


[1, 2, 1]Jan D. A. Vuik, Daan M. Pool, Yasemin Vardar Department of Cognitive Robotics, Faculty of Mechanical Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, Department of Control and Operations, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

## **Impact of whole-body vibrations on electrovibration perception varies with target stimulus duration**

Affiliation

### **Author Note**

Daan M. Pool  <https://orcid.org/0000-0001-9535-2639>

Yasemin Vardar  <https://orcid.org/0000-0003-2156-1504>

Manuscript Type: Research Article

Word Count: 4450

Corresponding Author: Yasemin Vardar, Department of Cognitive Robotics, Delft University of Technology, Mekelweg 2, 2628 CD, Delft, The Netherlands

Funding Source: This publication is part of the project “Right Touch Right Time: Future In-vehicle Touchscreens (FITS)” with project number 20624 of the Open Technology Research Program financed by the Dutch Research Council (NWO). YV is also funded by the project (number 19153) of the NWO research program VENI.

Acknowledgments: The authors thank Ferdinand Postema for his help in designing the experimental setup.

### Abstract

**Objective:** This study explores the impact of whole-body vibrations induced by external vehicle perturbations, such as aircraft turbulence, on the perception of electrovibration displayed on touchscreens.

**Background:** Electro vibration holds promise as a technology for providing tactile feedback on future touchscreens, addressing usability challenges in vehicle cockpits. However, its performance under dynamic conditions, such as during whole-body vibrations induced by turbulence, still needs to be explored.

**Method:** We measured the absolute detection thresholds of 15 human participants for short- and long-duration electrovibration stimuli displayed on a touchscreen, both in the absence and presence of two types of turbulence motion generated by a motion simulator. Concurrently, we measured participants' applied contact force and finger scan speeds.

**Results:** Significantly higher (38 %) absolute detection thresholds were observed for short electrovibration stimuli than for long stimuli. Finger scan speeds in the direction of turbulence, applied forces, and force fluctuation rates increased during whole-body vibrations due to biodynamic feedthrough. As a result, turbulence also significantly increased the perception thresholds, but only for short-duration electrovibration stimuli.

**Conclusion:** The results reveal that whole-body vibrations can impede the perception of short-duration electrovibration stimuli, due to involuntary finger movements and increased normal force fluctuations.

**Application:** Our findings offer valuable insights for the future design of touchscreens with tactile feedback in vehicle cockpits.

*Keywords:* Tactile displays, touchscreens, haptics, psychophysics, biodynamics

### Precis

This study investigates the impact of external vehicle perturbations, like aircraft turbulence, on electrovibration perception on touchscreens. Whole-body vibrations were found to cause

perturbed finger movements and normal force fluctuations, leading to elevated thresholds for short-duration stimuli. These findings should guide the design of tactile feedback touchscreens for vehicle cockpits.

## Impact of whole-body vibrations on electrovibration perception varies with target stimulus duration

### 介绍

在当今的数字时代，触摸屏已成为不可或缺的一部分，并被集成到智能手机、平板电脑、笔记本电脑、信息亭和数字信息面板等各种电子设备中。它们的存在也激增于汽车、飞机和船舶的车辆驾驶舱，因为它们与传统的按钮和旋钮相比具有许多优势 (Ahmad\_Langdon\_Godsill\_2018; VanZon2020)。触摸屏可以毫不费力地整合大量信息，通过可重新配置的图形用户界面 (GUI) 进行更新，而无需重新连接机械控制。此外，它们通过指向手势促进直观的交互，阐明了它们在当代汽车驾驶舱中的普遍性。

然而，随着触摸屏在这些环境中的广泛使用，挑战也随之而来。一个值得注意的问题是缺乏触觉或听觉反馈。与传统的旋钮和按钮通过力或声音提供反馈 (Wang\_Wang\_Chen\_2018) 不同，触摸屏要求用户通过其他方式确认操作，例如目视检查按钮是否被按下。这种缺乏切实反馈可能会带来安全风险，特别是当用户将注意力转移到触摸屏而不是道路上时，可能会导致交通中的危险情况。

此外，在外部扰动期间使用触摸屏，例如飞机的湍流、汽车的颠簸道路或船舶的波浪，会带来困难。由于生物动力反馈 (venrooij2013bdf)，这些扰动和振动会引起用户手指和屏幕之间的相对运动，从而阻碍触摸屏的使用 (cockburn:hal-02649024; dodd2014touch; Coutts2019)。各种研究表明，环境振动会对用户在不同输入设备 (mcleod1980influence; hill2005soldier; NARAYANAMOORTHY20112263) 上的表现产生负面影响，并且这种影响延伸到车辆驾驶舱 (cockburn:hal-02649024; dodd2014touch; Coutts2019; Liu\_ergonomic\_evaluation; Khoshnewiszadeh2021680) 的触摸屏。已经探索了各种方法来应对这些挑战，包括更大的按钮、增加间距、视觉和听觉反馈以及屏幕上的其他物理功能。但是，没有一个能为这个问题提供完整的解决方案 (dodd2014touch; Coutts2019; Liu\_ergonomic\_evaluation; visual\_and\_auditory\_feedback; Lancaster\_Mers\_Rogers\_Smart\_Whitlow\_2011)。

表面触觉，特别是电振动，是一种潜在的解决方案，可以缓解外部扰动期间任务性能的下降。电振动通过手指和高压电容式触摸屏之间的感应静电力来调节感知到的摩

擦 (**teslatouch**)。它对触摸屏用户性能产生了积极影响，提高了平移手势和拖动任务期间的准确性、效率和任务完成时间 (**liupangestures; zhangharrisondragging**)。探索其在按钮或脊渲染中的应用可以提高任务性能，正如早期使用其他类型的表面触觉显示器进行的工作所证明的那样 (**corentin2022eyesoff**)。

尽管电振动技术在改善车辆驾驶舱中的触摸屏交互方面具有潜在优势，但对于如何在外部车辆扰动（例如，突然撞击、颠簸的道路、波浪和湍流）期间利用电振动技术知之甚少。到目前为止，该技术仅在用户与静态表上的设备交互的条件下开发和测试。尽管如此，众所周知，由于不良的掩蔽效应，物理扰动会直接干扰感知的触觉，例如感知强度降低或没有注意到触觉刺激 (**verrillo1985vibrotactile; ryu\_mechanical\_vibration; vardar2018masking; Jamalzadehremotemasking**)。此外，由于手指接触面积 (**ayyildiz2018contact**)、粘滑行为 (**ozdamar2020step**)、触摸屏与皮肤之间的气隙 (**vardar2021motion; shultz2018gap**) 的诱导变化，手指接触力和速度的变化会影响产生的触觉刺激。手指触摸屏界面的这种变化会显著影响生成的触觉刺激（例如，力）和用户的感受 (**vardar2021motion**)。了解这些因素如何影响电振动力和感知可以用来抵消它们，例如，通过根据扰动的（测量的）信号特性仔细调整触觉刺激。

在这里，我们研究了由于外部车辆扰动（例如湍流）引起的垂直方向的全身振动对触摸屏上显示的电振动感知的影响。为了实现这一目标，我们进行了心理物理实验，在不存在和存在全身振动的情况下，我们测试了人类参与者对短期和长期电振动刺激的检测阈值。同时，我们测量了施加的接触力和速度，认识到它们对手指接触面积和电振动感知的影响。

## 假设

我们预计持续时间较短的电振动刺激将更具挑战性，从而导致更高的感知阈值。接下来，我们预计全身振动（例如，外部车辆扰动）会对电振动的感知产生负面影响，从而导致更高的阈值。此外，我们预计垂直手指扫描速度、施加的法向力以及该力的变化率将由垂直全身振动导致的自主肢体运动而增加。

## 方法

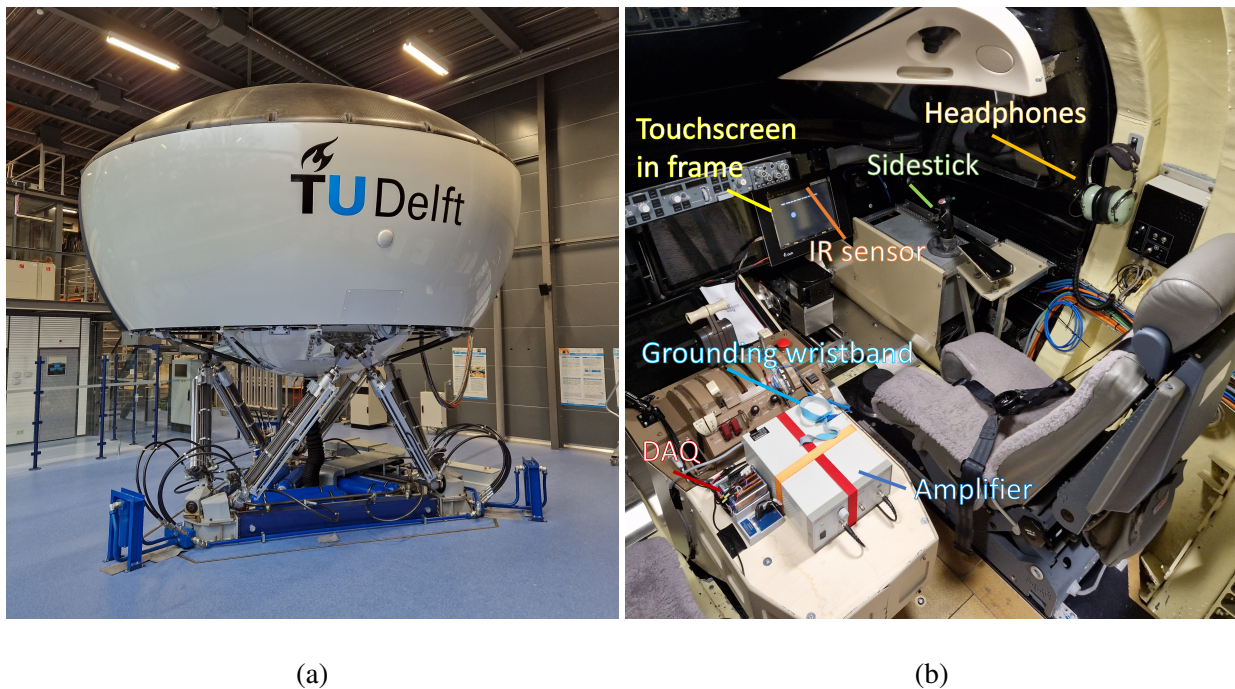
为了验证我们的假设，我们测量了人类参与者对电振动刺激的绝对检测阈值，包括存在和不存在全身振动（例如湍流）。实验程序是在赫尔辛基宣言之后进行的，并得到了代尔夫特理工大学人类研究伦理委员会的批准，案件编号为 3280。

## 参与者

心理物理实验对 14 名男性和 4 名女性参与者进行，平均年龄为 25.2 岁，标准差为 4.1 岁。所有参与者都是右撇子。在参与实验之前，他们阅读并签署了知情同意书。

## 实验装置

实验是在代尔夫特理工大学航空航天工程学院的 SIMONA 研究模拟器中进行的，见图 ??。模拟器的 6 自由度六足位移台运动系统 (**Berkouwer2005MeasuringSystem**) 用于产生模拟飞机湍流的垂直全身振动。



**Figure 1**

实验设置。(a) SIMONA 研究模拟器的外部视图，(b) 模拟器的舱室和实验设备。

在实验过程中，参与者坐在模拟器的右侧座位上，并被五点式安全带绑住，见图 ??。在参与者面前，触摸屏（SCT3250,3M Inc.）安装在一个定制的框架中，该框架覆盖了常规的主飞行显示器（ProLite TF1534MC-B1X, Iiyama Corp.）。在这种配置中，触摸屏与垂直平面成 18 度角。框架下方的原始飞行显示器显示了一个图形用户界面，以在实验过程中指导参与者。在框架内，触摸屏通过双面胶带连接到四个力传感器（FSG020WNPB, 霍尼韦尔公司）上。这些传感器测量用户手指施加在触摸屏上的法向力。数据采集板（NI-9205, NI Inc.）以 2 kHz 的采样率采集力传感器数据。安装在触摸屏顶部边缘的红外位置传感器（NNAMC2300PCEV, Neonode Inc.）测量参与者的手指位置和速度。框架封装了触摸屏的边缘、传感器和接线，以便在模拟器移动时将设置保持在适当的位置，并作为参与者的安全措施。在实验过程中，参与者可以将座椅移动到前面，以便在与触摸屏交互时感到舒适。

电振动刺激是通过向触摸屏施加电压信号产生的。这些信号通过另一张数据采集卡（NI-9264, NI Inc.）生成，然后由高压放大器（HVA200, Thorlabs Inc.）增强。红外位置传感器和数据采集卡通过 USB 电缆延长器连接到模拟器控制室外的计算机。参与者在非惯用手腕上佩戴防静电腕带进行接地，并佩戴降噪航空耳机（H10-66XL, David Clark Inc.），他们可以在控制室进行交流并听取实验者的指令。在实验过程中，参与者聆听飞机发动机的噪音，以掩盖来自模拟器运动系统的任何听觉线索。参与者通过侧杆输入他们的回答，见图 ??；他们使用红色和绿色的侧面按钮来选择刺激间隔，并使用前面的触发按钮来启动试验的开始。这个侧杆位于座位的右侧，这意味着所有参与者都必须用同一只手按下按钮并触摸屏幕。在按下按钮和开始试用之间实现了一秒钟的延迟，以避免丢失触摸数据。

## 刺激

### 目标刺激（电振动）

目标刺激是通过施加 100 Hz 的正弦电压信号而产生的振荡静电力（即电振动），而触摸屏的导电层没有直流偏移。正如之前关于电振动感知的研究表明（vardar2017waveform; vardar2018masking; vardar2021motion），该输入电压以两倍于输入信号的频率（即 200 Hz）产生电振动刺激。我们之所以选择这个频率，是因为它处于

电振动最能感知的频率范围内 (**vardar2016perception**)。在整个实验过程中，刺激幅度各不相同，请参阅“程序”部分。电振动刺激的持续时间为 0.2 秒或 0.5 秒，在持续 4 秒的试验中，通过指尖在触摸屏上左右来回抚摸，可以感知两次。0.2 秒的持续时间代表触摸屏上 10 mm 的脊（例如，边缘或小按钮），而较长的刺激模拟 25 mm 的贴片（例如，小滑块）。两种刺激的显示方式是，它们的空间中心与触摸屏的中心对齐；参见补充材料中的图 S1，了解具有 0.5 秒刺激的试验的示意图。

### 掩蔽刺激（全身运动）

掩蔽刺激由 SIMONA 研究模拟器的运动系统产生的机械振动组成，在与机舱内的触摸屏互动时影响参与者的整个身体。我们选择了模拟飞行器垂直湍流加速度的振动作为掩蔽刺激。我们测试了两种不同类型的湍流信号，这里称为多正弦和高斯，它们之前是由 **Khoshnewiszadeh2021680**; **Leto\_2023** 设计和测试的，频率分量高达 10 Hz；有关其设计的详细信息，请参阅补充材料。

(**Leto\_2023**) 中使用的原始高斯湍流和多正弦湍流信号的持续时间为 90 秒。对于当前的实验，为我们的刺激间隔提取了两个信号的 10 个不同的 6 秒片段（1 秒淡入、4 秒曝光、1 秒淡出，见图 S1。使用 10 种不同的掩蔽刺激来确保获得电振动感知阈值的可推广结果。

### 程序

在实验之前，每个参与者用水和肥皂洗手，并在自然室温下晾干。然后，他们阅读并签署了知情同意书。之后，每位参与者都观看了 SIMONA 研究模拟器的安全视频，并向他们介绍了实验程序并警告了晕动病。然后，每个参与者都坐在模拟器中，并安排座位以舒适地与触摸屏进行交互。每次会议前，触摸屏也用酒精清洁。当参与者按下侧杆上的触发按钮时，每个实验会话都开始了。

这些实验旨在确定参与者在存在和不存在掩蔽刺激（全身振动）的情况下对目标（电振动）刺激的绝对检测阈值。实验采用双备选强制选择（2AFC）方法 (**fechner1860AFC**)。刺激以两个时间间隔显示，见图 S1，使用 Python 设计的图形用户



界面 (GUI) 向参与者发出红色和绿色信号。每个间隔持续 4 秒。这些间隔中只有一个包含目标刺激, 而掩蔽刺激存在于两个间隔中。每个试验和受试者的目标刺激位置是随机的。

每个参与者被指示将惯用手的食指放在用虚拟光标指示的屏幕上, 并沿切向方向移动, 同时将他们的手指运动与光标的运动同步, 光标的运动速度为 50 mm/s。这种手指速度导致了 100 mm 宽的勘探区域。在一个间隔内, 他们向右移动了两秒的行程, 向左移动了两秒的行程。红色间歇结束后, 绿色间歇在两秒间隔后开始, 参与者重复相同的过程。

在经历了两个间隔之后, 参与者的任务是指示目标刺激是在红色还是绿色间隔中, 他们有无限的时间。他们通过按下侧杆上的红色或绿色按钮来注册他们的选择。当他们准备好进行后续试验时, 他们按下了侧杆的触发按钮。

通过三上一下自适应阶梯法修改目标刺激的幅值 (**levitt1971adaptive**)。每个会话都以 50 V 的 (峰值) 输入电压产生的激励开始。该振幅是根据初步实验和参与者培训课程选择的, 以确保所有参与者都能清楚地感受到初始刺激。如果参与者给出三个正确答案 (不一定是连续的), 则电压幅值降低 5 dB。如果参与者给出一个错误答案, 振幅增加 5 dB。从强度增加到降低, 反之亦然的变化称为反转。一次反转后, 步长改为 1 dB。会话在  $\pm 1$  dB 电平的五次反转后结束, 最后五次反转电压电平的平均值作为绝对阈值。用于电振动研究的 dB 单位被描述为  $20\log_{10}(V_p)$   $V_p$  是触摸屏的峰值电压。施加电压的最大峰值幅度设定为 50 V。对于所有参与者, 整个楼梯在大约 30–50 次试验中完成。

每个参与者在六个会话中完成了实验: 2 个测试信号持续时间 (0.2 秒和 0.5 秒)  $\times$  3 个全身振动情况 (无运动、多正弦和高斯运动)。这些会议在参与者之间以六个不同的顺序进行, 以平衡顺序效应。在实验的一次试验中, 两个间隔都使用了完全相同的湍流刺激, 见图 S1, 以便在两个间隔之间进行无偏的比较。对于不同的试验, 使用了不同的湍流信号。

每个试验的湍流信号是从十个可用的 6 秒刺激中随机选择的。

从收集的数据中, 提取了实测的绝对阈值电压、平均手指速度、平均施加力和施加力的平均变化率; 有关信号处理的详细信息, 请参阅补充材料。对于统计分析, 我们首先使用 Shapiro-Wilk 检验检查提取数据的正态性。由于一个或多个样本并非在所有数据类型中都呈正态分布, 因此我们使用非参数弗里德曼方差分析来检验主效应。然后, 我们应用 Bonferroni 校正的 Wilcoxon 符号秩检验进行事后成对比较。本文的所有数据都以箱形图表

示, 0.2 秒和 0.5 秒电振动刺激的结果分别以绿色和黄色显示。中间的红线表示中位数, 而框限制则表示第 25 个和第 75 个百分位数。晶须延伸到四分位距的 1.5 倍。异常值用红色加号 (+) 表示, 而黄色菱形 ( $\diamond$ ) 表示样本均值。圆圈代表 ( $\circ$ ) 每个参与者的个人测量值。带指示星号的大括号表示具有统计学意义的差异 ( $p < 0.05$  的 \* 和  $p < 0.001$  的 \*\*)。

## 结果

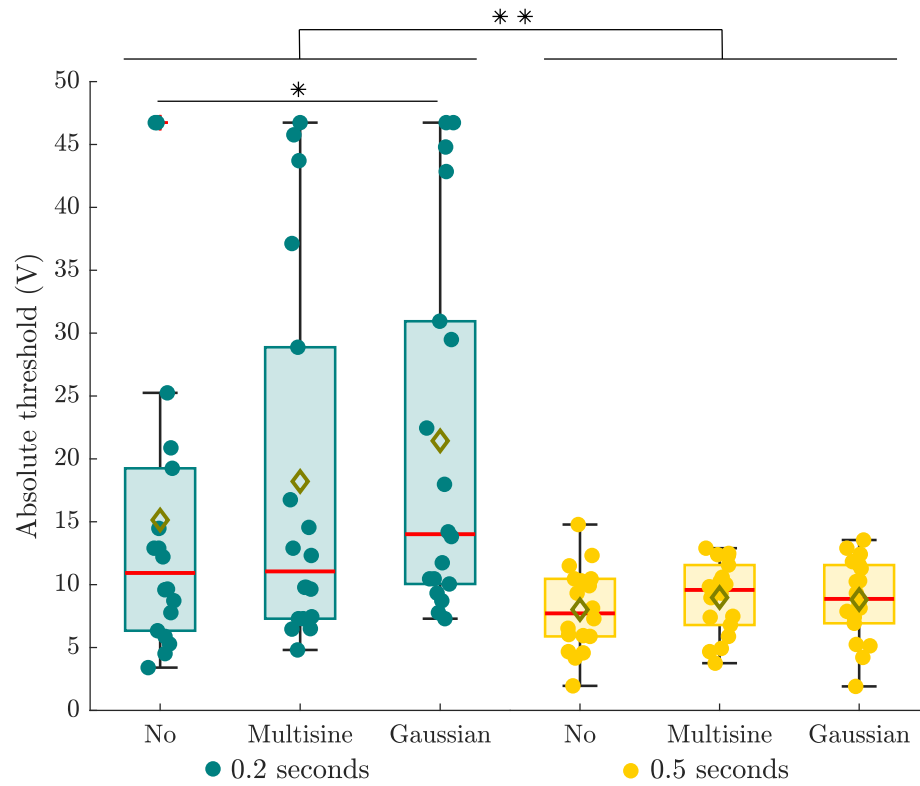
参与者的测量绝对阈值电压如图 ?? 所示。如图所示, 没有湍流的 0.2 秒电振动刺激的分布有两个异常值, 这意味着两个参与者 (P6 和 P8) 在没有湍流的情况下已经有非常高的阈值 ( $>45$  V)。在这两种湍流情况下, 测量了更多这些非常高的阈值, 表明这些参与者无法可靠地感受到刺激。总体而言, 在所有测试用例中, 绝对阈值的绝对阈值存在统计学上的显著差异  $\chi^2(5) = 35.8$ ,  $p < 0.001$ , 并且电振动持续时间的影响非常显著 ( $\chi^2(1) = 25.8$ ,  $p < 0.001$ )。平均而言, 在所有湍流条件下, 0.2 秒刺激的中位数阈值高出 38 %, 见图 ??。虽然对 0.5 秒刺激没有发现全身振动的显著影响 ( $\chi^2(2) = 4.25$ ,  $p > 0.05$ ), 但对于 0.2 秒刺激 ( $\chi^2(2) = 7.74$ ,  $p < 0.05$ ), 多正弦和高斯湍流的阈值增加是显著的。成对比较还显示无振动和高斯振动条件之间存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

图 ?? 显示了一名参与者在不存在和存在全身振动的情况下进行手指位置测量的示例 (34 项汇总试验) (比较图 ?? a 和图 ?? b)。图形轴与触摸屏的几何形状和纵横比相匹配, 显示参与者试图遵循光标移动的屏幕中心的一条线。全身振动的生物动力反馈效应是可见的, 在没有湍流期间, 水平手指轨迹几乎是笔直的, 而在多正弦振动期间, 则有大的不需要的垂直运动。

不同实验条件下测得的垂直方向的平均指速如图 ?? 所示。总体而言, 在所有测试条件下, 垂直手指速度都存在非常显著的变化 ( $\chi^2(5) = 57.5$ ,  $p < 0.001$ )。我们发现, 湍流显著增加了两种刺激持续时间的垂直手指速度 (0.2 s:  $\chi^2(2) = 28.8$ ,  $p < 0.001$ , 0.5 s:  $\chi^2(2) = 21.8$ ,  $p < 0.001$ ), 而目标刺激持续时间没有影响 ( $\chi^2(1) = 3.63$ ,  $p > 0.05$ )。

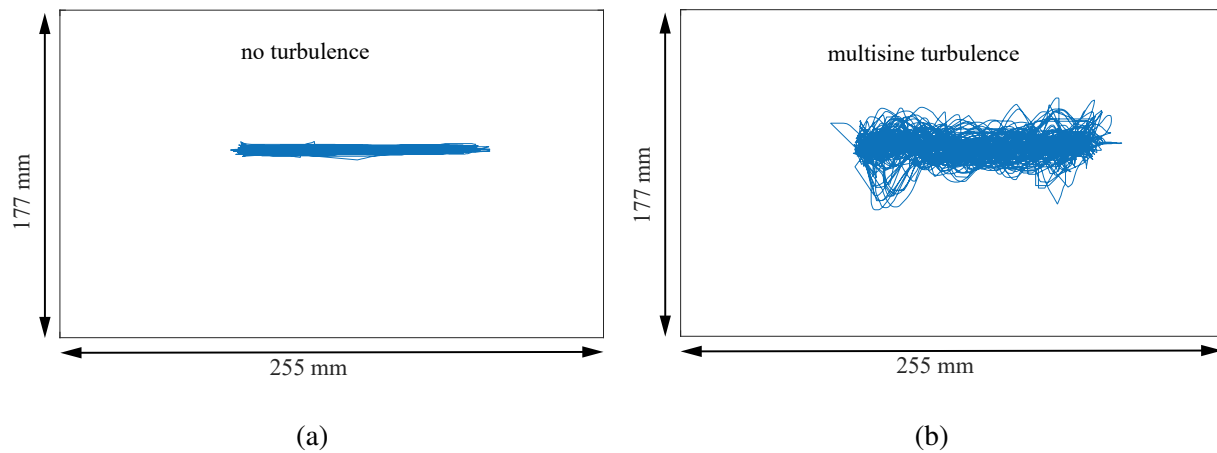
成对比较表明, 在两种刺激持续时间 ( $p < 0.01$ ) 下, 无振动和两种振动条件之间存在显著差异, 而对于 0.2 秒刺激, 两种不同的振动条件 ( $p < 0.05$ ) 也存在显著差异。

图 ?? 表明, 随着高斯振动, 平均垂直手指速度确实始终保持在 25 % 左右, 这可以通过与



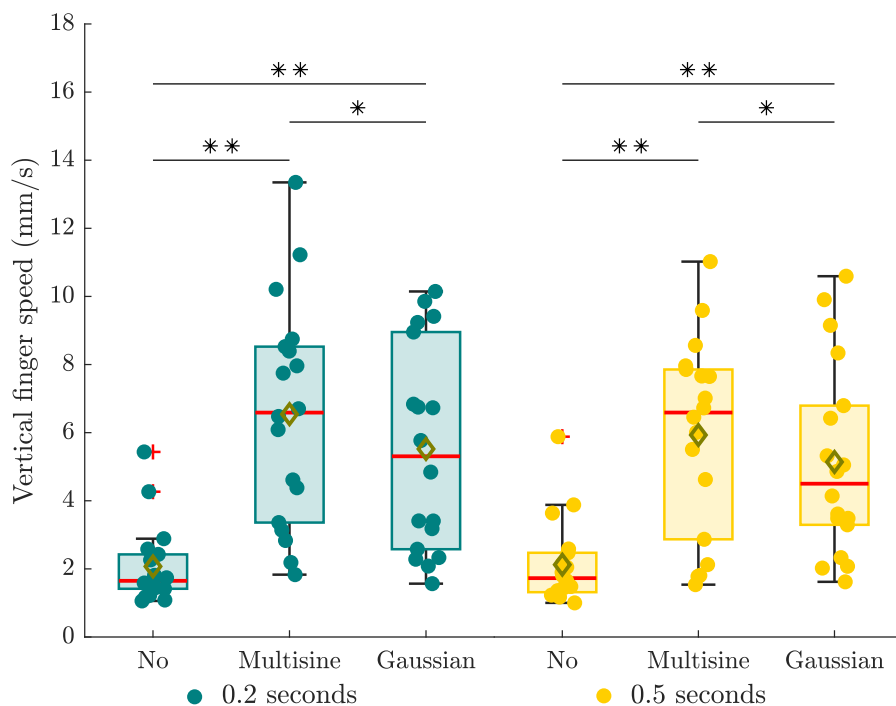
**Figure 2**

所有测试实验条件的绝对阈值电压。



**Figure 3**

在 (a) 无湍流 (47 项试验) 和 (b) 多正弦湍流 (37 项试验) 期间, 在 0.5 秒电振动刺激的两次完整实验中测量参与者的手指位置。



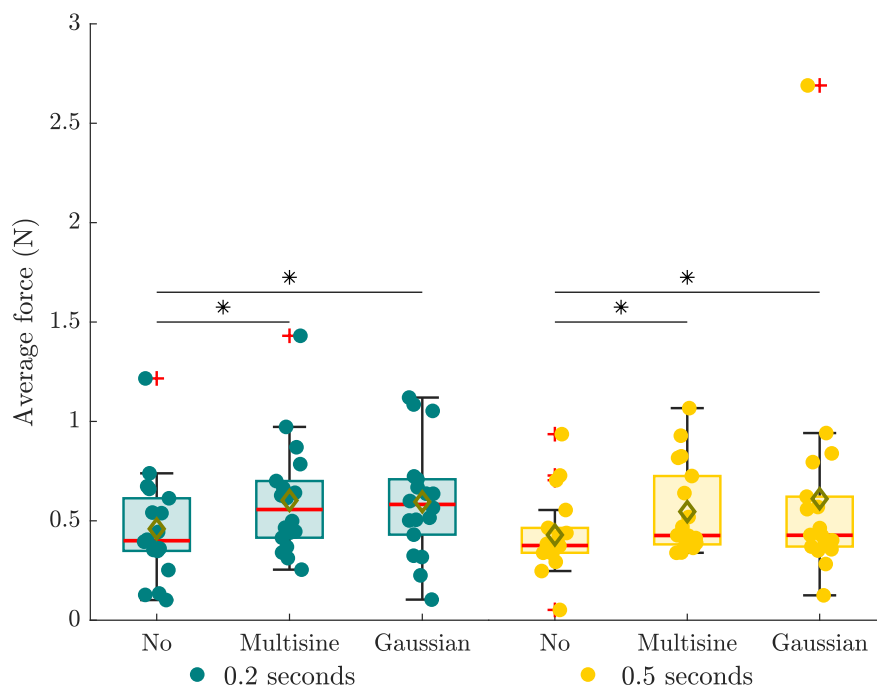
**Figure 4**

在所有测试的实验条件下，参与者在垂直方向上的平均手指速度。

多正弦湍流相比降低高频功率来解释（参见补充材料）。我们还分析了平均水平手指速度，但发现振动类型或电振动刺激持续时间均无显著影响。

图 ?? 显示了实验过程中施加在触摸屏上的平均法向力。总体弗里德曼方差分析在所有测试条件下均显示出显著影响 ( $\chi^2(5) = 13.8$ ,  $p < 0.05$ )。此外，我们发现振动对 0.2 秒 ( $\chi^2(2) = 8.44$ ,  $p < 0.05$ ) 和 0.5 秒 ( $\chi^2(2) = 14.3$ ,  $p < 0.001$ ) 目标刺激的平均力有显著影响，但刺激持续时间 ( $\chi^2(1) = 0.67$ ,  $p > 0.05$ ) 没有主要影响。当考虑成对比较时，发现只有无振动条件与两种刺激持续时间的两种振动条件有显著差异 ( $p < 0.05$ )，因为 0.2 和 0.5 秒刺激持续时间的平均法向力分别增加 0.17 N 和 0.05 N。总体而言，这表明多正弦或高斯湍流的存在导致对屏幕施加的力升高，对于较短的 0.2 秒刺激，这种效果更强，见图 ??。

计算出的不同实验条件下施加力的变化率如图 ?? 所示。由于 0.2 秒刺激 ( $\chi^2(2) = 24.3$ ,  $p < 0.001$ ) 和 0.5 秒刺激 ( $\chi^2(2) = 27.1$ ,  $p < 0.001$ )，在所有实验条件下，平均力变化在所有实验条件下 ( $\chi^2(5) = 63.6$ ,  $p < 0.001$ ) 都显著变化。成对比较表明，在两



**Figure 5**

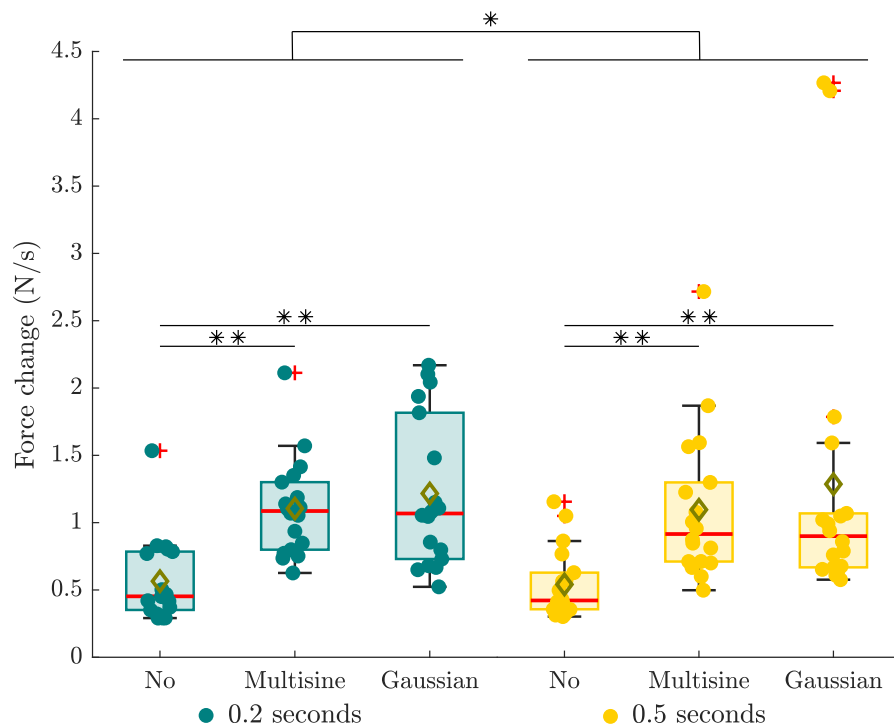
参与者在测试实验条件下的平均施加力。

种刺激持续时间下，多正弦湍流和高斯湍流情况下平均力变化的增加没有显著差异 ( $p > 0.05$ )。还发现刺激持续时间的影响较弱 ( $\chi^2(1) = 6.00$ ,  $p < 0.05$ )，因为具有全身振动的 0.5 秒刺激的中值低 0.17 N/s。然而，成对比较显示，对于单个湍流条件，没有统计学上的显著差异。

## 讨论与结论

本研究调查了全身振动（如飞机湍流）对触摸屏上显示的电振动感知的影响。为了这个目标，我们测量了 18 名人类参与者对不同持续时间的电振动刺激的绝对检测阈值，包括不存在和存在两种类型的全身振动。同时，我们在实验期间测量了参与者施加的法向力和手指速度。我们假设持续时间较短的电振动刺激的检测阈值将超过持续时间较长的检测阈值。此外，我们预计检测阈值、垂直方向的手指速度、施加的法向力以及引入全身振动时该力的变化率会增加。

第一个假设预测较短的电振动刺激持续时间的绝对阈值增加，与较长的电振动持续



**Figure 6**

参与者在不同实验条件下平均施加力的平均变化率。

时间相比，在较短的电振动持续时间下观察到的阈值明显更高（见图 ??，绿色和黄色框图）。这一结果可以归因于时间总和，即感觉系统随时间推移的能量整合；这里是 Pacinians，相应的机械感受器用于在阈值水平 (vardar2017waveform) 感知 200 Hz 电振动刺激。先前对 200 Hz 振动触觉刺激进行的研究也表现出类似的行为，其中知觉阈值随着刺激持续时间 (geschieder1982temporal; checkosky1994duration) 的函数而降低。

与第二个假设相反，由于湍流导致绝对阈值增加，我们只发现 0.2 秒电振动刺激的湍流测量阈值显著升高（见图 ??）。这一结果表明没有感知掩蔽，这可能是由于湍流和电振动刺激之间的相当大的频率差异所解释的。过去对振动触觉刺激的研究表明，当测试刺激和掩蔽刺激具有相似或接近的频率时，知觉掩蔽最为明显 (hamer1983masking)。当在相同或遥远的地点施加刺激时，观察到类似的发现 (verrillo1982site)。以往的研究 (ryu\_mechanical\_vibration; jamalzadeh2019remote) 证实了机械振动对电振动感知的影响，特别是当两种刺激具有相似的频率时 (ryu\_mechanical\_vibration)。这些结果证实，

掩蔽效应随着频率差异的增加而减弱。

对于较短的电振动刺激，湍流阈值显著升高可归因于湍流期间的显着力变化（见下一段）以及更不稳定的手指运动，分别见图 ?? 和图 ??。在湍流期间，参与者可能经常错过短短的 0.2 秒刺激，例如，在同时发生法向力或手指速度变化的情况下。相比之下，尽管触摸交互突然变化，但更长的刺激持续时间使参与者有更大的机会感知电振动。湍流期间 0.2 秒刺激的极高阈值 ( $\geq 40$  V) 的增加为这种解释提供了证据。考虑到最大允许电压幅度为 50 V，这些参与者在湍流期间根本感觉不到一致的触觉刺激。此外，几位参与者评论说，在湍流期间，他们的手指在屏幕上“跳跃”，支持这一观点。不幸的是，由于噪声水平高，这些“跳跃”无法可靠地从红外或力传感器信号中提取出来。未来的研究可以采用电阻抗测量来检测这种失去接触的情况 (forte2024selftouch; vardar2021motion)。

我们的假设证实了在湍流期间垂直手指扫描速度（即湍流运动方向上的手指速度）会显著增加（见图 ??）。平均手指速度从 2 mm/s 左右增加到 6 mm/s 左右，这是由于施加垂直全身振动导致的额外不自主手指运动引起的，这与早期关于触摸屏生物动力馈通 (mobertz2018bdf; Khoshnewiszadeh2021680) 的实验一致。此外，我们观察到高斯湍流的平均垂直手指速度比多正弦湍流低 25 %。这种差异可以通过湍流信号的频率相关功率分布来解释；对于掩蔽刺激中较高频率的多正弦信号，多正弦信号会引起相对更强的振动，从而导致更高的垂直手指速度。

最后，湍流会显著增加施加的法向力及其变化率的假设也得到了我们的数据的支持，参见图 ?? 和 ??。湍流期间施加的法向力升高可能是由于对生物动力馈通的刻意补偿造成的，导致参与者在触摸屏上施加更多的（稳态）力，以防止湍流引起的不自主滑动运动 (venrooij2013bdf; Khoshnewiszadeh2021680)。在湍流存在的情况下，法向力的导数加倍可以解释为加速馈通的直接结果。相当于参与者手臂和手部的不自主运动如何在屏幕上的手指运动中引起额外的扰动分量 (mobertz2018bdf; Khoshnewiszadeh2021680)，它们也增加了与法向力变化率类似的分量。

有趣的是，尽管在湍流期间手指接触动力学发生了显著变化（例如，接触力和手指速度的变化），但长时间电振动刺激的感知阈值没有实质性变化。尽管如此，过去的研究表明，手指速度和施加的法向力的变化会影响手指接触面积、触摸屏之间的间隙以及指尖

的粘滑行为，直接影响产生的静电力及其感知 (**vardar2021motion; vardar2017waveform**)。已知其中一些条件会相互产生不利影响，例如施加的力增加导致接触面积增加 (**ayyildiz2018contact**)，但粘滑行为增加和气隙减小；因此，总体效果可能掩盖了这种潜在的变化。需要更详细地研究这些因素在湍流期间如何动态变化，同时考虑到已知这些关于手指接触动力学的物理因素在人之间差异很大 (**serhat2022contact; nam2020stickiness**)。最后，在我们的实验中，电振动刺激以基于时间的方式呈现；因此，无论实际的手指移动如何，它都可以在屏幕上的任何位置被感知。为了更逼真地呈现仅在图形界面上的固定位置的电振动，湍流运动的影响可能更严重。这是下一个需要在未来工作中检验的关键假设。

我们的研究结果为未来车辆驾驶舱触摸屏交互设计提供了宝贵的见解。电振动渲染的虚拟按钮或滑块应始终足够大，以产生大于 1 cm (0.2 s) 的刺激，以最大限度地减少对湍流的敏感性。此外，在触觉渲染中，可能需要主动抵消由湍流引起的手指速度和法向力波动，以避免电振动强度的意外变化。

### 要点

- Absolute electrovibration detection thresholds are 38 % higher for short (0.2-second) electrovibration stimuli compared to longer stimulus durations (0.5 seconds).
- Low-frequency whole-body vibrations such as turbulence impair the perception of short (0.2-second) electrovibration stimuli, but not longer ones (0.5 seconds).
- Perceptual masking does not occur for electrovibration stimuli in the presence of low-frequency whole-body vibrations.
- Involuntary arm movements due to biodynamic feedthrough of whole-body vibrations increase the finger scan speed, the average applied force, and the rate of force change.

### 列传

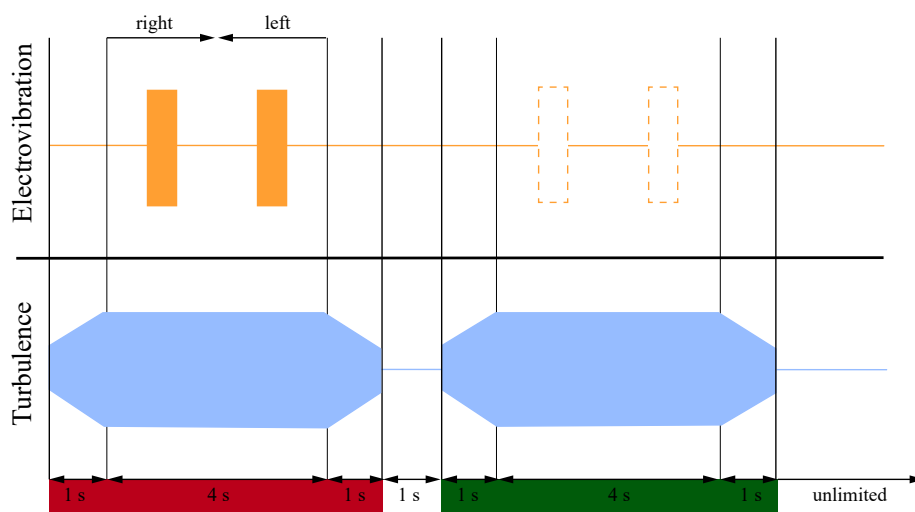
Jan D. A. Vuik 于 2023 年在代尔夫特理工大学（荷兰）完成了机器人学 M.Sc 学位。他目前是 Lely Technologies 的初级数据科学家。



Daan M. Pool 是代尔夫特理工大学航空航天工程学院控制与操作系的助理教授。他于 2012 年在同一所大学获得航空航天工程博士学位。

Yasemin Vardar 是代尔夫特理工大学机械工程学院认知机器人系的助理教授。她于 2018 年在土耳其高  $\zeta$  大学获得机械工程博士学位。

### 补充材料



**Figure S1**

绝对阈值实验的刺激时序图示例。目标（电振动）刺激由施加到触摸屏的（100 Hz）输入电压信号的突发产生。在蒙面刺激的阈值实验中，蒙面（湍流）刺激是全身振动，淡入和淡出一秒钟。目标刺激和掩蔽刺激都以两个时间间隔显示，以红色和绿色向参与者发出信号。电振动刺激以红色或绿色间隔随机显示。在没有电振动刺激的间隔中，参与者探索了光滑的玻璃表面。在每个间歇中，参与者以 50 mm/s 的扫描速度分两笔探索触摸屏；每个持续 2 秒。参与者在绿色间隔结束后给出了他们的回答。

### 掩蔽刺激的设计

两种湍流信号均设计为  $0.75 \text{ m/s}^2$  的 RMS 垂直加速度，代表重湍流 (Leto\_2023; Coutts2019)。

多正弦湍流信号与之前实验中使用的信号相同 (mobertz2018bdf; Khoshnewiszadeh2021680) 定义为 10 个正弦曲线的总和:

$$\sum_{k=1}^{10} A_k \sin(\omega_k t + \phi_k), \quad (1)$$

其中  $A_k$ 、 $\omega_k$  和  $\phi_k$  表示每个正弦曲线的幅度、频率和相位偏移。 $\omega_k$  频率范围为 0.06 Hz (0.383 rad/s) 至 2.76 Hz (17.33 rad/s)。对于多正弦振动, 垂直加速度 RMS 的 50 % 和 100 % 分别由低于 1.67 Hz 和 2.76 Hz 的分量引起; 即, 比我们目标刺激的 100 Hz 低得多的频率。

高斯湍流表示模拟的垂直加速度 Cessna Citation 500 公务机 (VanDerLinden1996) 在静止湍流中飞行, 使用 Dryden 光谱 (VandeMoedijk1978; Leto\_2023) 建模。对于高斯湍流, 50 % 的垂直加速度 RMS 是由于低于 0.52 Hz 的分量, 即与多正弦湍流相比, 低频功率更高。此外, 96.4 % 的信号功率在低于 2.76 Hz (多正弦湍流的最大正弦频率) 的频率下。为了保护运动平台的硬件免受不需要的低振幅高频振动的影响, 高斯湍流信号采用截止频率为 10 Hz 的二阶低通滤波器进行滤波。

## 数据分析

我们将从实验中获得的数据存储在每个楼梯的一个文件中, 并使用 Matlab 程序进行分析。力和手指位置数据由每个楼梯的时间序列组成, 并存在部分断裂。我们从这些时间序列中提取试验数据, 仅获取每个间隔开始和结束的数据。省略了试验间隔或间隔间隔之间的中断的任何数据。力数据以 2000 Hz 记录, 这是传感器可实现的最大数据速率。手指位置数据以 100 Hz 记录, 这是红外传感器记录的锁定频率。校准力传感器后, 我们使用来自每个传感器的力和手指位置计算施加的平均法向力, 以得出加权平均值。零相位数字二阶低通巴特沃斯滤波器对力数据进行滤波, 以降低高频测量噪声的影响, 特别是对于力变化信号 (力测量的时间导数)。将手指位置数据从像素转换为毫米, 然后过滤掉屏幕外的数据点。然后, 对 x 位置和 y 位置时间序列进行微分, 得到两个方向的手指速度。在此数据中, 过滤掉高于 1000 mm/s 的值, 这些值对应于与屏幕失去联系的情况。