的大小。由于电机、磁流变液阻尼器输出力矩跟驱动电流成正相关,力反馈执行器驱动器的输出电流与输入 PWM 波占空比成正相关,所以 Unity3D 得

到输出力的大小后,进行线性转换,将力转为电流大小,再将电流大小转换为 PWM 占空比大小,通过串口线将 PWM 占空比信息发送给 STM32F429 主控板。

STM32F429 通过串口中断的方式接收数据,然后根据上位机发送的信息驱动定时器输出对应的占空比的 PWM 波给对应的力反馈执行器驱动器。驱动器采用的是 ESCON 电机驱动器,可以配置为电流输出模式,即可以通过占空比大小控制输出电流的大小。力反馈执行器驱动器得到 STM32F429 的 PWM 波后输出对应的电流给各个对应电机、阻尼器,驱动力反馈设备在末端产生合适的力和力矩,从而模拟真实环境的力感。

### 3.2 软件系统设计

本文的软件系统主要包括检测控制软件和虚拟现实软件。检测控制软件主要实现上位机与下位机的信息通信,接收下位机发送的编码器数据并进行位置解算,结合虚拟现实场景给下位机发送力反馈执行器控制参数。虚拟现实环境软件使用基于 Unity3D 平台的虚拟场景软件,构建虚拟空间舱环境以及力的建模。

检测控制软件实现了力反馈设备数据的实时显示与控制的功能,将实时的坐标位置和输出的力与力矩显示在软件界面上。手臂力觉反馈设备采用串口与上位机进行通信。为了简使用户操作,监测控制软件实现了一键打开串口的操作,自动检测串口并读取数据,通过判断上位机发送的数据帧头来打开正确的串口,实现通信。

Unity3D 的虚拟三维环境利用交互的图型化开发环境为首要方式,本文在 Unity3D 平台上进行开发,构建了一个虚拟的空间舱三维环境,如图 10 所示。图 10 中展示了空间舱整体的模型,该模型由多个房间连接而成,因为我国航天舱内部结构是保密的,于是根据一些图片以及影片进行构建。在空间舱内部的第一人称视角可以根据键盘按键的 WASD 或者方向键进行前后左右运动,并且根据鼠标的移动进行视角的调整,从而实现整个舱体内部的漫游,使人身临其境,沉浸感较强。

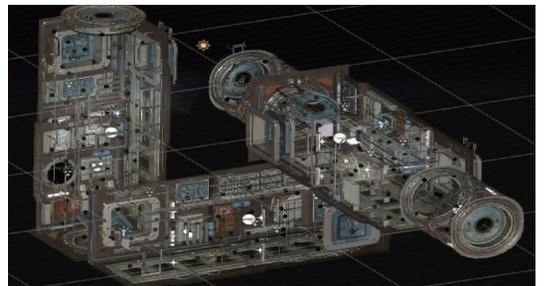


图 10 空间舱整体模型

Fig. 10 The space cabin model

通过航天员在虚拟场景中的力触觉代理,即手模型的动作,实现舱门的打开与关闭操作。将舱门的开闭简

化成一定(侧边)轴的圆柱体转动过程,通过手代理的推拉触发舱门的开闭。当手代理检测到与门的碰撞检测后,脚本会给手施加一个反馈力,当物体碰撞检测结束后,反馈力也立即消失。如图 11 所示,取物动作是航天员训练中的重要环节,是航天员在空间站内时常进行的动作。作为取物动作第一步——抓握物体是该动作成功的前提。通过虚拟场景中手的代理,航天员实际进行的抓握动作即可在虚拟场景中抓取相应的物体,并提供力反馈到航天员手指部位。操作台的操作也是航天员在空间站的日常工作操作,在训练中更是必不可少。操作台的操作中最频繁的动作是按键操作,将其简化成一个带有弹性的按键环节。在虚拟场景中的手代理,航天员手指按下时,按键下沉并有力觉的反馈;当航天员手指离开按键,按键弹起,力觉反馈消失。



(a) 开关舱门  
(a) Opening or closing the door



(b) 抓握物体  
(b) Grasping the object



(c) 使用操作台  
(c) Using the console

图 11 虚拟操作

Fig. 11 Virtual operation

当虚拟空间舱模型和力的建模统一后,力反馈设备和 Unity3D 平台之间需要实现互相通讯,才能实现手臂力觉反馈设备和虚拟空间舱环境的交互。Unity3D 平台

直接支持全双工串口通信接口,可直接与下位机进行数据通信;下位机将 7 个编码器数据通过 16 进制数的方式传递给 Unity3D,Unity3D 进行碰撞检测以及力反馈计算后,也通过串口发送给下位机。

#### 4 实验与标定

在完成人机交互系统的设计后,对本文所研制的系统进行位置标定实验,本章就是对手臂力觉反馈设备的末端位置进行详细的位置标定实验。

本文利用三维电控移动平台带动力反馈设备末端分别在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向上进行往复运动。从设备末端开始移动,三维电控移动平台每移动 2 mm 测量 1 次。移动停止待设备稳定后定点读取三维电控移动平台的显示数据以及上位机检测控制软件测量的末端位置,分别作为力反馈设备末端的实际位移和测量位移。

根据对力反馈设备末端运动范围的实际测量,力反馈设备在  $x$  轴方向上的实际运动范围为 430 mm。选取由起始点开始大于总行程一半的一段运动范围进行实验。实际具体评估范围选择为 0 ~ 218 mm,分别标定去程和回程两个不同方向。图 12 所示为实验数据。

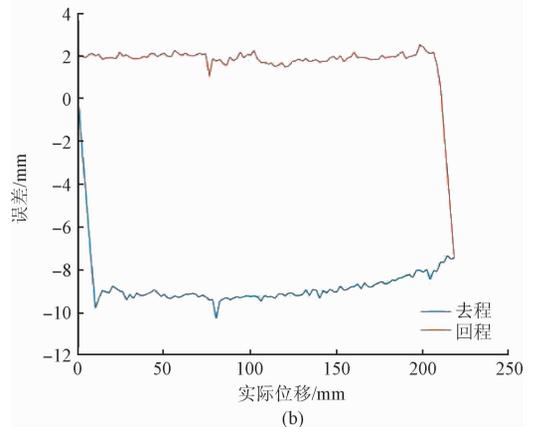
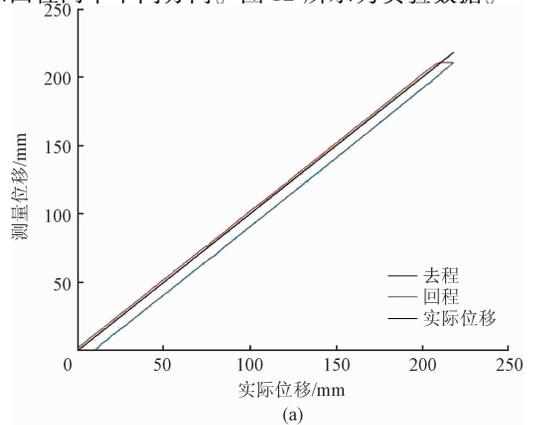


图 12  $x$  轴位移标定(a)及误差(b)

Fig. 12 Displacement calibration (a) and error (b) in the  $x$ -axis

力反馈设备的  $y$  轴方向运动与  $x$  轴类似,选取 0 ~ 230 mm 作为实际具体评估范围对  $y$  轴进行位置标定,图 13 所示为实验结果。

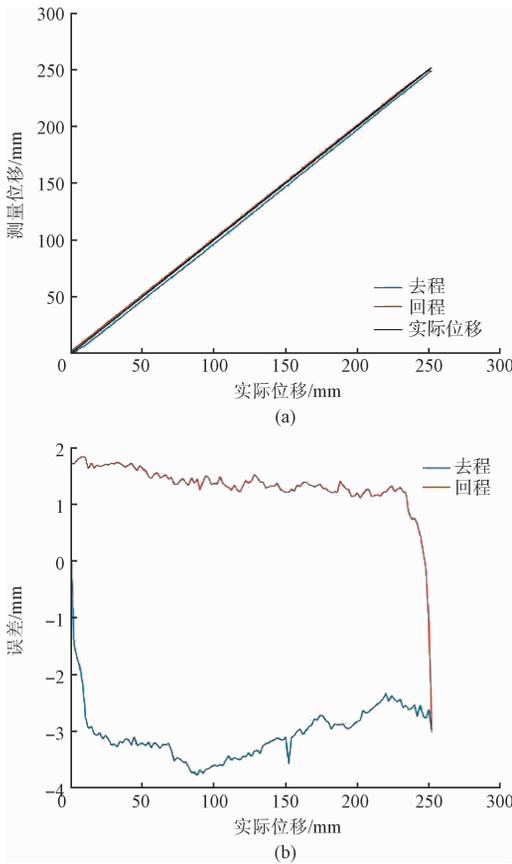


图 13  $y$  轴位移标定(a)及误差(b)

Fig. 13 Displacement calibration (a) and error (b) in the  $y$ -axis

力反馈设备在  $x$ 、 $y$  轴的位移类似,都由平行连杆结构产生,而  $z$  轴方向上的位移主要由菱形拉伸结构实现,因此主要对菱形拉伸结构进行  $z$  轴方向上的位移标定。选取 0 ~ 250 mm 作为实际具体评估范围,图 14 所示为  $z$  轴测量与标定实验结果。

由上面的初始误差数据可以看出,  $x$  轴的误差达到 10 mm,  $y$  轴的误差小于 10 mm,  $z$  轴的测量精度最低,误差最大达到 25 mm。

从图 12 ~ 14 分析误差产生的原因,  $x$  轴、 $y$  轴的误差中机械回程误差占了较大比重。机械误差源于机械结构中的小间隙(主要是齿隙),连杆结构则会放大这些误差。而  $z$  轴的机械误差最小,其误差大部分来源于算法的不准确性和有限的编码器分辨率。

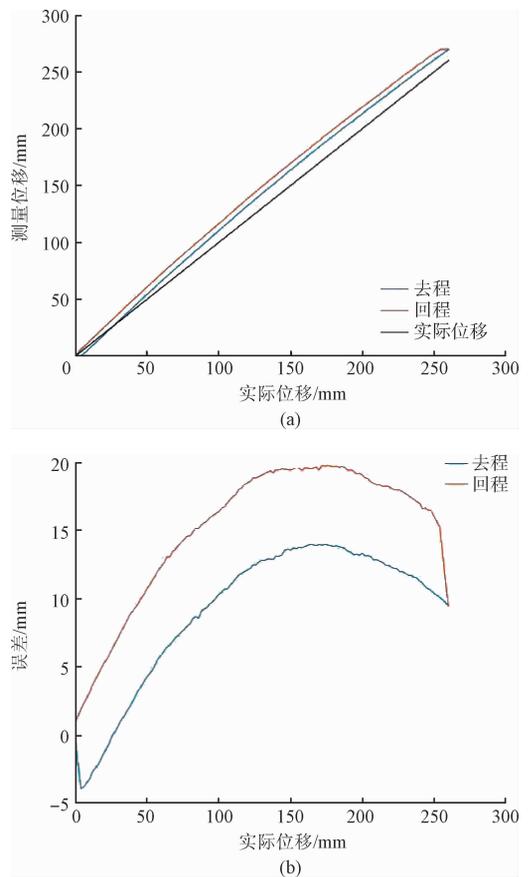
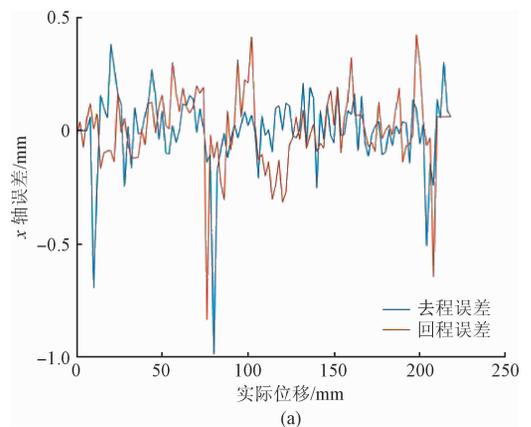


图 14  $z$  轴位移标定(a)及误差(b)

Fig. 14 Displacement calibration (a) and error (b) in the  $z$ -axis

由于力反馈设备的机械间隙造成的回程误差较大,本文对算法进行了一些修改,以补偿机械误差并减少计算误差。由于三坐标行程开始和结束时位移误差的显著差异,故采用分段误差补偿。三轴的补偿后的误差数据如图 15 所示。沿  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的位移误差在  $\pm 1.5$  mm,较为稳定。



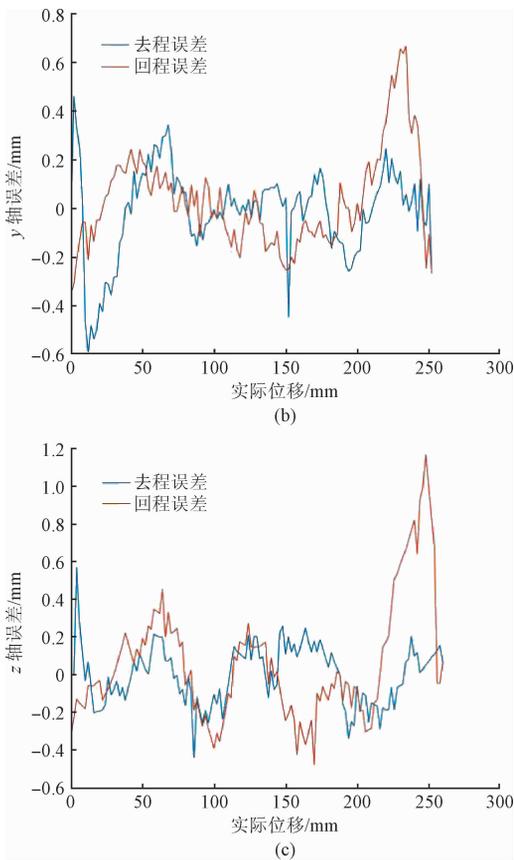


图15 三轴补偿后的误差

Fig. 13 Errors after compensation

## 5 结论

人机交互在我国航天航空事业的发展中起到了极大的作用,其中,力反馈技术作为人机交互中一种重要实现手段,受到了广泛的关注和重视。基于国内航天员地面虚拟训练的需求,本文设计了一套虚拟训练人机交互系统。该系统设计提出了一种基于并联连杆结构+菱形拉伸结构+三维转动机构的力反馈装置机构,可以完成对转动自由度和平动自由度的机械解耦,并完成了力和力矩的输出解耦,工作空间大,位置精度高。本文独立设计了一种复合人机功效学的手指末端穿戴式力反馈结构,给操作者的食指进行一个自由度的力反馈,可实现食指的抓握等动作。本文提出了基于磁流变液控制的反馈方法,设计了一种新型的磁流变液执行器,以被动输出代替主动输出,安全性能高,交互的真实度好,体积小、输出力大。整个系统工作空间大、位置测量精度高、输出力大、惯量低等优点,不仅可以用作航天员地面虚拟训练,还可广泛应用于虚拟医疗、康复训练、教育培训、虚拟游戏等领域,具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] 薛亮,陈善广,常天春,等. 固定基全任务航天飞行训练模拟器[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(S):527-531.  
XUE L, CHEN SH G, CHANG T CH, et al. Development of fixed-base full task space flight training simulator[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2003, 16(S): 527-531.
- [2] 徐玉彬,刘玉庆,朱秀庆. 航天员虚拟训练手部操作力模型建立[J]. 航天医学与医学工程, 2010, 23(6):402-405.  
XU Y B, LIU Y Q, ZHU X Q. Hand operating force modeling in astronaut virtual training [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2010, 23(6): 402-405.
- [3] 胡海桦. 多自由度力反馈技术研究[D]. 南京:东南大学, 2015.  
HU H H. Research of multi-DOF force feedback technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [4] 陆熊,宋爱国. 力/触觉再现设备的研究现状与应用[J]. 测控技术, 2008, 27(8):6-10.  
LU X, SONG AI G. Recent Developments of haptic device and its applications [J]. Measurement and Control Technology, 2008, 27(8):6-10.
- [5] 李佳佳,齐元胜,王晓华,等. 基于虚拟现实的力反馈设备的研究与应用[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(7):1107-1111.  
LI J J, QI Y SH, WANG X H, et al. A review of the research and applications of force feedback devices based on virtual reality [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(7): 1107-1111.
- [6] AN X U, FAN X M, HONG X, et al. Research and development on interactive simulation system for astronauts walking in the outer space[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(9):1953-1956.
- [7] MA J R, ZHANG T, GENG L H, et al. Simulation experiment research for attitude control of micro target simulator [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(16):4296-4298.
- [8] 王晓宇. 小型直流伺服电机性能测试系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2015.  
WANG X Y. Design of performance test system for small DC servo motor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [9] SENKAL D, GUROCAK H. Compact MR-brake with serpentine flux path for haptics applications [C]. Joint Eurohaptics Conference & Symposium on Haptic

- Interfaces for Virtual Environment & Teleoperator Systems, IEEE, 2009:91-96.
- [10] CARLSON D J. Magnetorheological brake with integrated flywheel: US, US6186290[P]. 2001.
- [11] AVRAAM M, HORODINCA M, ROMANESCU I, et al. Computer controlled rotational MR-brake for wrist rehabilitation device[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2010, 21(15):1543-1557.
- [12] LIU B, KOSASIH P B, ZHANG X Z, et al. Development of an MR-brake-based haptic device[J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15(6):1960.
- [13] GORDANINEJAD F. High-torque magnetorheological fluid clutch[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2002, 4697:393-400.
- [14] 刘又文. 理论力学虚位移原理与变形体能量法的教学衔接[J]. 力学与实践, 2007, 29(3):71-72.
- LIU Y W. The connection between the principle of virtual

displacement of theoretical mechanics and the teaching method of deformed body energy [J]. Mechanics and Practice, 2007, 29(3):71-72.

- [15] 王焕定. 再论变形体虚功原理[J]. 力学与实践, 2011, 33(2):93-95.

WANG H D. Further discussion of the principle of virtual work of deformation[J]. Mechanics and Practice, 2007, 29(3):71-72.

### 作者简介



胡素芸,1995年出生,东南大学本科在读,目前主要研究方向为人机交互与虚拟现实技术。

E-mail:seuhsy@163.com

**Hu Suyun** was born in 1995. She is studying in Southeast University. Her main research direction is man-machine interaction and virtual reality technology.