工具振动的触觉反馈有助于遥操作建筑施工

Yijie Gong、Haliza Mat Husin，*IEEE* 会员、Ecda Erol、
Valerio Ortenzi 和 Katherine J. Kuchenbecker，*IEEE* 会士

arXiv:2302.00741v1 [cs.HC] 1 Feb 2023

摘要—**遥操作机器人学在帮助工人于施工现场安全地操控建筑构件方面展现出良好前景；然而，主要依赖视觉反馈会限制其在接触刚度较大或视野不佳情况下的效率。可靠且经济的触觉反馈能够弥补这一感知缺口，促进建筑施工活动。因此，我们设计了一种基于音频的触觉反馈系统，用于测量机器人工具所感受到的振动，并使操作员能够实时感知这些振动。通过优化系统中现成加速度计和音圈致动器的位置，实现了精准的触觉传递。我们开展了一项用户研究，评估这种自然的振动反馈如何影响操作员在遥操作机器人装配中的表现。30 名参与者使用双手遥操作系统，在三种随机排序的触觉反馈条件下搭建结构：无振动、单轴振动和三轴振动。结果表明，参与者在积累一定任务经验后会利用这两种触觉反馈，使第二次试验中的振动和作用力显著降低。主观反馈表明，触觉反馈降低了参与者感知到的任务难度、任务时长和疲劳程度。这些结果表明，在遥操作建筑机器人上提供此类振动触觉反馈，能够提升用户表现和体验。**

索引词—**遥操作、振动触觉反馈、装配任务、用户体验**

I. 引言

TELEOPERATION 已被证明能够提升人类工作者在微创手术、搜索与救援以及建筑施工等应用中的安全性和舒适度 [1]。在遥操作施工活动中，操作员通常使用操纵杆和控制杆控制机器人，并与末端执行器保持一定距离，以确保自身的人身安全 [2]。在此类场景中，操作员主要依靠直接视野或摄像头画面来操作机器人。鉴于户外环境混乱复杂，这种视觉反馈往往会受到视野条件不佳和完全遮挡的影响，导致机器人与其环境之间不受控制的交互，尤其是在接触频繁的组装过程中 [3]。因此，研究人员一直致力于通过为机器人配备传感器 [4] 并向操作员提供触觉反馈 [5]，来增强操作员的能力。

遥操作中的触觉反馈系统通常会测量或估算机器人的接触力，并实时将该力呈现给用户 [6]，从而提供直接力反馈。Horie 等人 [7] 和 Hirabayashi 等人 [8]分别使用力传感器测量施加在机器人末端执行器上的力，并通过 PHANToM 触觉设备和定制设备呈现相应的力。类似地，Tang 等人为挖掘机开发了一种触觉反馈系统，通过电机驱动操纵杆向操作员提供估算的力反馈 [9]。他们的用户研究表明，这种力反馈在方块移动任务中减少了施加力和接触时间。这些系统的一个缺点是，大多数系统都设计为固定在带有显示器的桌面上；而在建筑施工中，操作员需要在现场走动，因此这种设计并不实用。此外，三轴力传感器在建筑施工中通常成本效益较低。

一些研究人员还探索了感觉替代，即通过其他通道呈现力。例如，Massimino 和 Sheridan 将测得的力的大小映射为固定频率振动的强度，并将该振动传递给用户 [10]；他们的用户研究表明，这种振动反馈在插销入孔任务中具有较高的成功率和时间效率。具体而言，在施工场景中，Nagano 等人使用单轴压电传感器测量机器人操作臂的加速度，并通过音圈致动器将经振幅调制的固定频率振动传递至用户手腕；他们的用户研究表明，这种力反馈降低了杆件插入任务中的峰值力 [11]。

自然振动触觉反馈为建筑施工提供了一种颇具吸引力的替代方案，可替代直接力反馈和感觉替代。一般来说，在非结构化环境中，测量并输出振动比测量并输出力更简单，因为振动触觉传感器和致动器通常体积小、价格低廉。此外，人体振动触觉感知的带宽很宽，可达 1000 Hz，其中包括刚性物体组装时接触通常会产生的高频振动 [12]。这一能力促使研究人员在遥操作过程中提供生动的宽带触觉反馈

本研究部分由德国研究基金会（DFG）通过德国卓越战略项目 EXC 2120/1 – 390831618 资助。Yijie Gong、Haliza Mat Husin 和 Katherine J. Kuchenbecker 隶属于德国斯图加特 70569 马克斯·普朗克智能系统研究所触觉智能系（电子邮箱：gong@is.mpg.de、hmh@is.mpg.de、kjk@is.mpg.de）。Katherine J. Kuchenbecker 同时隶属于斯图加特大学。Ecda Erol 和 Valerio Ortenzi 曾隶属于德国斯图加特 70569 马克斯·普朗克智能系统研究所触觉智能系。Ecda Erol 现隶属于瑞士苏黎世 8092 苏黎世联邦理工学院机械与过程工程系（电子邮箱：ecda.erol@alumni.ethz.ch）。

手稿 i收稿 ived Month xx, 2023; 修订 ised Month xx, xxxx；录用 d xxxx年xx月。

本文已提交至 IEEE，拟 发表。版权可能在未另行通知的情况下转让，届时此版本可能不再可访问 le.

。作为初步尝试，Kontarinis 和 Howe 设计了一种双指遥操作系统，同时具备标准力反馈和自然振动触觉反馈 [13]；机器人指尖处振动的一个轴向分量由加速度计测量，并通过扬声器反向播放给用户。他们的研究表明，自然振动触觉反馈有助于缩短用户的反应时间，并减少用户在穿刺任务中施加的力。

最近，VerroTouch [14], [15] 是一种自然逼真的振动触觉反馈系统，专为达芬奇机器人（直觉外科公司）开发；达芬奇机器人原本不具备触觉反馈功能。VerroTouch 使用三轴加速度计测量机器人左右工具的振动，并通过安装在达芬奇手柄上的定制音圈执行器，将振动传递到用户的手部 [15]。初始版本仅使用一个加速度计轴 [14], , 后续版本则对三个轴的信号求和 [15], , 但这一差异从未得到研究。针对外科医生和非外科医生开展的研究表明，他们强烈偏好在机器人手术训练任务中使用此类振动触觉反馈 [16]。VerroTouch 配备了定制电子设备，供达芬奇机器人使用，但其方法也可调整后应用于其他场景，包括与地面无连接的手持式接口。与通过感觉替代来表示力的振动相比，宽带振动更为直观，因为它能重现人们直接使用工具时感受到的自然物理接触感 [13], [15]。

在此背景下，本研究旨在升级 Verro-Touch，并拓展其在施工场景中的应用。我们计划设计并评估一种易于制作、模块化、自然且可靠的振动触觉反馈系统，使用户能够实时感知建筑机器人的末端执行器所经历的宽带振动。除了定量评估系统性能外，我们还希望了解这类触觉反馈对操作人员执行遥控机器人装配任务时的影响。我们假设，工具振动的振动触觉反馈将

H1:帮助用户减小工具振动，并降低施加在建筑材料上的力，***H2:*** 增强用户的信心并减轻其心理压力，***H3:*** 与仅显示单个轴向的振动相比，显示三个正交工具振动的总和会带来更好的效果，并且***H4:*** 总体而言，用户的手部尺寸与其偏好的反馈强度呈正相关。

为检验这些假设，我们使用现成的音频元件构建了一套触觉系统，以实现高性价比、易获取、模块化和高可靠性。该系统的工作原理将在第二节介绍。我们有系统地选择了加速度计、音频设备和音圈，并研究如何优化加速度计和音圈致动器的布置，为用户提供高质量的反馈。出于在真实的非结构化施工现场进行测试的安全考虑，我们在较小规模上，借助一套精确的商用遥操作系统验证了系统的性能。因此，本研究采用达芬奇 Si 机器人，因为它能自然地将人体运动映射为机器人运动，并且

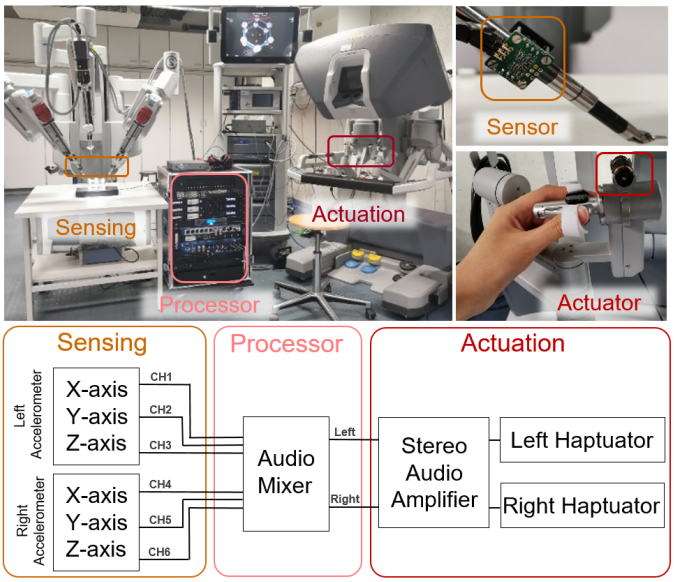

图 1. 我们的基于音频的触觉反馈系统与达芬奇机器人；该系统为操作人员提供实时振动触觉反馈。系统由两个用于振动感知的加速度计、用于处理（音频混音器）和放大（立体声音频放大器）的现成音频设备，以及两个用于输出振动的音圈执行器组成。

不提供任何形式的触觉反馈。随后，我们开展了一项用户研究来检验这些假设。第三节介绍了本次实验评估的方法。第四节呈现结果，第五节对此进行讨论。第六节总结本研究的启示、局限性和未来潜力。

II. 触觉反馈系统

如图 1 所示，我们基于音频的振动触觉反馈系统由感测、处理和执行单元组成，并应用于达芬奇 Si 机器人。我们的设计受到其他一些采用音频技术的触觉系统启发，例如将 VerroTouch 振动录制为音频信号 [17], 采用音频处理技术压缩振动触觉信号 [18],使用声卡和音频放大器输出振动触觉信号 [19], 以及使用音频扬声器生成触觉振动 [20], [21]。具体而言，我们的系统包括：两个安装在达芬奇机器人的工具上的三轴宽带加速度计，用于测量振动；一个音频混音器，用于处理感测到的振动并将其输出至执行单元；以及两个商用音圈致动器，它们接收来自立体声音频放大器的放大信号，并将感测到的振动传递给用户。

A. 系统设计

人体振动触觉感知为最低带宽要求提供了基准：20–1000Hz [12]。因此，我们选择了频率带宽均适用的部件，以确保高保真传输每种工具所感受到的振动。对于感知单元，我们选用了两块评估板上的三轴加速度计（亚德诺半导体 EVAL-ADXL 356b，20mm × 20 mm × 5 mm，0–1500 Hz

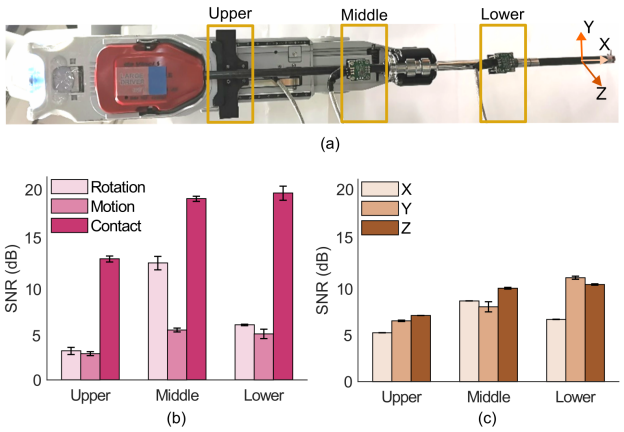

图 2。（a）加速度计的三个可能位置。（b）三个基本动作——旋转、运动和接触——中每个加速度计的平均信噪比。（c）接触动作中三个加速度计各轴的平均信噪比。误差条表示多次试验中的标准差。

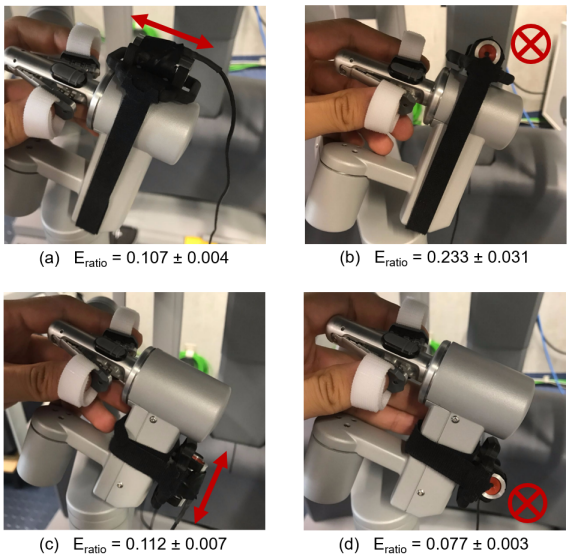

图 3。左侧手柄上致动器的测试位置：（a）与手柄上部平行；（b）与手柄上部垂直；（c）与手柄下部平行；（d）与手柄下部垂直。箭头和叉号表示致动器在各位置的振动输出方向。每个位置下方显示 E_{ratio} 结果，形式为平均值 ± 标准差。

带宽），并将其分别安装在机器人的两种工具上，以捕捉它们的振动。对于处理单元，我们采用带通滤波器设为 80–1000 Hz 的数字音频混音器（Soundcraft Ui24R），对加速度计传来的信号进行混合、滤波并调整幅值。略微收窄的频率范围用于滤除达芬奇机器人的低频自身振动，并防止闭环不稳定性 [15]。对于执行单元，我们使用立体声音频放大器（Renkforce T21，20–20 000 Hz），其每个通道的最大输出功率为 50 dB，可驱动两个致动器（Tactile Labs Haptuator Re-design）。Haptuator（直径 16 mm × 29 mm，带宽 >1000 Hz）可提供高质量的单轴触觉振动反馈 [22]。遥操作机器人系统中的所有部件（达芬奇 Si 机器人和触觉反馈系统）共用同一电气接地，以避免系统噪声。

部件的放置位置和方向会对系统性能产生决定性影响。正如第 II-B 节所研究的，加速度计对工具末端执行器接触的灵敏度取决于其安装位置。同样，Haptuator 能否在较宽的频率范围内使用户手指准确地产生振动，也取决于其安装方式，因此第 II-C 节将详细讨论其放置位置。

B. 在工具上放置加速度计

我们的目标是为用户提供逼真的工具接触振动振动触觉反馈，并减少由工具运动和旋转引起的机器人内部振动的传递幅度。无论振动源自何处，诱发的振动都会沿刚性结构传播，其强度逐渐衰减，并受到结构共振的显著影响。为确定系统中加速度计的最佳布置位置，我们使用定制的 3D 打印支架，将相同的加速度计安装在机器人左侧工具的三个不同位置，如图 2(a) 所示。上方位置靠近机器人工具的安装点，与 VerroTouch [15] 的位置相同。中间位置在工具杆上，下方位置在套管上；套管是一根支撑工具的钢管。我们采集了三种遥操作动作期间的振动，每种动作约 15 秒：(i) 旋转，即工具绕其中轴 x 轴旋转；(ii) 运动，包括平移和旋转，即工具向各个方向移动以模拟伸手过程；(iii) 接触，即末端执行器与另一个物体碰撞。我们选择这些基本动作，是因为它们经常出现在装配任务中，例如移动和旋转工具以重新放置物体。

我们使用信噪比（SNR，即有用信号功率与背景噪声功率之比）评估各传感器位置的信号质量。将三轴加速度的均方根（RMS）定义为信号，而噪声则定义为工具静止时另一次实验测得的加速度。如图 2(b) 所示，位于中部和下部的加速度计在接触时具有较高的信噪比。然而，位于中部的加速度计在旋转过程中测得了强烈的干扰振动，因此其旋转信噪比最高；这些振动似乎源自支撑工具杆的内部轴承。因此，本研究中加速度计布置的最佳选择是下部位置。

我们还分析了仅在接触动作期间各轴的信噪比，如图 2(c) 所示。上部和中部位置的三个轴的信噪比相近，而下部位置的 x 轴表现不如另外两个轴。这些差异可能源于工具的结构。

C. 致动器在手柄上的定位

振动触觉反馈的质量受限于致动器在手柄上重放工具接触振动的能力。为了提供自然逼真的振动，从致动器传递到手部的失真和衰减应尽可能小。

如图 3 所示，我们考虑了致动器的四种可能安装位置。为了比较振动

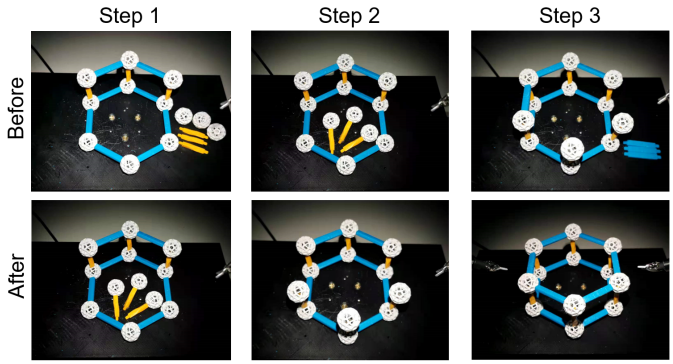

图4. 在建造任务的步骤1中，参与者组装三对白色球体和黄色杆。在步骤2中，他们将组装好的部件插入三个底座球体中。在步骤3中，他们用四根蓝色杆连接上方的球体，形成最终结构。

信号的质量，我们向致动器输入相同的接触信号，并根据振动源的加速度信号能量（ASE）与致动器产生的振动，采用一项指标对输出进行比较。我们将一台三轴加速度计刚性固定在靠近用户指尖握住手柄的位置，以记录实际的振动反馈。单个轴的 ASE 计算如下：

$$E_i = \int_{-\infty}^{\infty} |a_i(t)|^2 dt \tag{1}$$

其中， a_i 是通道 i上的加速度。计算手柄上的加速度信号能量总和（E_x、 E_y和 E_z）与加速度源（E_x^*、 E_y^*和 E_z^*）之比，结果如下：

$$E_{\text{ratio}} = \frac{E_x + E_y + E_z}{E_x^* + E_y^* + E_z^*} \tag{2}$$

比值越高，表示向用户手指传输振动触觉信号的效果越好。如图3所示，致动器安装在位置(b)时，比值明显最高。因此，我们决定在研究中采用这一位置。

D. 从工具到手柄的信号再现

随后，我们测量了重现信号的质量，以确保用户能感受到工具产生的真实振动。我们使用四个相同的加速度计来测量信号质量：将加速度计安装在所选较低位置的两个机器人工具上，并安装在致动器所选安装位置附近的手柄上。实验人员遥操作机器人完成第 II-B 节中提到的三种操作：旋转、运动和接触。连接到工具上的加速度计所采集的信号由音频混音器处理，而手柄上的加速度计则测量致动器产生的振动。由于人类不容易感知振动的方向， [23], 我们采用简单的时域算术求和，将三轴加速度信号转换为单轴信号，这与一些先前研究的做法相同 [15], [24]；在音频混音器中，这种三轴转单轴功能很容易配置。如***H3*** 中所述，我们假设这些求和后的加速度信号比加速度计输出的任何单轴信号都包含更多信息，因为接触振动可能发生在各个方向；我们将在第 III 节检验这一假设。

我们使用互相关（MATLAB 中的 xcorr 和 corrcoef）分析了质量实验期间在机器人工具和机器人手柄上测得的求和信号之间的相似度。结果表明，每个手柄上的加速度信号都与相应加速度计的信号高度相似（两者分别为 $R_{\text{left}} = 0.454$、 $R_{\text{right}} = 0.463$、 $p < 0.001$ 和 $t_{\text{delay}} = 0.042$ 秒），这证明我们的触觉系统能够准确地重现信号，且时间延迟极小。

与VerroTouch相比，我们新开发的基于音频的系统易于使用现成组件搭建，无需定制电子设备，并且可以通过混音器快速重新配置。此外，得益于更优越的感测、处理和致动性能，该系统能够提供实时振动触觉反馈，且噪声更低、信号衰减更小。因此，我们认为，这种技术方案能够为遥操作施工及许多其他应用提供高保真、自然逼真的振动反馈。

III. 实验评估

我们开展了一项用户研究，以评估系统提供的自然振动触觉反馈如何影响操作员在遥操作机器人装配任务中的表现。

A. 参与者

共有30人参与了这项研究（13名女性，17名男性；年龄 $\in [23, 40]$，平均值为28.6，标准差为 $\pm$ 3.49）；其中26人具有工程背景。当被要求在0（新手）至100（专家）的范围内评分时，很少有人熟悉遥操作机器人学（11.7 $\pm$ 14.6）或触觉研究（11.9$\pm$ 16），而许多人有一些建筑施工活动的经验，例如组装乐高积木或宜家家具（68.5 $\pm$ 28.3）。所有人均签署了知情同意书，并因参与研究获得每小时8欧元的报酬。所有参与者均身体健康且惯用右手，并报告视力正常或矫正后正常。本实验遵循马克斯·普朗克伦理委员会在触觉智能框架协议下批准的程序，方案编号为F012B。

B. 实验设置

我们要求参与者完成一项三步装配任务，如图4所示。参与者需要将结构玩具（Zometool Inc.）从半成品状态（图4左上）组装至完全完成状态（图4右下）。这些结构玩具由杆件和中空球体组成；装配过程包括拾取部件、移动部件并将其插入其他部件，以及将其连接到现有结构上，以此模拟现场施工装配流程。详细流程分为以下三个步骤：

步骤1：连接三对黄色杆和球体；步骤2：将黄色杆插入三个底座球体；步骤3：用四根蓝色杆连接上方的球体。

参与者通过 da Vinci Si 的立体内窥镜观察任务材料，并使用两个持针器以正常运动缩放操作任务材料。摄像机和工具的实验装置经过标准化，且

参与者不得移动摄像机或对工具进行离合操作。

为验证***H1***，我们记录了两种工具的振动，并在施工底板下方使用六轴力扭矩传感器（ATI Mini40）记录施加于任务材料上的力。为评估我们的触觉系统对心理压力的影响（***H2***），参与者佩戴腕戴式追踪器（Polar OH1），以在实验期间采集心率。参与者还佩戴了被动降噪耳机，以屏蔽环境声音。

本研究设置了三种不同的振动触觉反馈条件，以探究我们的触觉系统所产生的影响：无反馈（F0）、仅使用一个加速度计轴的反馈（F1），以及将相应加速度计的三个轴的信号相加后计算得到的反馈（F3）。F1和F3条件旨在检验我们的假设***H3***：汇总三轴的振动触觉反馈比单轴反馈提供更多信息。F1使用加速度计的x轴，该轴与工具杆对齐；与另外两个轴相比，它对接触方向的敏感度较低。

为验证***H4***，我们将装满水的容器置于数字秤上，测量每位参与者的手部体积 [25]。我们预期，偏好的振动触觉反馈幅度通常会与个体的手部质量相关，因为对于手部质量较大的参与者，必须向振动触觉执行器输入更大的信号，才能获得相同的手柄加速度。

C. 实验流程

参与者有五分钟时间熟悉系统设置和任务（练习阶段），随后需在 20 分钟内完成三步装配任务（实验阶段）。练习阶段中，参与者可以并且鼓励根据个人偏好，通过调节振动触觉反馈幅度（最高 10 分贝）来调整系统。我们测量每位参与者双手腕关节以下的体积各两次，并记录每只手的平均体积。之后，参与者在三种不同的触觉反馈条件（F0、F1、F3）下，重复进行时长为 25 分钟的试验（包括练习和实验阶段）。为控制学习效应，我们将 30 名参与者随机分配至六组；每组按六种可能的呈现顺序之一体验这些条件（F0–F1–F3、F0–F3–F1、F1–F0–F3、F1–F3–F0、F3–F0–F1、F3–F1–F0）。

如表 I 所示，我们使用两份问卷收集主观反馈。第一份问卷用于记录参与者在每次试验结束后立即产生的主观感受，包含四个定制问题（Q1–Q3、Q5）和六个关于工作负荷的问题，后者直接改编自 NASA任务负荷指数（TLX，Q4.1–Q4.6）：这些问题分别关注心理需求、身体需求、时间需求、表现、努力程度和挫败感 [26]。每个问题的评分范围为 0（完全没有）至 100（完全如此）。第二份问卷旨在比较各次试验中的表现，并在实验结束时填写。该问卷包括三道自由回答题（Q6、Q11、Q12）以及四道关于三次试验间偏好的问题（Q7–Q10）。

表 I 研究期间填写的问卷

	试验后问题
Q1	您在移动建筑材料时有多大把握？（0–100）
Q2	您在组装结构时有多大把握？（0–100）
Q3	您与建筑材料交互的真实感如何？（0–100）
Q4.1	这项任务在精神上有多费力？（0–100）
Q4.2	这项任务在身体上有多费力？（0–100）
Q4.3	这项任务的节奏有多匆忙或紧迫？（0–100）
Q4.4	您完成所要求的任务有多成功？（0–100）
Q4.5	为了达到你目前的表现水平，你付出了多大努力？（0–100）
Q4.6	你感到多么不安、气馁、恼怒、紧张和烦躁？（0–100）
Q5	对于你参与这一构建环节的体验，你有什么看法？（文本）
	实验后问题
Q6	你注意到三个建筑施工环节之间有什么不同吗？（文本）
Q7	哪个建筑施工试验完成得最快？（1、2 或 3）
Q8	哪个建筑施工试验最容易完成？（1、2 或 3）
Q9	哪个建筑施工试验最令人疲惫？（1、2 或 3）
Q10	你最喜欢哪次建造试次？为什么？（1、2 或 3；文字）
Q11	对于包含此步骤的两次试验，你是如何决定选择哪个增益级别的？（文字）
Q12	你对这项研究还有其他意见吗？（文字）

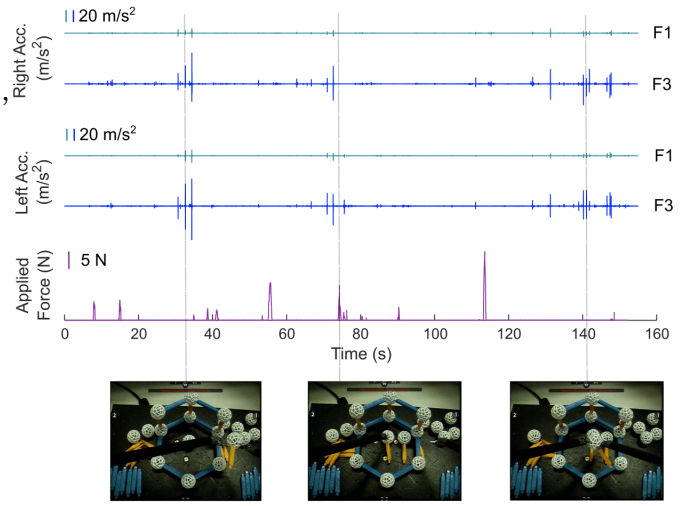

图5. 研究中一次试验的步骤1所对应的工具振动和施加力的大小。每个工具加速度均显示 F1 和 F3 的信号。底部的屏幕截图展示了参与者在标示的三个时间点看到的任务材料的左眼视角。

D. 试验样本数据

图5展示了一位参与者执行组装任务步骤1时的加速度和力数据样例。我们展示了两种工具的 F1 和 F3 信号，并附上参与者左眼视角的三张截图以供参考。本文的补充视频呈现了同一交互过程，并动态绘制了相应的左侧工具振动、右侧工具振动以及施加力的大小随时间的变化。

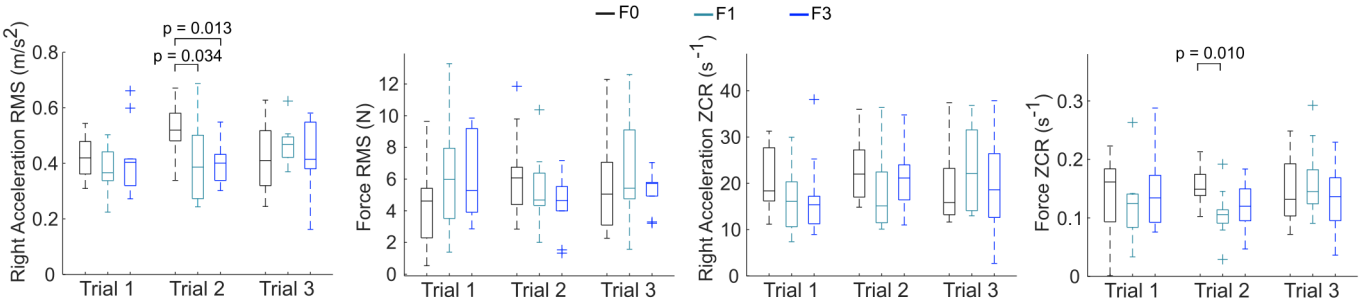

图 6. 按试验分析的加速度计数据和力数据。(a) 右侧加速度计（优势手）加速度总和的均方根；(b) 力的均方根；(c) 右侧加速度的过零率；(d) 力的过零率。箱体底部和顶部分别表示第 25 百分位数和第 75 百分位数的响应，中间线表示中位数。+ 标记表示离群值。超出箱体的线段表示不被视为离群值的最远数据点。具有统计显著性的成对差异以相应的 p值标出。

IV. 结果

我们使用套管上的加速度计测量工具振动的大小，使用力传感器测量施加力，使用任务完成时间评估装配效率，使用心率（HR）追踪器评估操作者的心理压力，使用所选的触觉反馈增益检查两种触觉反馈版本的效果，并通过问卷回答评估系统的整体性能。

A. 信号处理与评估指标

我们为加速度（0.3m/s²）和力矢量大小（0.2N）设置阈值，以去除基线噪声。保留高于阈值的数据，并将低于阈值的数据设为 0。我们使用阈值处理后的加速度和力信号的均方根及过零率（ZCR，即信号每秒穿过零点的次数）来量化信号强度和平均交互强度。我们评估了每次试验的完成程度，但未对这一变量进行详细分析，因为 85 % 的结构已完全完成，且未完成的结构均出现在第一次或第二次试验中。

我们首先使用斯皮尔曼相关系数分析性能指标之间交互的影响。随后，我们进行了以下定量分析，以评估触觉反馈的效果：

- 使用弗里德曼检验分析三种反馈条件之间的差异；若结果显著，则使用威尔科克森符号秩检验，对三对条件进行事后分析；
- 使用克鲁斯卡尔-沃利斯检验分析每次试验中三种反馈条件的影响；使用曼-惠特尼检验，对每次试验中的三对条件进行事后分析。

我们使用 $\alpha = 0.05$ 确定统计显著性，并采用邦费罗尼-霍尔姆校正，对多重比较的显著性水平进行校正。

B. 指标间的相关性

对三次试验的合并数据（$N = 90$次试验）进行 Spearman 相关性分析，以评估工具加速度指标与力指标、平均心率、完成时间、手部体积和 TLX 工作负荷之间的关系。当两个指标呈正相关时，一个指标增加，另一个指标也随之增加；负相关则表示一个指标增加时，另一个指标减少。

我们发现，加速度和力的所有指标之间均呈高度正相关（均为 $p < 0.015$ ），但两种工具的力均方根与加速度过零率除外。两种工具的加速度均方根均与平均心率呈显著正相关（两者均为 $p < 0.001$ ），并与完成时间呈显著负相关（两者均为 $p < 0.01$ ）。两种工具的加速度过零率均与平均心率呈正相关（两者均为 $p < 0.001$ ），并与完成时间呈显著负相关（两者均为 $p < 0.001$ ）。用户手部体积与所选反馈增益呈正相关（$p = 0.002$），与完成时间呈负相关（$p = 0.006$）。TLX 工作负荷与完成时间呈正相关（$p = 0.012$），与左侧工具的加速度过零率呈负相关（$p = 0.014$）。其余指标对之间均未发现显著相关性。

C. 触觉反馈的影响

三种反馈条件的总体影响：我们合并了三次试验的数据，以评估三种反馈条件对左侧和右侧工具加速度、力、完成时间、平均心率及试后问卷的影响。反馈条件对右侧工具加速度均方根有显著主效应（$p = 0.014$）。事后分析显示，F0 的加速度均方根显著高于 F1（$p = 0.036$），且 F0 也有高于 F3 的趋势（$p = 0.052$）。反馈条件对其他任何基于信号的指标均无显著主效应。对于试后问卷，反馈条件对逼真交互有显著主效应（$p < 0.001$）；事后分析显示，F1 和 F3 的逼真程度均显著高于 F0（F0 与 F1：$p < 0.001$；F0 与 F3：$p = 0.004$）。其他问题均未发现显著差异。

各试验中三种反馈条件的影响：由于任务重复进行了三次，参与者随着时间推移积累了经验。为减少这一学习过程的影响，我们还分别分析了每次试验的指标。

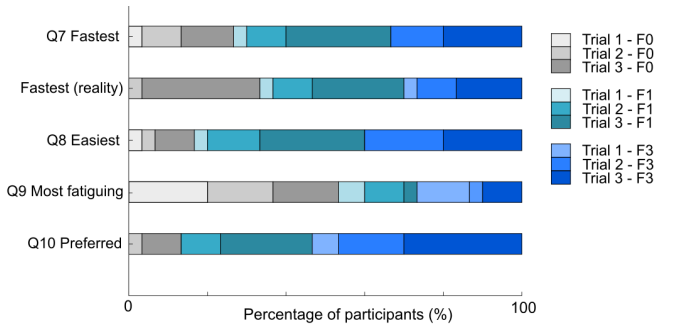

图 7。Q7 至 Q10 的结果。参与者需要指出最快、最容易、最令人疲劳的试验，以及他们最喜欢的试验。第二张图展示了根据记录的完成时间计算出的实际最快试验。

图 6 展示了按试验划分的反馈条件对右侧工具加速度和力变量的影响。在试验1中，触觉反馈仅对完成时间有显著主效应（$p = 0.047$，未绘出）。事后分析显示，F0 的完成时间有高于 F3 的趋势（$p = 0.051$）。试验1中的其他指标均未发现显著差异。在试验2中，反馈条件对右侧工具均方根加速度（$p = 0.027$）和力过零率（$p = 0.003$）有显著主效应。事后分析显示，F0 的右侧工具加速度均方根和力过零率均显著高于 F3（两者均为$p < 0.05$），且 F0 的右侧工具加速度均方根也显著高于 F1（$p = 0.013$）。试验2中未发现其他显著差异。在试验3中，与 F0 相比，F1 和 F3 均呈现出使用户在移动部件时更有信心（$p = 0.053$）、与建筑材料进行更逼真交互（$p = 0.064$）的趋势。试验3中的其他指标均未发现显著差异。

实验后问卷：在 Q6 中，84% 的参与者表示，他们能分辨有无触觉反馈，而只有 6% 的参与者提到两种触觉反馈条件感觉不同。我们将参与者对 Q7 至 Q10 的回答与其分配到的反馈条件进行了比较。这四个问题的结果如图 7 所示。77% 的参与者选择了有触觉反馈（F1 或 F3）的试验，认为其完成速度最快。令人惊讶的是，根据测得的完成时间，近半数（47%）的参与者没有将实际完成速度最快的试验选为最快的试验。没有触觉反馈的试验3，其回答与实际情况不符的人数最多。对于最容易的试验，84% 的参与者选择了有触觉反馈的试验。对于最令人疲劳的试验，只有 54% 的参与者选择了有触觉反馈的试验。对于最喜欢的试验，87% 的参与者选择了有触觉反馈的试验。他们给出的理由各不相同，例如触觉反馈有助于营造更真实的体验；有助于初学者理解装配策略；以及在视觉反馈不足时能提供帮助。还有几位参与者评论说，触觉学在日常生活中往往被视为理所当然，也未受到足够重视。

对于关于增益选择的开放式问题 Q11，50% 的参与者表示，他们选择的增益不太强也不太弱；17% 的参与者表示，他们将增益设定在舒适的水平。23% 的参与者表示，他们在实验过程中改变了偏好：起初他们偏好较强的振动，后来意识到稍弱一些的振动效果更好，便在后续试验中调低了强度。在自由评论中，10% 的参与者表示，他们觉得振动触觉反馈没有帮助，因为这会分散他们的注意力，或者他们很依赖视觉反馈。几位参与者提到，直到体验过有触觉反馈和无触觉反馈的条件后，他们才意识到触觉反馈的重要性。

增益选择：我们还使用配对 t 检验比较了参与者在两种触觉反馈条件下所选增益的差异。F1 的增益显著小于 F3（$p = 0.010$）。平均差异为 3.8 分贝（F1：3.64 ± 6.98；F3：-0.22 ± 5.94），这意味着所选单轴反馈的放大倍数是三轴反馈的 2.43 倍。我们认为，大多数参与者选择的增益使两种试验在相同物理接触下产生相近的振动幅度，Q11 的评论也支持这一点。对于 F1，所选增益与测得的手部体积呈显著正相关（$p = 0.006$）。F3 的所选增益也与手部体积呈正相关，但相关性不显著（$p = 0.175$）。

V. 讨论

总体而言，本研究结果有力地支持了我们的假设：工具振动的自然触觉反馈对装配活动的表现具有积极影响，无论是在客观评估（***H1***）还是主观评估（***H2***）中均如此。然而，单轴反馈与三轴反馈求和所得结果高度相似，因此并不支持***H3***。最后，触觉反馈幅度与增益选择之间的正相关支持***H4***。

A. 客观评估

在建筑装配活动中，强烈的接触振动和作用力会使正在建造的结构变形或受损；施工引起的变形较小的建筑寿命更长 [27]。因此，我们认为，参与者装配部件时产生的工具振动和底板作用力越小，表现越好。

我们的研究的客观分析支持***H1***。提供工具振动的自然触觉反馈，通常会减少用户在装配结构时引起的振动和力。我们观察到，参与者通过第一次试验熟悉实验装置后，在有触觉反馈时引起的振动和力都较小：具体而言，在试验 2 的 F1 和 F3 中，我们发现四项计算指标（右侧工具加速度和力的均方根与过零率）数值较低（图 6）。此外，IV-B 节中呈现的工具加速度与接触力之间的正相关关系，进一步印证了这一联系。这一结果与文献一致：提供自然振动触觉反馈时，工具加速度均方根和施加的力都会降低 [15], [28]。因此，我们可以得出结论，触觉反馈有助于减轻这些不良影响

装配。F1 和 F3 之间缺乏客观差异，因此无法支持***H3***。

有趣的是，在试验1和试验3中，我们都没有发现触觉反馈对这四项指标（加速度和力的均方根与过零率）产生显著影响。在试验1中，无论反馈条件如何，用户都倾向于更加谨慎，因为这是他们第一次接触机器人并执行任务。没有触觉反馈的参与者表示，他们不了解机器人工具的力度，有时还会损坏玩具结构。相比之下，一开始就获得触觉反馈的参与者表示，他们的体验更加真实，也更有动力完成任务。根据他们的评论，他们能够通过任务过程中振动的幅度判断机器人的力度。在试验3中，所有反馈条件下的指标值都相近。相关评论表明，参与者依赖于从先前试验中积累的经验，这暗示过去接触自然振动触觉反馈所带来的益处，在反馈被移除后仍可能持续。要探究这一想法，还需要开展更长时间的研究。

B. 主观评估

建筑施工中，工人的心理健康至关重要。危险的工作环境和繁重的工作负荷常使工人感到压力和焦虑 [29], , 这可能会提高事故率 [30], [31]。我们设想，遥操作建筑机器人所经历振动的自然反馈，能够帮助营造压力较小、因而更安全的工作环境。

问卷回答支持了***H2*** 关于此类触觉反馈主观益处的假设：大多数参与者认为，有触觉反馈时，他们与建筑材料的交互更加逼真，而且完成任务的速度更快、更轻松，也不那么疲劳。此外，大多数参与者在进行装配活动时更希望能够获得反馈；这一发现与此前关于 VerroTouch 的研究相似，在该研究中，外科医生和非外科医生都更倾向于在外科训练任务中使用触觉反馈 [16]。根据 IV-C节，最快试验（Q7）的结果有些出人意料：一组参与者认为自己在有触觉反馈时完成任务的速度最快，却没有意识到实际上他们最后一次无触觉反馈的试验才是最快的。因此，我们认为，这种触觉反馈可能会加快时间感知。另一项支持性结果是，超过三分之二的参与者认为有触觉反馈的试验更容易（Q8）。关于疲劳的结果（Q9）也表明，触觉反馈具有积极的心理效应。此外，正如 IV-B 节所述，平均心率与加速度均方根和过零率均呈正相关，这也支持了触觉反馈具有镇静作用；该结果表明，触觉反馈往往能减少工具振动，并且用户在工具振动较小的试验中心率较低。

有趣的是，我们未能从问卷中观察到 F1 和 F3 之间的差异，这表明我们的假设***H3*** 未获支持。大多数受试者只能辨别是否存在触觉反馈，无法区分这两种类型。我们认为，他们专注于任务，可能因此没有注意到反馈的细微特性。此外，对于达芬奇的细长机器人工具，三个轴之间的振幅差异相对较小，因为一个轴上的接触振动很容易传导至另外两个轴，而且接触振动通常会沿多个轴发生。因此，我们可以得出结论：对于这款机器人和这项任务，单轴反馈似乎与三轴反馈同样有效。还需要进一步研究，以确定用户是否会感知到差异。此外，我们观察到手部体积与增益选择呈正相关，这支持了我们的假设（***H4***）：手较大的人通常需要更强的振动触觉输出；然而，个体之间的差异很大，这很可能是由触觉敏感度和个人偏好的不同造成的。

VI. 结论

本文介绍了一种可靠的触觉反馈系统，该系统使用现成的音频设备，在遥操作机器人时为用户提供自然的实时振动触觉反馈。系统由两个加速度计、一个音频混音器、一个立体声音频放大器和两个音圈致动器组成。在展示如何优化传感器和致动器的布置后，我们开展了一项用户研究，以评估该系统并探究触觉反馈在遥操作机器人装配过程中的作用。30 名参与者使用达芬奇机器人，在三种随机排序的触觉反馈条件下装配一个结构：无反馈、单轴反馈和三轴反馈求和。当参与者对机器人和任务有了一定经验后，我们观察到触觉反馈产生了显著影响：具体而言，在第 2 次试验中，参与者施加的力更小，产生的工具振动也更弱，这支持***H1***。此外，在定性评价中，大多数参与者都明显偏好触觉反馈，认为它能让任务更轻松、不那么容易疲劳，这支持***H2***。有趣的是，参与者无法区分单轴反馈和三轴反馈，这与***H3***相悖。手较大的参与者通常会为触觉反馈选择更高的增益，这支持***H4***。本文关于这种触觉反馈形式的客观和主观益处的研究结果，为其未来应用于遥操作建筑机器人提供了良好指导，包括传感器和致动器的最佳布置策略。因此，未来的工作将把我们的研究结果应用于真实的建筑机器人，在大型工作空间中执行更贴近现实的任务。由于在建筑机器人的末端执行器与人类操作员之间铺设长电缆并不方便，我们计划进一步升级系统，为感测和驱动都加入无线通信。

致谢

作者感谢国际马克斯·普朗克智能系统研究生院（IMPRS-IS）对 Yijie Gong 的支持。作者还感谢 Bernard Javot 和 Joey Burns 提供技术支持，并感谢 Mayumi Mohan、RavaliGour-ishetti 和 Huanbo Sun 对本文提出建议。

参考文献

[1] G. Niemeyer、C. Preusche、S. Stramigioli 和 D. Lee，“遥操作机器人学”，载于《*Springer*机器人学手册》，第2版，B. Siciliano 和 O. Khatib 编，第1085–1108页。Springer国际出版公司，2016年。[2] K. S. Saidi、T. Bock 和 C. Georgoulas，“建筑机器人学”，载于《*Springer*机器人学手册》，B. Siciliano 和 O. Khatib 编，第1493–1520页。Springer国际出版公司，2016年。[3] N. Melenbrink、J. Werfel 和 A. Menges，“现场自主建筑机器人：迈向无人监督的建筑施工”，《自动化建筑》，第119卷，文章编号103312，2020年。[4] D. I. Sun、S. H. Kim、Y. S. Lee、S. K. Lee 和 C. S. Han，“融合惯性测量单元与两个实时动态定位GPS接收机，对推土机铲刀进行三维姿态与位置估计”，载于《国际建筑自动化与机器人学研讨会论文集（*ISARC*）》，M.-Y. Cheng、H.-M. Chen 和 K. C. Chiu 编，第991–996页。台湾台北：Tribun EU, s.r.o.，布尔诺，2017年7月。[5] H. Culbertson、S. B. Schorr 和 A. M. Okamura，“触觉学：人工触觉的现状与未来”，《控制、机器人与自主系统年度评论》，第1卷，第1期，第385–409页，2018年。[6] K. J. Kuchenbecker，“触觉学与触觉接口”，载于《机器人学百科全书》。Springer，2018年5月。[7] T. Horie、K. Tanaka、N. Abe 和 H. Taki，“基于PHANToM触觉模型和力传感器的机器人远程力控制”，载于《*IEEE*国际装配与任务规划研讨会论文集（*ISATP2001*）：《*21*世纪的装配与拆卸》（编号*01TH8560*）》，第128–135页，2001年。[8] T. Hirabayashi、J. Akizono、T. Yamamoto、H. Sakai 和 H. Yano，“面向水下应用、带触觉信息的工程机械遥操作”，《自动化建筑》，第15卷，第5期，第563–570页，2006年，第21届国际建筑自动化与机器人学研讨会。[9] X. Tang、D. Zhao、H. Yamada 和 T. Ni，“基于虚拟现实的建筑机器人遥操作控制系统中的触觉交互”，载于《国际机电一体化与自动化会议论文集》，第78–83页，2009年。[10] M. Massimino 和 T. Sheridan，“遥操作中的力反馈感觉替代”，《*IFAC*会议论文集》，第25卷，第9期，第109–114页，1992年，第5届IFAC人机系统分析、设计与评估研讨会（MMS’92），荷兰海牙，1992年6月9日至11日。[11] H. Nagano、H. Takenouchi、N. Cao、M. Konyo 和 S. Tadokoro，“用于支持建筑机器人精细遥操作的高频振动信号触觉反馈系统”，《先进机器人学》，第34卷，第11期，第730–743页，2020年。[12] J. Bell、S. Bolanowski 和 M. H. Holmes，“帕西尼小体的结构与功能：综述”，《神经生物学进展》，第42卷，第1期，第79–128页，1994年。[13] D. A. Kontarinis 和 R. D. Howe，“遥操作和虚拟环境中的振动信息触觉显示”，《临场感：遥操作与虚拟环境》，第4卷，第4期，第387–402页，1995年。[14] K. J. Kuchenbecker、J. Gewirtz、W. McMahan、D. Standish、P. Martin、J. Bohren、P. J. Mendoza 和 D. I. Lee，“VerroTouch：用于遥操作机器人手术的高频加速度反馈”，载于《触觉学：生成与感知可触知感觉》，A. M. L. Kappers、J. B. F. van Erp、W. M. Bergmann Tiest 和 F. C. T. van der Helm 编，第189–196页。柏林、海德堡：Springer柏林海德堡，2010年。[15] W. McMahan、J. Gewirtz、D. Standish、P. Martin、J. A. Kunkel、M. Lilavois、A. Wedmid、D. I. Lee 和 K. J. Kuchenbecker，“用于遥操作机器人手术的工具接触加速度反馈”，*IEEE*触觉学报，第4卷，第3期，第210–220页，2011年。[16] J. K. Koehn 和 K. J. Kuchenbecker，“外科医生和非外科医生更偏好机器人手术中的器械振动触觉反馈”，《外科内镜》，第29卷，第2970–2983页，2014年。[17] W. McMahan、E. D. Gomez、L. Chen、K. Bark、J. C. Nappo、E. I. Koch、D. I. Lee、K. Dumon、N. Williams 和 K. J. Kuchenbecker，“一种用于实时机器人手术中记录器械交互的实用系统”，《机器人手术杂志》，第7卷，第4期，第351–358页，2013年。[18] R. Chaudhari、B. C.izmeci、K. J. Kuchenbecker、S. Choi 和 E. Stein-bach，“触觉遥操作中振动触觉纹理信号的低码率源滤波模型压缩”，载于《*ACM*多媒体论文集》，第409–418页，日本奈良，2012年；由 Chaudhari 作口头报告。[19] E. Pezent、B. Cambio 和 M. K. O’Malley，“Syntacts：用于音频控制触觉的开源软件与硬件”，*IEEE*触觉学报，第14卷，第1期，第225–233页，2021年。

[20] K. Minamizawa、Y. Kakehi、M. Nakatani、S. Mihara 和 S. Tachi，“TECHTILEtoolkit：用于触觉媒体设计与教育的原型设计工具”，载于《*2012*年虚拟现实国际会议论文集》，VRIC ’12 系列。美国纽约州纽约：计算机协会，2012年。[21] A. Israr、S. Zhao、Z. Schwemler 和 A. Fritz，“用于动态触觉体验的立体触觉工具包”，载于《人机交互国际会议论文集——最新研究论文》，C. Stephanidis 编，第217–232页。Cham：Springer国际出版公司，2019年。[22] W. McMahan 和 K. J. Kuchenbecker，“用于高保真呈现触觉振动的音圈执行器动态建模与控制”，载于《*IEEE*触觉研讨会论文集》，第115–122页，美国得克萨斯州休斯敦，美国，2014年2月。[23] I. Hwang、J. Seo、M. Kim 和 S. Choi，“移动设备的振动触觉感知强度与方向、振幅和频率的函数关系”，*IEEE*触觉学报，第6卷，第3期，第352–362页，2013年。[24] N. Landin、J. M. Romano、W. McMahan 和 K. J. Kuchenbecker，“用于触觉渲染的高频加速度降维”，载于《触觉学：生成与感知可触知感觉》，A. M. L. Kappers、J. B. F. van Erp、W. M. Bergmann Tiest 和 F. C. T. van der Helm 编，第79–86页。柏林、海德堡：Springer柏林海德堡，2010年。[25] S. Hughes 和 J. Lau，“利用阿基米德原理快速、准确测量手部体积的方法”，《澳大拉西亚医学物理与工程科学》，第31卷，第56–59页，2008年4月。[26] S. G. Hart 和 L. E. Staveland，“NASA任务负荷指数（任务负荷指数）的开发：实证研究与理论研究结果”，载于《人类心理工作负荷》，心理学进展系列，P. A. Hancock 和 N. Meshkati 编，第52卷，第139–183页。北荷兰，1988年。[27] G. Atkinson，《建筑质量与质量标准：欧洲视角》。劳特利奇，2003年。[28] W. McMahan、K. Bark、J. Gewirtz、D. Standish、P. D. Martin、J. A. Kunkel、M. Lilavois、A. Wedmid、D. I. Lee 和 K. J. Kuchenbecker，“工具振动反馈可能有助于机器人外科医生在操作任务中施加较小的力”，载于《*Hamlyn*医学机器人研讨会论文集》，第37–38页，英格兰伦敦，2011年6月。[29] T. Abdelhamid 和 J. Everett，“建筑施工期间的生理需求”，《建筑工程与管理杂志》，第128卷，第5期，第427–437页，2002年。[30] R. R. Langdon 和 S. Sawang，“建筑工人福祉：哪些因素会导致抑郁、焦虑和压力？”《建筑工程与管理杂志》，第144卷，第2期，文章编号04017100，2018年。[31] M.-y. Leung、Y.-S. Chan 和 K.-W. Yuen，“压力源与压力对香港建筑工人受伤事件的影响”，《建筑工程与管理杂志》，第136卷，第10期，第1093–1103页，2010年。



Yijie Gong 于2016年在中国西北工业大学获得机电工程工学学士学位，并于2019年在中国北京航空航天大学获得机械工程工学硕士学位。目前，她是德国斯图加特马克斯·普朗克智能系统研究所触觉智能系的博士生，也是建筑领域综合计算设计与施工卓越集群（IntCDC）的成员。她的研究主要聚焦于触觉学和人机交互。



Haliza Mat Husin 于2002年在马来西亚马来亚大学获得电气工程工学学士学位，2005年在马来西亚工艺大学获得电气与电信工学硕士学位，并于2012年在德国吕贝克大学获得生物医学工程理学硕士学位。她于2020年在德国图宾根大学获得神经科学博士学位。目前，她在马克斯·普朗克智能系统研究所触觉智能系担任研究科学家

系统。她的研究兴趣包括用于遥操作的触觉接口、人机交互、人类感知，以及与触觉反馈相关的生理信号。



Ecda Erol 于2019年获得土耳其博阿齐奇大学机械工程理学学士学位，并于2022年获得瑞士苏黎世联邦理工学院机械工程理学硕士学位。2018年，他曾在马克斯·普朗克智能系统研究所触觉智能系担任暑期实习生。完成正规教育后，他在瑞士 Bota Systems AG 担任机械设计工程师，开始研发用于机器人操作的六轴力扭矩传感器。他的研究重点是机器人操作用机械系统的设计与建模，

用于机器人操作的机械系统。



Valerio Ortenzi 于2010年获得意大利罗马第一大学自动化与自动化系统工程理学学士学位。随后，他于2012年在意大利罗马第一大学攻读人工智能与机器人工程理学硕士学位，并于2017年获得英国伯明翰大学机器人学哲学博士学位。他加入了澳大利亚布里斯班昆士兰科技大学机器人视觉卓越中心，担任研究员，与杰出教授 Peter Corke 共事。2018年10月至2020年4月期间，他曾担任

英国伯明翰大学的博士后研究员。他于2020年至2021年在马克斯·普朗克智能系统研究所触觉智能系担任研究科学家。他的研究兴趣主要包括人机交互和机器人操作。他的研究新方向涉及神经科学、人类抓握心理学和机器人视觉。



Katherine J. Kuchenbecker 于2000年、2002年和2006年在美国斯坦福的斯坦福大学分别获得学士、硕士和哲学博士学位，专业均为机械工程。在约翰斯·霍普金斯大学进行博士后研究后，她在美国费城的宾夕法尼亚大学工程与应用科学学院任教9.5年，随后于2017年加入马克斯·普朗克学会。她目前担任德国斯图加特马克斯·普朗克智能系统研究所触觉智能系主任。

她是建筑综合计算设计与建造卓越集群（IntCDC）的首席研究员，也是斯图加特大学名誉教授。她的研究兴趣包括触觉接口、触觉感知系统和人机交互。她曾获2009年美国国家科学基金会职业奖、2012年IEEE机器人与自动化学会学术早期职业奖、2014年宾夕法尼亚大学林德巴克杰出教学奖，并于2022年当选IEEE会士，还获得过多个最佳论文、海报、演示和审稿人奖。她于2015年至2017年担任IEEE机器人与自动化学会触觉技术委员会联合主席，并于2016年和2018年担任IEEE触觉研讨会联合主席。