通过拟人化化身系统实现带力反馈和触觉反馈的双臂遥操作

Christian Lenz*, Sven Behnke

Institute for Computer Science VI, Autonomous Intelligent Systems, University of Bonn, Friedrich-Hirzebruch-Allee 8, 53115 Bonn, Germany

arXiv:2301.00764v1 [cs.RO] 2 Jan 2023

摘要

机器人遥操作是多种应用中的一项关键技术。它使机器人能够代替人类前往偏远且可能危险的地点，同时仍能利用人类的大脑及其丰富的知识与创造力，尤其是在解决意外问题时。遥操作的一项主要挑战是为人类操作员提供充足的反馈，以增强态势感知并实现完全沉浸，同时为操作员提供合适的控制接口，从而高效、可靠地完成任务。我们介绍一种双臂遥操作系统，该系统由一台拟人化化身机器人和一个操作员站组成，可为人类操作员提供力反馈和触觉反馈。化身机械臂在笛卡尔空间中通过直接映射操作员的动作来控制。化身侧测量到的力和力矩会以触觉方式呈现给操作员。我们开发了一种用于限位规避的预测性化身模型，该模型在操作员侧运行，以确保低延迟。该系统在 ANA Avatar XPRIZE竞赛半决赛期间成功接受了评估。此外，我们还开展了实验室实验，并对主要未经训练的操作者进行了小规模用户研究。

关键词：力反馈控制、遥操作、双臂操作、人机交互、实时控制、触觉接口

1. 引言

遥操作是一种非常强大的机器人控制方法。它使人们能够探索远程位置，并在那里与物体和人互动，而无需亲身到场。尽管最先进的自主控制方法正在迅速改进，但迄今为止，人类的经验和直觉，尤其是解决不可预测问题的能力，仍无可匹敌。当前的 COVID-19疫情就是一个很好的例子，说明在某些场景中远程工作极为理想。遥操作的其他潜在应用包括灾害应对：人们可以远程执行操作，运用在危急情况下挽救生命的技能，而不必冒生命危险；此外，还可应用于维护和医疗保健，让专家无需前往远程位置，即可执行操作任务。机器人遥操作是一个热门的研究领域，DARPA机器人挑战赛 [1] 和 RoboCup 救援赛 [2] 等多项机器人竞赛推动了这一领域的发展。这些赛事为在标准化测试场景和可比条件下，对高度集成的复杂系统进行基准测试和评估提供了绝佳机会。我们的团队 NimbRo 参加了 ANA Avatar XPRIZE竞赛[1] ，旨在推动此类机器人远程操控和远程临场系统的发展。

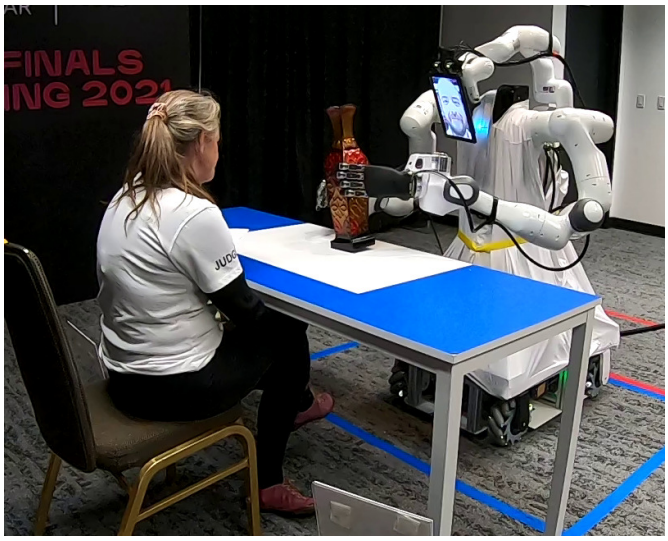
除了对远程位置进行沉浸式可视化之外，远程操控也是一个重要方面，它使操作员能够与远程环境进行物理交互。这一能力对许多应用至关重要——没有它，我们就只能进行纯粹的远程临场操作。

本文介绍了一种由现成组件构建的仿人双臂遥操作系统，使人类操作员能够在远程位置进行交互和操作（见图 1 ）。我们的贡献包括：

1. 集成用于笛卡尔遥操作的双臂机器人化身和上半身操作员外骨骼，2. 配备力反馈和触觉反馈的手臂与手部控制器，3. 基于模型的手臂运动预测，用于实时以触觉方式呈现远程化身的位置和速度限制，4. 用于检测并抑制力反馈控制回路中引入的振荡的振荡观测器模块，以及

*通讯作者*Email addresses:* lenz@ais.uni-bonn.de (Christian Lenz),behnke@cs.uni-bonn.de(Sven Behnke)

[1] https://www.xprize.org/prizes/avatar



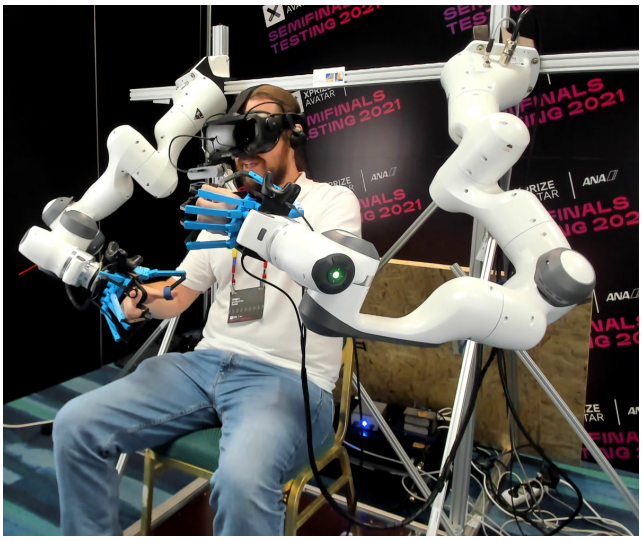


图1：我们的双手触觉遥操作系统：操作员站中的人类操作员（右侧）正在检查物体，此时正值 ANA Avatar XPRIZE竞赛半决赛期间，通过远程拟人化化身机器人（左侧）进行操作。

5. 子系统评估、实验室实验、用户研究，以及我们参加ANA Avatar XPRIZE竞赛半决赛。

2. 相关工作

遥操作是一个受到广泛研究的领域。通常使用一个主设备（在本文中称为操作员站，见第3节），并常配备触觉反馈，以控制位于远程位置的从设备（化身机器人）。DARPA机器人挑战赛（DRC） 2015 [1] 要求开发移动遥操作系统。多个研究团队，例如 DRC-HUBO [3], 、CHIMP [4]、、RoboSimian [5], 以及我们自己的参赛机器人 Momaro [6] ，展示了具有出色操作能力的遥操作系统。研究重点是由训练有素的操作员团队尽可能完成更多操作和移动任务。因此，一些软硬件组件针对解决预先定义的任务进行了高度专门化。此外，机器人无需与远程位置的其他人进行交流或互动，因此不具备相应能力。相比之下，我们开发的化身解决方案旨在与远程位置的人进行互动，其操作员界面则旨在让单个可能未经训练的操作员能够直观地控制机器人。优先考虑操作员在远程位置的临场感，而非特定任务的解决能力。

在遥操作领域，无源性控制是一个庞大的研究方向。操作者输入动力学以及远程环境的不确定性，都是可能导致控制回路不稳定的因素。许多不同的无源性控制方法致力于解决稳定性问题，例如 [7, 8, 9, 10, 11, 12]。这些控制方案采用无源性这一概念，它是实现稳定控制系统的一项充分条件。控制系统当且仅当流入系统的能量在任何时间都不少于流出系统的能量时，才被认为具有无源性。值得注意的是，如果所有子系统都具有无源性，那么整个系统也必然具有无源性。

Ryu 和 Preusche [11] 采用基于时域的无源性控制方法来确保遥操作稳定，可处理高达 120 ms 的时延。无源性观测器用于监测操作员与化身系统之间双向传递的能量。无源性控制器会主动对系统施加阻尼，以确保系统具备无源性，进而保持稳定。我们采用类似的观测器和阻尼方法，确保遥操作控制回路稳定。基于能量的时域无源性控制器的一个缺点是会出现位置漂移； [13, 14] 对此进行了处理，Coelho等人 [15]则在 1 自由度遥操作配置中改进了这一问题。我们的控制架构通过为每只化身手部指定目标位姿，确保遥操作不会发生位置漂移。运动执行可能会造成轻微的位置偏差，但对于我们的应用而言，这种偏差可以忽略不计（见第 5.3.2 节）。总体而言，无源性控制可能会导致显示环境失真 [16]。

当操作员与操作员站之间存在较大的通信时延（达到数秒量级）时（例如在太空遥操作任务中），预测控制方法可以提升任务性能 [17]。远程机器人会尝试预判人工控制指令，以完成部分传输的指令。Hauser [18]提出了一种预测与规划方法，无需假设候选任务集合是有限的，即可辅助遥操作。然而，该方法受限于有限的任务类型，且需要大量训练数据才能克服这一限制。我们设计的控制方法只将操作员限制在底层硬件

约束范围内，而不限制任务解决方案本身。

一些近期方法采用的远程操作接口只向机器人发送指令，而不向操作员提供任何力或触觉反馈 [19, 20]。这类系统的优势显然在于捕捉设备重量轻，对操作员造成的妨碍极小。其缺点是缺少力或触觉反馈，尤其是在仅凭视觉反馈无法完成的任务中，例如难度较高的插销入孔任务。

其他方法则采用定制开发的操作员接口，提供力和触觉反馈。Klamt 等人[21] 开发了一种用于灾害响应场景遥操作的半人马式平台。所提出的远程操作接口采用位于设备底座处的执行器，并通过金属腱绳将扭矩传递至驱动关节。这种方法的优势在于运动部件重量轻、惯性低，因此系统易于反向驱动。然而，所用的金属腱绳会引入一定的柔顺行为，需予以考虑。我们的方法采用现成的机械臂，执行器位于关节内部。我们使用外部力/力矩传感器，主动跟随操作员的手臂运动。Guanyang 等人 [22] 使用两种触觉设备（一种 3 自由度旋转设备和一种 3 自由度平移设备）来控制机器人的末端执行器。由于机械设计的特点，两种设备都能以较高刚度呈现接触力。不过，与我们的方法相比，其缺点包括工作空间有限，因此需要在操作员站与受控机器人之间进行运动映射；此外，还需使用两种设备才能控制完整的六维运动。Abi-Farrajl 等人 [23] 的操作员站与我们的方法相近，但其重点在于为双足人形化身机器人的平衡控制提供触觉反馈。

可穿戴触觉反馈设备 [24] 克服了固定设备带来的工作空间限制，但由于无法向操作员施加力，因此只能呈现接触。其他研究项目则聚焦于在时延下控制遥操作系统 [25] ，或在化身侧使用两条不同的运动学链 [26]。

与上述相关研究不同，我们的方法侧重于使用现成组件，以便于复现和维护。此外，由于系统间的通信仅使用末端执行器的 6D 位姿，因此所用的机械臂可以替换为采用不同运动学链的任何其他合适执行器。

3. 硬件设置

所开发的机器人遥操作系统由操作员站和化身机器人组成，如图 1 所示。操作员站使操作员能够从远程位置控制化身。它包括两个机械臂、手部外骨骼、3D Rudder 脚踏板，以及一台配备额外传感器的头戴式显示器。化身机器人旨在与人类及

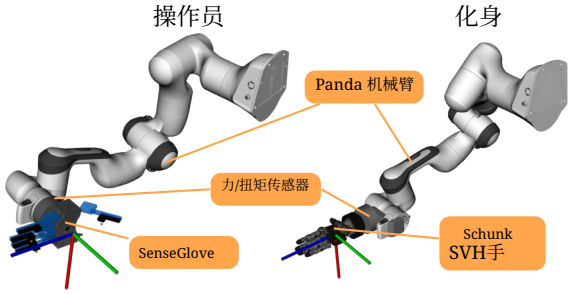


图2：操作员（左）和化身（右）手臂及所使用的硬件组件。为简洁起见，仅显示右臂。坐标轴表示用于控制指令和反馈的公共手部坐标系。

人造室内环境进行交互，因此其仿人上半身安装在移动底座上。

操作员站和化身机器人分别由一台标准台式计算机（Intel i9-9900K @ 3.60 GHz、NVidia RTX 2080）控制。这些计算机之间通过单条千兆以太网连接进行通信。我们成功测试了在两个方向上均存在最高 30 ms 人为延迟的系统。因此，我们的系统支持从远程位置操作化身。在软件方面，系统采用机器人操作系统（ROS）框架。操作员站和化身机器人均运行各自的 roscore。我们使用 NimbRo Network[2] 进行两个 roscore 之间的通信。下面将介绍操作员站和化身机器人的硬件设计。

3.1. 化身机器人

化身机器人的仿人上半身通过两条安装成略呈 V 形的 7 自由度 Franka Emika Panda机械臂，模仿人类手臂的构型。其肩部高度距地面 110 cm，便于操作桌子上的物体，也便于与坐姿和站立的人互动。肩宽不足 90 cm，能够轻松通过标准门道。

Panda 机械臂的负载能力足够，达 3 kg，最大工作半径为 855 mm。额外的自由度使肘部位置具有一定灵活性。虽然机械臂会测量每个关节的关节力矩，但我们在腕部安装了额外的 OnRobot HEX-E六轴力/扭矩传感器，以便在靠近机器人手的位置更准确地测量力和力矩，因为这里是与机器人环境接触的默认位置（见图 2）。化身机器人配备了两只仿人手。右侧安装了一只 20 自由度的 Schunk SVH手。其九个驱动自由度赋予了它出色的灵巧操作能力。左臂配备了一只 5 自由度的

[2] https://github.com/AIS-Bonn/nimbro_network

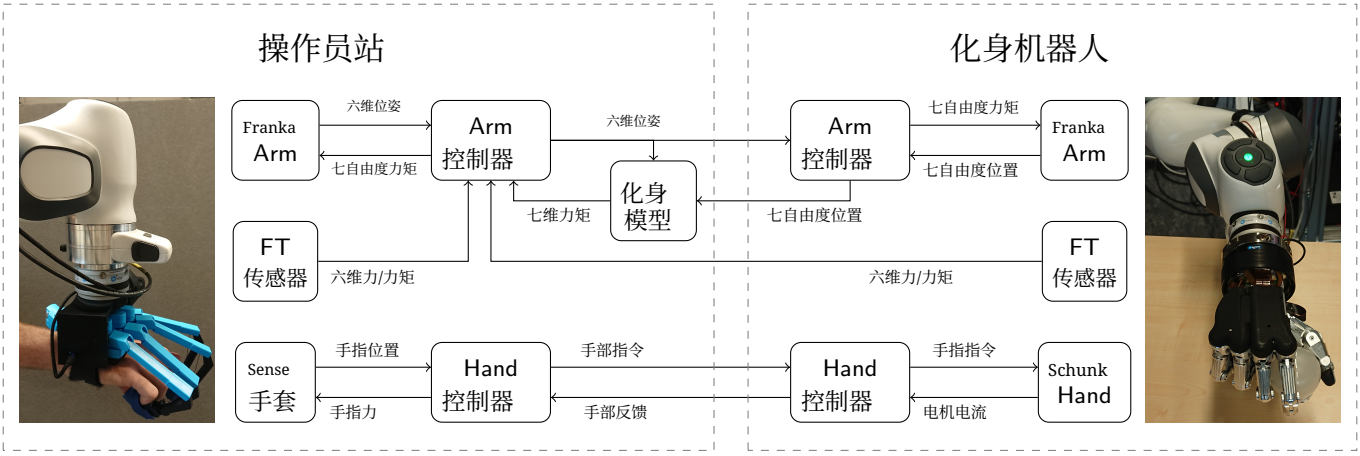


图 3：控制系统概览。为简洁起见，图中仅展示右侧。左侧的控制方式类似，但由于 Schunk 机械手不同，使用了不同的手部控制器。

Schunk SIH 机械手，可用于较简单但对力要求较高的操作任务。因此，这两种类型的手相辅相成。

化身的头部配备了两个 RGB 摄像头、一支麦克风和一块小屏幕，用于显示操作员的动画面部 [27]。头部通过一台 6 自由度 UFactory xArm 连接至上半身，从而能够自由移动。此外，两个广角 RGB 摄像头会捕捉机器人周边环境，以便在移动过程中实现态势感知。关于虚拟现实远程可视化系统的更多详情见 [28]。仿人上半身安装在可移动底座上，可实现全向移动。

3.2. 操作员站

操作员以舒适的坐姿通过操作员站控制化身。对人手动作的捕捉采用了与前文所述化身机器人类似的配置：两台 Panda 机械臂配备 OnRobot HEX-E 力/扭矩传感器，并通过 SenseGlove 触觉交互设备与操作者手相连。因此，Panda 机械臂具有双重作用：既能精确测量人手的 6D 手部位姿以控制化身，也能将化身测得的力反馈施加到人的手腕上。操作员侧力/扭矩传感器用于测量操作者手最细微的动作，辅助操作员移动手臂，并将感知质量和摩擦力降至最低。

SenseGlove 触觉交互设备可测量手指关节位置，具有 20 个自由度（每根手指四个），并且每根手指配有一个 1 自由度的触觉反馈通道（即通道激活时，操作者会感受到阻力，从而无法继续弯曲手指）。

为实现视觉和音频通信，操作员佩戴着一台配备眼动追踪器、音频耳机和用于拍摄下半张脸的摄像头的头戴式显示器部分（更多详情请参见 [29]和 [30]）。化身的移动可以通过 3D Rudder 脚踏板设备进行控制。

Panda 机械臂配备内置安全措施，若超过力、力矩或速度限制，便会立即停止。这确保了操作员侧和化身侧的人机交互安全。

4. 力反馈控制器

力反馈遥操作系统的控制架构由两个手臂控制器和两个手部控制器组成（操作员侧和化身侧各一个）。左右臂的控制器分别独立运行。由于使用了不同的机器人手，左右手的手部控制器略有不同。控制架构概览如图3所示。机械臂控制器的更新频率为 1 kHz，力/扭矩传感器测量值的采样频率为 500 Hz。力/扭矩测量值通过传感器侧的低通滤波器进行平滑处理，截止频率为 15 Hz。

由于机器人手臂从外侧连接到操作者的手腕上（见图 3），化身与操作员站的运动学链并不相同，因此无法将操作者手臂与化身手臂的关节逐一映射。因此，所开发的控制概念并不依赖相似的运动学链。相反，我们在人手和机器人手的手掌中央定义一个共同的控制坐标系，即所有必要的命令和反馈数据在传输前都会经过转换，以便相对于该坐标系表示。下文各小节将介绍操作者和化身机械臂以及双手的控制器。

4.1 操作者手臂控制器

操作者机械臂控制器向 Panda机械臂发送关节力矩指令，并读取操作者手当前的

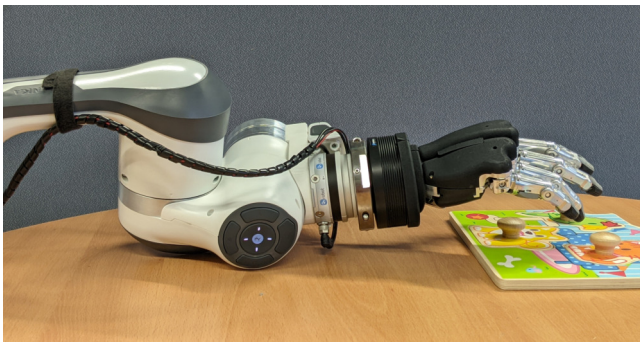


图 4：意外的前臂接触：化身前臂与环境发生接触的典型情况，而力矩传感器无法测量这种接触。Panda机械臂的力矩用于向操作员提供适当的力反馈。

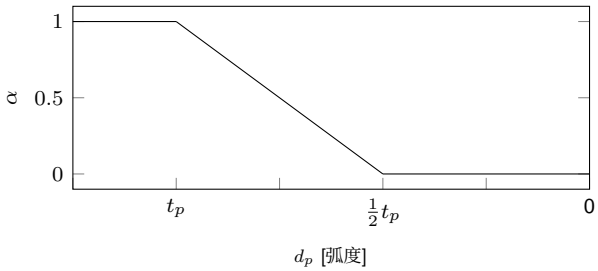


图 5：操作者手臂力矩指令（见公式（1））使用 α 进行缩放，以减少接近关节位置限位或速度限位时的振荡。如果到关节位置限位的距离 d_p 超过阈值 t_p，该标量将线性减小。速度限制采用类似的处理方式。

位姿，以生成发送给化身机器人的手部位姿指令。目标是在移动机械臂时，让操作员感受到失重——前提是没有显示力反馈。尽管在发送零力矩指令时，Panda机械臂可利用内部重力补偿实现便捷的示教模式，但使用精确的外部力矩测量可以进一步改善失重感。化身机器人用手和下臂产生的任何接触，都会以触觉形式呈现给操作员。由于遥操作系统无法获知操作员的意图，因此不应避免接触，而应将其呈现给操作员，让人类掌控当前情形。

为简单起见，以下仅提及一条机械臂，因为左臂和右臂采用相同的控制方式。

4.1.1. 力矩控制器

将某个时间步的关节力矩指令记为 $\tau_o \in \mathbb{R}^7$。则

$$\tau_o = \alpha\tau_{cmd} + \beta\tau_f + \tau_{lo} + \tau_{la} + \tau_{no} + \tau_{co} \tag{1}$$

描述所使用的各项力矩分量（指令、力反馈、操作员限位规避、化身限位规避，

零空间和科里奥利力），这些将在下文中说明。请注意，此处未考虑重力补偿，因为该补偿由 Franka控制接口（FCI）本身完成。

基于力/力矩传感器测量值控制 Panda机械臂运动的关节力矩 τ_{cmd} 定义为

$$\tau_{cmd} = J^T F \tag{2}$$

其中，J 为相对于手部坐标系的体雅可比矩阵，$F \in \mathbb{R}^6$ 表示测得的三维力和三维力矩。标量 $\alpha \in \mathbb{R}^7$ 由预测式限位规避模块计算得出（见第 4.1.2 节）。请注意，F 必须考虑传感器偏置和所连接的末端执行器重量进行校正，并转换至通用的手部控制坐标系（见第 4.3 节）。

项 τ_f 表示由化身侧力矩传感器和 Panda机械臂力矩测量值产生的力反馈。标量 β 由振荡观测器模块计算得出（见第 4.1.3 节），用于防止反馈回路中可能出现的振荡。力矩测量值作为主要反馈源。这些测量值已完成偏置校正和正确的坐标变换，因此可以直接应用式 (2)，以类似方式计算产生的关节力矩 τ_{sensor}。

在某些情况下，尤其是在桌面上执行操作任务时，化身会使前臂与环境（例如桌子，见图 4）接触，而操作者的视角姿态无法看到这种接触。由于力矩传感器和手位于桌面上方，因此力矩传感器无法测量这类接触。在这种情况下，我们必须使用 Panda机械臂的关节力矩测量，向操作者反馈接触信息。Franka API 提供末端执行器处估算的笛卡尔力 f_{panda}。我们使用

$$f_{diff} = \hat{f}_{panda} - \hat{f}_{sensor} \tag{3}$$

来计算无法通过力矩传感器测量的末端执行器坐标系中的力，其中 $\hat{}\,\hat{}f_{panda}$ 和 f_{sensor} 分别是低通滤波后的末端执行器力。最后，我们将计算得到的力转换到腕部坐标系，并计算

$$\tau_f = \tau_{sensor} + \tau_{diff}, \tag{4}$$

其中 $\tau_{diff} \in \mathbb{R}^6$ 是扩展了 $t_0 \in \mathbb{R}^3$的 $f_{diff} \in \mathbb{R}^3$，因为这里我们忽略了力矩测量。

4.1.2. 预测性限位规避

人类移动手臂的速度可以很快，甚至可能超过 Panda 的关节速度限制（最高可达$150°/s$）。为了防止操作员超出 Panda机械臂的关节位置或速度限制，引入术语$\tau_{lo} \in \mathbb{R}^7$，通过施加力矩将机械臂推离这些限制。对于单个关节 i，用于避免其触及位置限位的力矩定义为

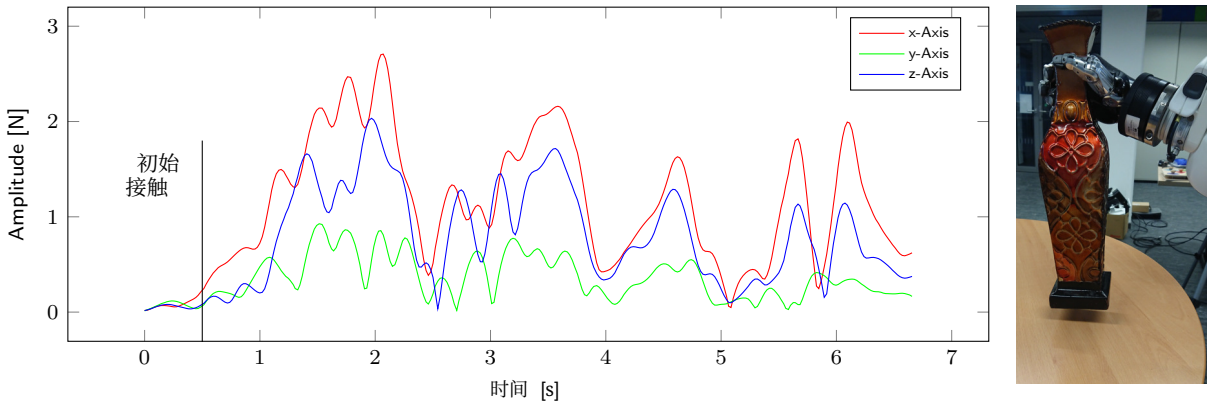


图6：振荡观测器：化身机器人右臂将花瓶放在桌子上时的力反馈测量频率分析（左）。标出了花瓶与桌子的初始接触。图中显示了使用滑动离散傅里叶变换按时间计算的各轴第四频率（约 5.7 Hz）的振幅。

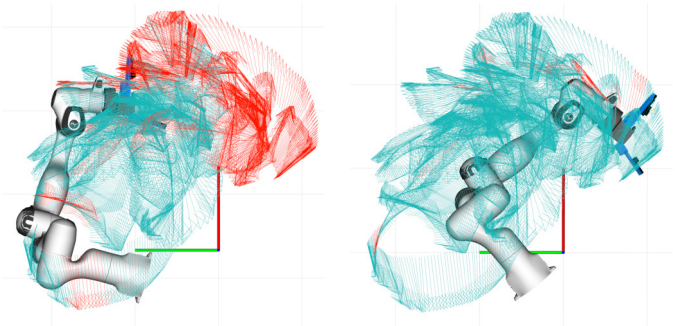


图7：机械臂工作空间评估。左：初始手臂设置，与化身侧类似。右：优化后的安装姿态。青绿色（可达）和红色（不可达）箭头表示采集到的人类左手位姿。坐标轴表示操作员的坐姿。

$$\tau^i_{lo-position} = \begin{cases} \gamma_p(\frac{1}{d^i_p} - \frac{1}{t_p}), & d^i_p < t_p \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{5}$$

其中，γ_p 为常数标量，d^i_p 为关节 i 到距离其最近的位置限位的距离，$t_p = 10°$ 为激活此行为所需的关节接近限位的阈值。$\tau^i_{lo-velocity}$ 的计算方式类似，使用 $t_v = 40°/sec$。综合起来，τ_{lo} 定义为

$$\tau_{lo} = \tau_{lo-position} + \tau_{lo-velocity}. \tag{6}$$

当接近各自的限位时，力矩 τ_{lo} 会呈双曲线增长。由于操作员侧的力/力矩传感器会测量所产生的限位规避力矩，机械臂可能会因此发生振荡，尤其是在接近一个或多个位置限位时。因此，受力矩传感器影响的力矩 τ_{cmd}会按关节乘以缩放因子 α，该因子定义如下：

$$\alpha = \max(0, \min(1, 2\min(\frac{d_p}{t_p}, \frac{d_v}{t_v}) - 1)). \tag{7}$$

标量 α 的设计使其在触发限位规避后，随着接近限位而线性减小，并在到达限位的一半距离时降为零（见图 5）。这会在接近位置或速度限位时充分降低指令力矩 τ_{cmd}，从而防止振荡。

如前所述，操作员站和化身机器人具有不同的运动学机械臂链。因此，在操作员侧规避位置和速度限制，并不能保证在化身侧实现限位规避。以类似方式计算用于防止化身机器人关节触及限位的关节力矩并不可取，因为反馈信息会有很高的延迟（主要是由于化身侧的运动执行会产生延迟）。为了解决这一问题，我们在操作者机械臂控制器中使用化身模型，预测下一时间步的化身手臂运动，并提前计算防止关节限位违规所需的关节力矩。

当前操作者手的手部位姿被用作公共夹爪坐标系中虚拟化身手臂的目标位姿。我们使用逆运动学（IK）估算能够达到该目标位姿的虚拟化身手臂关节构型。最新接收到的虚拟化身手臂关节位置用于初始化逆运动学求解器。当前关节速度近似为关节位置一阶导数经过低通滤波后的结果。估算出关节位置和速度后，我们即可应用上述相同的规避策略（见式（6））。最后，可以使用雅可比转置的伪逆（J^T_A）$^+$将所得关节力矩变换到公共六维手部坐标系中，再通过 J^T_O将其变换回操作者手臂的关节力矩。这样便得到

$$\tau_{la} = J^T_O(J^T_A)^+\tau_{la-model}. \tag{8}$$

式 (1) 中剩余的两个力矩分量为 τ_{no} 和 τ_{co}。。项 τ_{no} 是一个零空间优化项，它会将肘部拉向雅可比矩阵零空间中预先定义的便于操作的姿态。这样可以获得更具类人特征的肘部姿态，从而最大限度地拓展操作员的工作

空间，同时将机械臂推离奇异点。最后一个力矩分量是由Panda 模型 得到的科里奥利项 τ_{co}。

4.1.3. 振荡观测器

如上所述，我们的遥操作控制系统在设计上尽可能简单，同时又足以让操作员控制机器人，并提供必要的力反馈。缺点是，我们的控制器无法保证任何稳定性，因此在测得某些接触力时会产生振荡。我们通过监测力反馈通道、检测任何临界振荡，并减少系统中的反馈量来解决这一问题。

我们采用滑动离散傅里叶变换（DFT） [31,32] 方法，按轴分析力反馈通道。由于我们未在力矩通道中测得孤立振荡，因此分析三维力已足够。力测量值的采样频率约为 1 kHz。我们通过实验研究振荡频率，以确定合适的DFT参数和观测到的频带。实验中，我们将花瓶重重地放在桌子上，以激发系统振动。所用的滑动DFT分辨率为512，并使用汉宁窗来尽量减少频谱泄漏。我们观察到，产生的振荡与第四频率（约 5.7 Hz）的幅值之间存在相关性，如图 6 所示。

在每个时间步，使用独立的滑动离散傅里叶变换分析三个轴上的力测量值。接着，计算所有轴振幅的欧几里得范数，得到合并结果。随后，使用实验获得的参数（$min = 163$ 和$max = 500$）对结果值 v 进行限幅，并缩放至区间 $[0, 1]$ 内。最后，使用标量 $\beta = 1 - v$ 缩放提供给操作员的力反馈（见第 4.1.1 节）。 β 的变化率受到限制，以逐渐移除和恢复力反馈，也就是说，在检测到振荡时，观察器需要 0.8 秒才能完全移除反馈，而恢复至正常力反馈控制状态则需要 1.7 秒。这种温和的振荡消除行为会尽可能不易被操作员察觉。请注意，图 6 显示的是未降低反馈时的振荡。 β 的计算以及振荡阻尼的效果将在第 5.1 节中评估。

化身机械臂控制器通过向 Franka Control Interface 发送关节力矩 $\tau_a \in \mathbb{R}^7$，控制化身机器人的 Panda机械臂跟随所下达的六维位姿。所下达的力矩定义为

$$\tau_a = \tau_{cmd} + \tau_{init} + \tau_{na} + \tau_{ca}, \tag{9}$$

其中， $\tau_{cmd} \in \mathbb{R}^7$ 和 $\tau_{init} \in \mathbb{R}^7$ 分别是在操作期间和初始化时计算得出，用于到达目标位姿（见下文）。分量 τ_{na} 和 τ_{ca} 分别是零空间优化项和科里奥利项，与第 4.1 节所述的 τ_{no}和 τ_{co}类似。便于使用的肘部位姿用于零空间优化，其定义使肘部略微伸展。这样可以形成更接近人类的机械臂构型，并使机械臂避开肘关节奇异点。由于机械臂运动学的特性以及可用工作空间内的其他关节位置限制，不会出现其他奇异点。因此，此处无需进行特殊的奇异点处理。

目标力矩 τ_{cmd} 和 τ_{init} 由笛卡尔阻抗控制器生成，该控制器模拟弹簧—阻尼系统。其平衡点是操作员站在公共手部坐标系中下达的六维目标位姿:

$$\tau_{cmd} = J^T(-S\Delta p - D(J\dot{q})), \tag{10}$$

其中， J 表示零雅可比矩阵， $S \in \mathbb{R}^{6\times6}$ 和 $D \in \mathbb{R}^{6\times6}$ 表示刚度矩阵和阻尼矩阵， $\Delta p \in \mathbb{R}^6$ 表示当前末端执行器位姿与目标末端执行器位姿之间的平移和旋转误差， $\dot{q} \in \mathbb{R}^7$ 表示当前关节速度。 τ_{init} 仅用于安全初始化程序（见下文），其生成方式与使用当前末端执行器位姿类似。刚度和阻尼参数的符号及其数值均经过经验调节，以在保持一定柔顺性的同时，尽可能紧密地跟随操作员的指令。

当未收到目标位姿指令时，控制器会持续命令机械臂保持当前位姿，以确保处于安全状态。当操作员站未激活，或发生通信中断（最近 100 ms 内未收到操作员指令）时，就会出现这种情况。收到指令后，控制器会执行初始化程序，在当前目标位姿与新收到的目标位姿之间进行线性渐变。这样可以避免机器人突然移动到新的、可能相距较远的位姿时产生过大的力矩。此初始化过程约需 3 s。

当测得的力过大时，Panda机械臂会立即停止，例如发生意外接触且超出力/扭矩阈值时。此功能对于安全操作至关重要。通知人类操作员后，化身机械臂控制器可以自动重新启动机械臂。完成初始化程序后，即可恢复正常遥操作。

4.2. 手部控制

操作员的手指动作由两台 SenseGlove 触觉交互设备采集。每根手指均提供四项独立的手指关节测量值。由于化身上的 Schunk SVH 和 SIH机器人手分别具有九个和五个驱动关节，因此只选取相应的关节测量值，并将其线性映射到化身手部。尽管这种映射无法精确复现手部姿势——由于运动学结构不同，这本来也无法做到——但它让操作员能够全面控制手部的所有自由度。

双手通过电机电流提供反馈，用于向操作员提供逐指触觉反馈。SenseGlove制动系统根据预设的电流阈值开启或关闭。

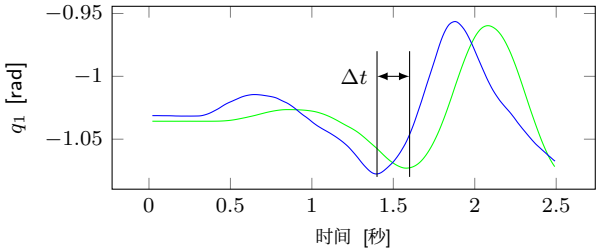


图8：预测性化身模型：抓取动作期间化身右臂第一个关节的测量关节位置（绿色），以及用于预测性限位规避的预测关节位置（蓝色）。两项测量均在操作员侧采集。两个系统之间的通信以及运动执行会产生高达 200 毫秒的延迟（Δt），预测模型会对此进行补偿。

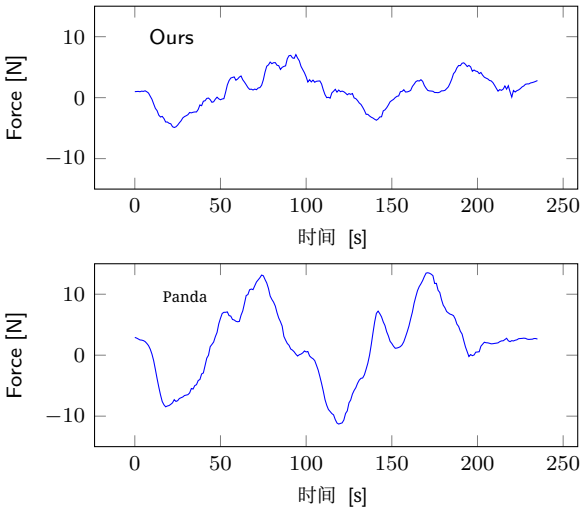


图9：操作臂运动：在运行我们的操作者机械臂控制器（上图）和仅使用 Panda 内置重力补偿（下图）的情况下，以相同的重复运动移动手臂所需的 z方向力（沿人的手掌方向）。

4.3. 力—扭矩传感器校准

不同的末端执行器（SenseGloves、Schunk SIH、Schunk SVH手，以及相应的3D打印安装适配器
）四个相关力矩传感器上各安装了一个。这些传感器的偏置也会导致原始传感器数据几乎无法使用。因此，需要对每个传感器分别进行校准，以补偿这些影响。为此，我们采集了来自不同传感器姿态的 20 个数据样本。每个样本都包含传感器坐标系中的重力向量，以及静态姿态下 100 次传感器测量值的均值。我们使用标准最小二乘求解器 [33]来估计力—扭矩传感器参数，即力和扭矩偏置，以及所有附加组件的质量和质心。配置 Panda 机械臂内置的重力补偿时，使用相同参数，并纳入由力—扭矩传感器本身带来的额外质量和质心变换。末端执行器的硬件发生变化后，或偏置漂移过大时，均需进行一次校准。此方法无法补偿使用过程中的偏置漂移，但足以满足我们的应用需求。

5. 评估

除了参加 ANA Avatar XPRIZE竞赛半决赛外，我们还在实验室环境中进行了多项实验和一项小规模用户研究，以评估所开发的遥操作系统。

5.1. 定量实验

在第一项实验中，我们评估了操作员手臂工作空间。我们使用佩戴在手腕上的VR追踪器，记录了一名坐姿人员执行典型手臂动作时的2,959种不同的六维左手姿态。除了手臂完全伸展时的手部姿态外，大多数姿态都位于人员正前方，这些姿态很可能是在执行操作任务时采用的。首先，我们评估了操作者手臂的初始安装姿态（该姿态根据化身配置确定）。如果能找到该手臂的逆运动学解，则将记录的手部姿态标记为可达，前提是该

表1：操作员手臂工作空间分析

安装姿态	已达到	未到达	已到达 [%]
初始	1,795	1,164	60.6 %
优化后	2,848	111	96.3 %

手臂存在相应的逆运动学解。第二步，我们对不同的手臂安装姿态进行采样，以找到可达手部姿态数量最多的最佳姿态（见图7）。表1列出了定量结果。最终的手臂安装姿态大幅提高了人类操作员与化身手臂工作空间的重叠率（从60.6%提高到96.3%），但需要更复杂的安装配置。

在第二项实验中，我们评估了预测性限位规避模块。通过关节力向操作员提供触觉反馈，以显示化身手臂的位置和速度限值。由于测得的关节位置和速度会受到网络通信（<1ms）以及使用笛卡尔阻抗控制器执行运动所产生的延迟影响（最高可达 200ms，见第 4.1.1 节），操作员控制系统会预测化身手臂的关节构型。图8展示了右臂第一个关节测得的位置和预测位置。预测可补偿延迟，使操作员能够即时感知化身手臂的限位。

在第三项实验中，我们研究了移动操作员工作站手臂所需的力和力矩，因为这会直接影响操作员疲劳。我们通过读取力矩传感器的测量值，测量施加在手臂上的力和力矩。手臂以相似的方式移动两次：一次仅启用 Panda 重力补偿（即 $\tau_{cmd} = 0$ 参见公式（1）），另一次

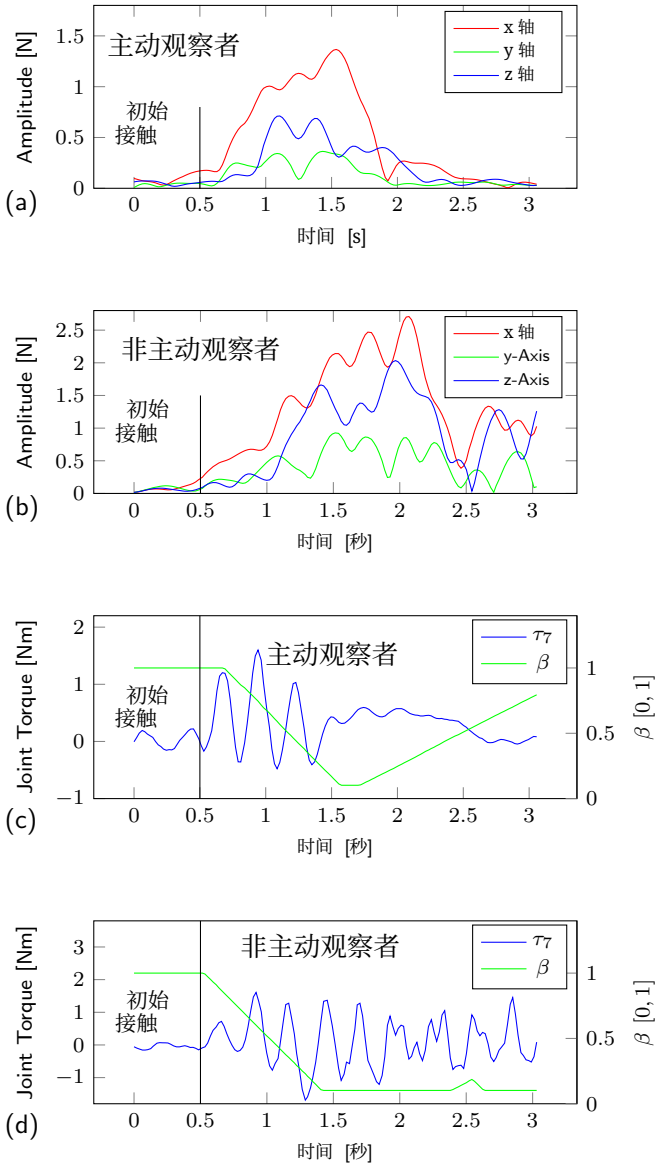


图 10：振荡观测器模块。将花瓶放到桌子上后，每个笛卡尔轴在 5.7 Hz 下均产生图示的振幅响应（（a）和（b））。我们以相近的执行过程进行了两次实验。第一次执行时，振荡观测器处于主动状态（（a）和（c））；第二次执行时，观测器处于非主动状态（（b）和（d））。图中还示例绘出了发送至操作员 Panda机械臂的相应关节力矩，以第 7 个关节为例（（c）和（d））。力反馈按 β（c）进行缩放，该值由振荡观测器计算得出。请注意，β（d）中所示的值虽已计算，但执行过程中并未使用。

则在我们的机械臂力控制器运行时进行。在图 9 中，展示了一个示例轴方向上的力。结果表明，使用外部力矩传感器能够让操作员在使用系统时感受到更少的束缚。

在最后一项实验中，我们分析了振荡观测器模块（见第 4.1.3 节）。该模块监测化身力反馈通道，以检测并抑制闭环控制器中的振荡。我们使用化身系统将一个金属花瓶重重地放在桌子上（见图 6）。图 10 展示了操作员侧执行的关节力矩，以及力反馈测量的频率响应。虽然振荡并未立即消除（c），但降低反馈增益后，振荡便如预期般得到抑制。通过分析（a）和（b）中所示的频率响应，可检测到振荡。增益 β 以允许的最大速率降低，并在 0.8 s 内降至 0.1。随后，操作员感受到的接触力变弱，振荡停止（以操作员机械臂第 7 个关节的力矩指令为例，如（c）所示），增益随后再次提高，从而恢复操作员的力反馈。总之，振荡观测器模块是我们简单的力反馈控制回路中不可或缺的部分，可确保操作安全。

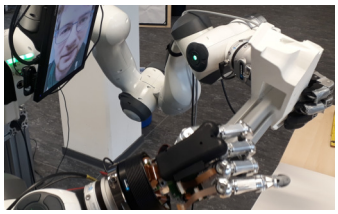
5.2. 用户研究

我们的目标是利用本系统，在远程位置进行操作时营造沉浸且直观的体验。由于每个人对不同控制机制的表现是否出色或直观都有自己的偏好和主观感受，我们邀请未经训练的操作者参与用户研究，对比不同的远程操控方法。受 COVID-19 疫情影响，我们只能邀请身边的同事作为受试者，这极大限制了研究范围。尽管所有参与者都对系统有大致了解，但他们都是在本次研究中首次实际操作该系统。

我们邀请了五名参与者执行双手插销入孔操作任务。首先，他们需要抓取两种不同的物体：一根小铝条和一个带孔的 3D打印部件。随后，应将铝条插入孔中（见图 11）。化身机器人已预先放置在桌子前方，两个物体均位于化身的工作空间内。参与者使用位于同一房间内的操作员站控制机器人。视觉反馈仅通过头戴式显示器呈现的化身视角提供。由于手指与物体之间的摩擦力极小，且公差严格，这项任务颇具挑战性，需要精准对准插入位置。

每位参与者分别使用以下控制模式完成任务三次：

1. 启用力反馈的操作员站，2. 禁用力反馈的操作员站，以及 3. VR控制器。



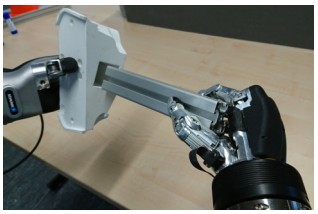


图11：未经训练的操作者参与的用户研究：必须抓取两个物体，并将杆插入孔中。

表2：用户研究的成功率和用时。

远程操控模式	成功	完成时间 [秒]	
		Mean	标准差
1) 带反馈的外骨骼	4/5	119.0	117.1
2) 不带反馈的外骨骼	5/5	123.0	88.4
3) VR控制器	3/5	126.3	25.8

在第一种控制模式下，所有系统组件均按本文所述启用。第二种控制模式禁用了所有力反馈和触觉反馈，即操作员只能依靠视觉反馈。第三种控制模式使用两个 HTC Vive VR控制器作为输入设备。按住扳机按钮时，相应的虚拟化身手臂会跟随控制器移动。另一个按钮被编程为在预设的张开和闭合手部位姿之间切换。

完成任务的最长时间为 5 分钟，超时则判定为失败。物体掉落到可达工作空间之外，会导致试验失败。掉落在虚拟化身工作空间内桌子上的物体可以重新抓取，且不受惩罚。参与者可以在正式测试开始前，先体验每种控制模式约 1 分钟。

表2报告了用户研究的定量结果。不同远程操控模式下，成功完成任务所需的时间相当接近。通过这些实验我们发现，完成时间很容易受到外部因素的影响，例如手指摩擦力不足导致物体掉落，或采用不同的抓取和物体操作方式；这些因素与所使用的操作员界面无关。此外，人类可以轻松地利用视觉反馈弥补力反馈的缺失。三次未成功的试验均因达到 5 分钟的最长实验时间而失败。若要基于性能评分得出更有意义的结论，还需要更多测试样本。

除了这些定量测量外，我们还请参与者针对每种远程操控模式填写一份简短问卷，答案采用 1 至 7 分的李克特量表（见图 12）。结果表明，尤其是在操作物体的感受和直观的手指控制方面，使用操作员站的主观体验要好得多。启用力和触觉反馈在从桌子上拿起物体时优势最大

表 3：虚拟化身手臂安全停止

	场景 1	场景 2	场景 3
第 1 天	已超出扭矩限制	超出速度限制	None
第2天	None	None	软件故障

。这可以归因于额外的反馈提示了手与桌子之间的接触，而由于遮挡，这种接触无法通过视觉感知。所有参与者都表示，使用该系统时感到安全、舒适。尽管实验时间有限，但这表明操作员的认知负荷并不过高。

总体而言，用户研究表明，我们开发的系统对未经训练的操作者来说直观易用。尽管力和触觉反馈并未提高任务的成功率，但问卷结果显示，它增强了沉浸感。

*5.3. ANA Avatar XPRIZE*竞赛

我们的化身系统在为期两天的 ANA Avatar XPRIZE竞赛半决赛期间接受了独立评审的评估[3]。比赛每天都有一名评审担任操作员，在三种预先设定的场景中完成18项任务；另一名评审则担任所谓的“接收者”。接收者与化身机器人一起坐在桌旁，位于另一间房间，距离操作员控制室约100米。两名评审之间的任何交流都只能通过化身系统进行。在试验的第一个小时内，两名评审接受了培训，以熟悉我们的系统。第二个小时，他们必须在没有团队任何指导或支持的情况下完成任务。因此，这些评审并非专家，但与用户研究中的完全未经训练的操作员相比，他们接受过稍多一些的训练（见第5.2节）。图13展示了三种场景：拼图、庆祝一笔商业交易，以及借助机器人的感官探索历史展览中的一件文物。启用力反馈（控制模式 1，见第5.2节）后，操作员能够感受到文物的一些质感。评审重点评估了化身系统实时传递人类感官、动作以及远程位置临场感的能力。在比赛的两天里，不同的评审测试了相同的三种场景。每种场景中得分较高的一次（每种场景最高30分）计入最终得分。另有10分根据半决赛前提交的一段视频评定，该视频展示了系统在我们实验室中的运行情况[4]。我们的 NimbRo 团队取得了近乎满分的成绩，以99分（满分100分）位列半决赛第一。

[3]有关竞赛的视频资料可在此处查看： http://ais.uni-bonn.de/nimbro/AVATAR/

[4]https://www.youtube.com/watch?v=yGwJIDBMolk

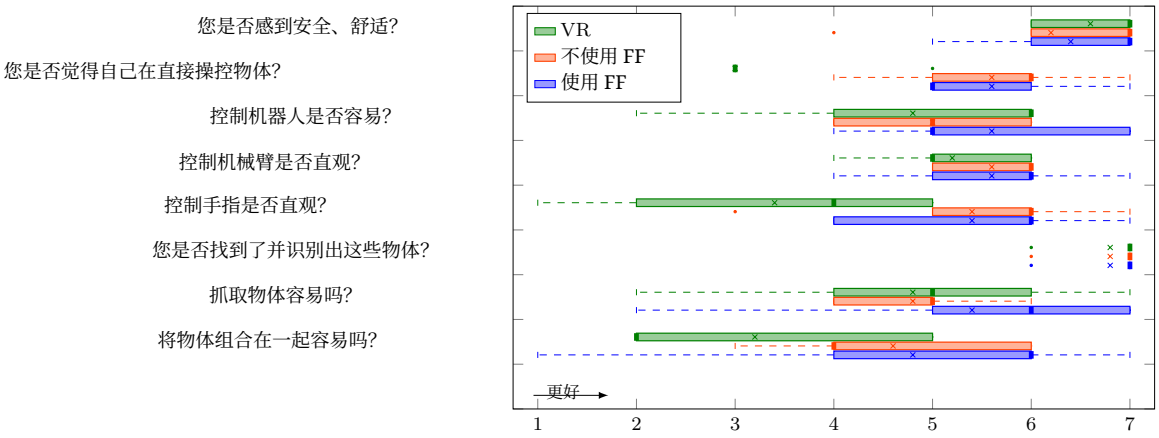


图 12：用户问卷的定性结果。对于问卷中记录的每个方面，我们展示了中位数、下四分位数和上四分位数（包括四分位距）、下限和上限、离群值（以 •标记）以及平均值（以 ×标记）。

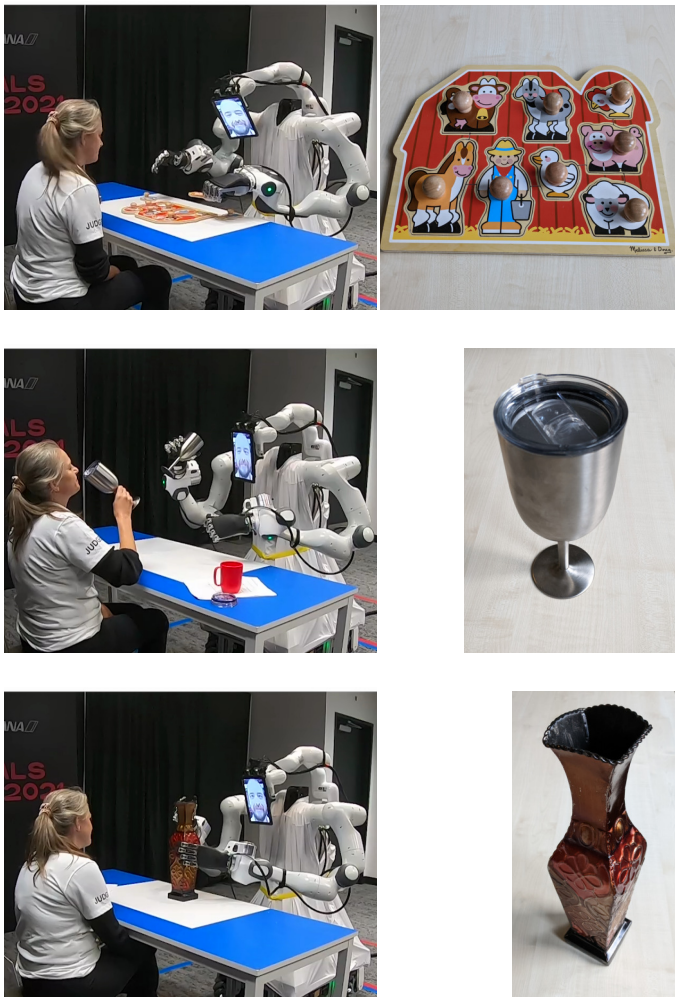


图 13：ANA Avatar XPRIZE 半决赛场景（左）及所用物体（右）。三个场景分别为：拼图（上）、庆祝商业交易达成（中）和探索文物（下）。

我们分析了正式半决赛测试期间记录的数据，以进一步了解系统的技术性能。以下报告部分结果。

5.3.1. 安全系统

化身机器人一个重要的设计考量，是能够在靠近人类并与人类协作时安全运行。因此，当测得意外的高力/力矩时，化身机械臂控制器会立即停止 Panda机械臂（见第 4.1.1 节）。在六个正式场景的演示过程中，这种行为触发了三次（见表 3）。

第 1 天，两次机械臂停止都是由超过扭矩和速度限制所触发。第一次，操作员和接收者进行了力度很大的“击掌”，导致施加到机器人上的力矩迅速增大，超过了关节扭矩限制。预测性限位规避模块无法阻止操作员施加如此大的接触力，因为操作员手臂的扭矩限制也已达到。在第 1 天的第二个场景中，操作员向接收者挥手。操作员和化身手臂的运动学链不同，因此在操作者手臂速度和加速度较低的情况下，化身侧仍需要较高的关节加速度和速度。预测性限位模块尝试降低操作员挥手的速度，但出于安全考虑，为了始终让操作员掌控系统，人类可以克服这些施加的反馈力。此时，操作员很快学会以稍慢、所需加速度较低的方式继续挥手。在比赛第二天，化身右臂在未被主动移动时停止了一次。经过一番调查，我们发现这是由一个极不可能发生的竞态条件导致的软件故障。比赛结束后，这个问题很容易就修复了。

在所有情况下，化身和操作员机器人都以安全的方式继续工作，这对于人机交互至关重要。我们提供给操作员的直观反馈

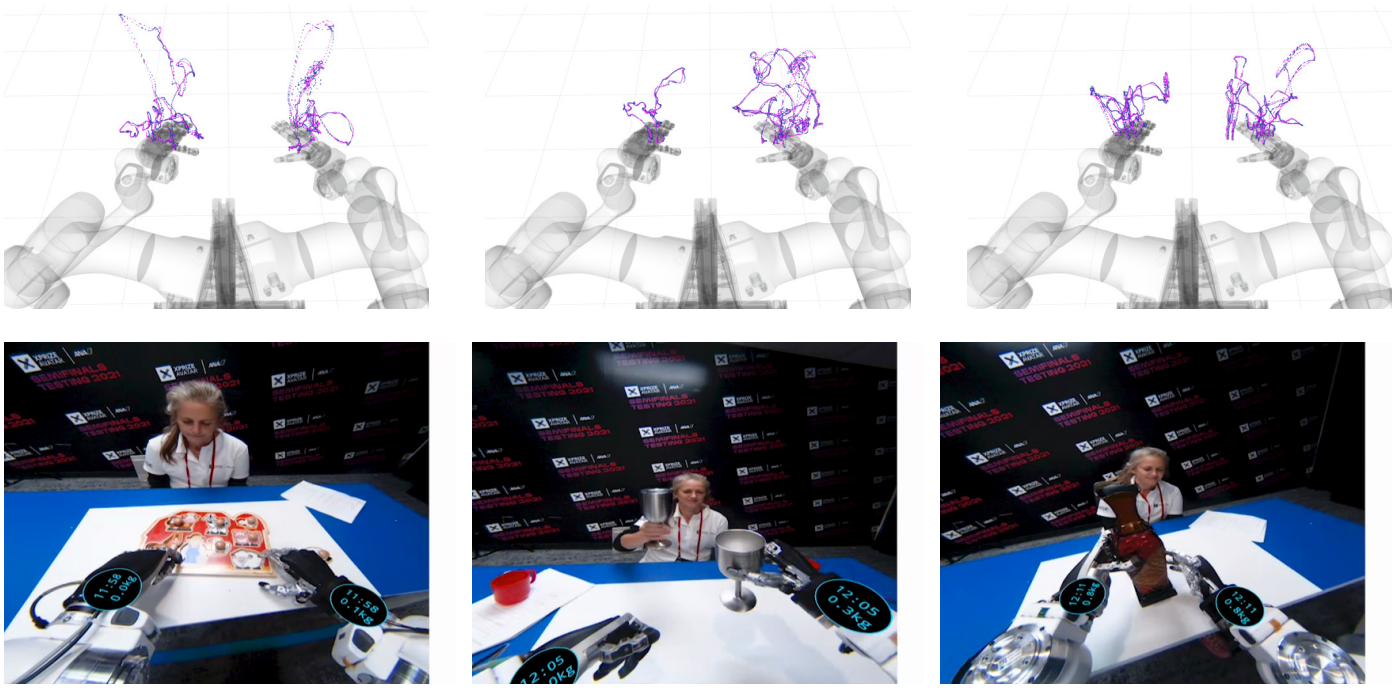


图14：ANA Avatar XPRIZE竞赛半决赛期间所有场景（解谜、庆祝商业交易、探索文物）的工作空间分析。上图：公共坐标系中化身（蓝色）和操作员（洋红色）的手部位置。下图：操作员的虚拟现实视角。

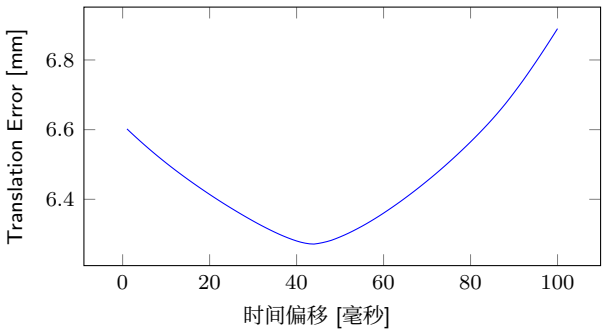


图15：化身手臂延迟分析。图中显示了计算得出的平均翻译误差，即比较当前化身手部位置与向未来偏移后的操作员指令所得的误差。均值是根据双臂在全部六个官方竞赛场景中的数据计算得出的。最小值出现在44毫秒处，这正是我们系统估算的往返延迟——包括网络延迟和运动执行时间。

使其能够即时掌握态势，并立即做出反应和学习，以继续执行正在进行的任务。

5.3.2. 手臂控制器精度

优化操作员可用的工作空间后（见第5.1节），图14展示了竞赛第二天三个场景中实际使用的工作空间。竞赛任务所需的工作空间相对较小，因此我们的系统没有遇到任何问题。我们使用相同的数据分析手臂控制器的空间精度和时间精度，也就是在评估任务期间，化身机械臂跟随操作员指令的精准程度和速度。

在六个正式比赛场景的整个过程中，我们以 1000 Hz 的频率采集了操作员和化身手部的实测位置。随后，我们计算了每条机械臂对应目标位置与实际位置之间的平移误差，得到 6.6 mm 的平均平移误差。此外，我们还研究了手臂控制器中的估计延迟，其中包括网络通信、控制器运行时间和运动执行。我们将化身手部的实测位置与最多延迟 100 ms 的操作员手臂控制位置进行比较，并按照上述方法计算平均平移误差。图 15 显示了在给定时间偏移下，所有比赛任务和双臂的平均平移误差。采用 44 ms 的时间偏移时，平移误差最小，平均平移误差为

表 4：ANA Avatar XPRIZE 半决赛中的翻译误差 [mm]。

	第 1 天			第2天		
场景	1	2	3	1	2	3
左臂	6.4	5.7	7.9	4.9	3.8	4.8
44 毫秒偏移[1]	5.8	5.3	7.6	4.6	3.6	4.5
右臂	13.2	9.5	6.4	6.3	5.5	5.1
44 毫秒偏移[1]	12.5	9.2	6.0	6.3	5.2	4.8

[1]操作员站与化身之间的延迟（见图 15）

6.3 mm。表 4 报告了双臂在所有任务中采用和不采用时间偏移时的结果。值得注意的是，在比赛首日的场景 1 和场景 2 中，右臂的误差相对较大。这可以用执行的安全停止来解释（见第 5.3.1 节）。将虚拟化身手臂安全地渐变至指令姿态约需两秒，因此可能导致较大的位置误差。总体而言，观测到的误差较小，操作员难以察觉；通过在整个系统层面进行更精确的校准，还可能进一步降低误差。估计得到的 44 ms 往返执行延迟可供未来改进系统时参考。

6. 讨论与结论

本研究提出了一种双臂遥操作系统，由基于外骨骼的操作员控制站和拟人化化身机器人组成。两个组件通过我们设计的力与触觉反馈控制器进行通信，使操作员和直接与化身交互的人员都能安全、直观地进行遥操作。该控制方法不依赖运动学参数，仅使用通用的笛卡尔手部坐标系来传递指令和反馈。利用预测性限位规避化身模型，可将操作员侧和化身侧的手臂限位以较低延迟通过力反馈呈现给操作员。振荡观测器和阻尼模块通过暂时降低力反馈增益，检测并抑制反馈控制回路中的振荡。此外，利用力-扭矩传感器的测量数据，可在化身侧未发生接触、操作员移动机械臂时，为操作员营造失重感。

我们通过让未经训练的操作员参与用户研究以及开展实验室实验，对该系统进行了评估。此外，该系统在 ANA Avatar XPRIZE竞赛半决赛中表现出色，获得了 100 分中的 99 分。这证明了我们系统及其控制方法直观易用且可靠。

致谢

本研究由德国研究基金会（DFG）在德国卓越战略框架下资助，项目编号为 EXC-2070 - 390732324 - PhenoRob。

参考文献

[1] E. Krotkov、D. Hackett、L. Jackel、M. Perschbacher、J. Pippine、J. Strauss、G. Pratt、C. Orlowski，《DARPA机器人挑战赛决赛：成果与展望》，《Journal of Field Robotics》34（2017）229–240。[2] H. Kitano、S. Tadokoro、I. Noda、H. Matsubara、T. Takahashi、A. Shinjou、S. Shimada，《RoboCup救援赛：将大规模灾害中的搜索与救援作为自主智能体研究领域》，载于：国际系统、人类与控制论会议（SMC），第6卷，1999年，第739–743页。[3] P. Oh、K. Sohn、G. Jang、Y. Jun、B.-K. Cho，《DRC-Hubo@UNLV团队参加2015年DARPA机器人挑战赛决赛方案的技术概述》，《Journal of Field Robotics》34（2017）874–896。[4] A. Stentz、H. Herman、A. Kelly、E. Meyhofer、G. C. Haynes、D. Stager、B. Zajac、J. A. Bagnell、J. Brindza、C. Dellin等，《CHIMP：卡内基梅隆大学高度智能的移动平台》，《Journal of Field Robotics》32（2015）209–228。[5] S. Karumanchi、K. Edelberg、I. Baldwin、J. Nash、J. Reid、C. Bergh、J. Leichty、K. Carpenter、M. Shekels、M. Gildner等，《RoboSimian团队：在2015年DARPA机器人挑战赛决赛中进行半自主移动操作》，《Journal of Field Robotics》34（2017）305–332。[6] M. Schwarz、T. Rodehutskors、D. Droeschel、M. Beul、M. Schreiber、N. Araslanov、I. Ivanov、C. Lenz、J. Ra-zlaw、S. Sch¨uller、D. Schwarz、A. Topalidou-Kyniazopoulou、S. Behnke，《NimbRo救援机器人：使用移动操作机器人Momaro完成灾害响应任务》，《Journal of Field Robotics》34（2017）400–425。[7] D. Lee、K. Huang，《用于交互式机器人系统的被动设定位置调制框架》，《IEEE机器人学汇刊》26（2010）354–369。[8] R. J. Anderson、M. W. Spong，《具有时延的遥操作器双边控制》，载于：IEEE国际系统、人类与控制论会议（SMC），第1卷，1988年，第131–138页。[9] B. Hannaford、J.-H. Ryu，《触觉界面的时域无源性控制》，《IEEE机器人学与自动化汇刊》18（2002）1–10。[10] P. Berestesky、N. Chopra、M. W. Spong，《通过互联网进行双边遥操作中的离散时间无源性》，载于：IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA），第5卷，2004年，第4557–4564页。[11] J.-H. Ryu、C. Preusche，《时变通信时延下遥操作器的稳定双边控制：时域无源性方法》，载于：IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA），2007年，第3508–3513页。[12] S. Hirche、M. Buss，《触觉遥操作中的以人为导向的控制》，《IEEE会刊》100（2012）623–647。[13] V. Chawda、M. K. O'Malley，《时变通信时延下双边遥操作的位置同步》，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》20（2014）245–253。[14] J. Artigas、J.-H. Ryu、C. Preusche，《基于时域无源性的遥操作中的位置漂移补偿》，载于：2010年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议，IEEE，2010年，第4250–4256页。[15] A. Coelho、H. Singh、T. Muskardin、R. Balachandran、K. Kon-dak，《基于时域无源性方法的遥操作中更平滑的位置漂移补偿》，载于：IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS），2018年，第5525–5532页。[16] X. Xu，《时延遥操作中的触觉通信》，博士论文，慕尼黑工业大学，2017年。

[17] R. R. Burridge、K. A. Hambuchen, 《利用预测增强跨时延的远程机器人监督》, 载于: IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）, 2009年, 第5628–5634页。[18] K. Hauser, 《自由形式任务辅助遥操作中的识别、预测与规划》, 《Autonomous Robots》35（2013）241–254。[19] Y. Wu、P. Balatti、M. Lorenzini、F. Zhao、W. Kim、A. Ajoudani, 《用于移动协作机器人助手移动操作控制的遥操作界面》, IEEE《机器人与自动化快报》（RAL）4（2019）3593–3600。[20] D. Rakita、B. Mutlu、M. Gleicher, 《一种用于机器人手臂有效模仿式遥操作的运动重定向方法》, 载于: ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）, 2017年, 第361–370页。[21] T. Klamt、M. Schwarz、C. Lenz、L. Baccelliere、D. Buon-giorno、T. Cichon、A. DiGuardo、D. Droeschel、M. Gabardi、M. Kamedula、N. Kashiri、A. Laurenzi、D. Leonardis、L. Mura-tore、D. Pavlichenko、A. S. Periyasamy、D. Rodriguez、M. So-lazzi、A. Frisoli、M. Gustmann、J. Roßmann、U. S¨uss、N. G. Tsagarakis、S. Behnke, 《Centauro机器人远程移动操作：全身临场遥控与自主操作员辅助》, 《Journal of Field Robotics》37（2020）889–919。[22] L. Guanyang、G. Xuda、L. Lingzhi、W. Yan, 《用于太空探索的基于触觉的遥操作：主从运动映射与触觉渲染》, 《Chinese Journal of Aeronautics》32（2019）723–736。[23] F. Abi-Farrajl、B. Henze、A. Werner、M. Panzirsch、C. Ott、M. A. Roa, 《利用任务相关触觉反馈进行人形机器人遥操作》, 载于: IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）, 2018年, 第5010–5017页。[24] J. Bimbo、C. Pacchierotti、M. Aggravi、N. Tsagarakis、D. Prat-tichizzo, 《在杂乱环境中使用可穿戴触觉反馈进行遥操作》, 载于: IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）, 2017年, 第3401–3408页。[25] G. Niemeyer、J.-J. E. Slotine, 《具有时延的远程操控》, 《The International Journal of Robotics Research》23（2004）873–890。[26] F. Porcini、D. Chiaradia、S. Marcheschi、M. Solazzi、A. Frisoli, 《基于外骨骼的双手遥操作架构评估：采用独立无源化从设备》, 载于: IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）, 2020年, 第10205–10211页。[27] A. Rochow、M. Schwarz、M. Schreiber、S. Behnke, 《用于沉浸式临场遥控化身的虚拟现实面部动画》, 载于: 2022年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）, IEEE, 2022年, 第2167–2174页。[28] M. Schwarz、S. Behnke, 《利用球面渲染实现低延迟沉浸式6D电视可视化》, 载于: IEEE-RAS第二十届人形机器人国际会议（Humanoids）, 2021年。[29] M. Schwarz、C. Lenz、A. Rochow、M. Schreiber、S. Behnke, 《NimbRo Avatar：结合力反馈远程操控的交互式沉浸式临场遥控》, 载于: IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）, 2021年。[30] M. Schwarz、S. Behnke, 《利用球面渲染实现低延迟沉浸式6D电视可视化》, 载于: 2020年IEEE-RAS第二十届人形机器人国际会议（Humanoids）, IEEE, 2021年, 第320–325页。[31] E. Jacobsen、R. Lyons, 《滑动离散傅里叶变换》, IEEE《信号处理杂志》20（2003）74–80。[32] E. Jacobsen、R. Lyons, 《滑动离散傅里叶变换的更新》, IEEE《信号处理杂志》21（2004）110–111。[33] D. Kubus、T. Kroger、F. M. Wahl, 《基于惯性参数的在线刚体识别与位姿估计》, 载于: IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）, 2007年, 第1402–1408页。