真实环境中的振动触觉感受：智能手机振动的感知转换

Keiko Yamaguchi*、Satoshi Takahashi†，电气电子工程师学会会员
*名古屋大学经济学系
keiko.yamaguchi@soec.nagoya-u.ac.jp
†关东学院大学理工学院 satotaka@kanto-gakuin.ac.jp

arXiv:2303.01308v1 [cs.HC] 2 Mar 2023

摘要—智能手机发出的振动已成为我们日常生活的一部分。振动可以为人们从屏幕上获取的信息增添各种含义。因此，要评估通过智能手机实现更丰富的振动触觉通信的可能性，了解普通设备中振动的感知转换十分重要。本研究评估了在真实环境中通过智能手机再现振动触觉感受的可重复性。为了实现更完善的触觉设计，从而顺畅地与智能手机用户进行交流，我们还关注了真实环境对振动触觉感受的调节效应，包括移动设备的物理规格、用户进行设备操作的方式，以及用户关于触摸欲望的个人特质。我们开展了基于网络的真实环境实验，而非实验室实验，以尽可能再现贴近日常生活的用户环境。通过一系列分析，我们发现，在振动刺激条件相同的情况下，用户对振动刺激重量的感觉强度评价高于对其强度的评价。我们还表明，为实现更优的触觉系统设计并最大限度地发挥振动触觉刺激的影响，有必要考虑真实环境的调节效应。

索引词——移动设备、振动触觉知觉、触觉评估、感知转换、真实环境研究。

I. 引言

振动触觉刺激所产生的感觉长期以来一直受到研究 [1]，，大量研究已阐明如何利用不同的振动执行器设计出各种感觉 [2],[3]。近年来，多模态情境下的振动触觉感知引起了研究者的关注 [4],[5]。

如今，智能手机已成为我们生活中的必需品，也是最常见的振动执行器之一。智能手机发出的振动可以赋予用户从屏幕上获取的信息各种含义 [5]。随着智能手机的广泛使用，振动刺激已成为我们日常生活的一部分 [6]；智能手机的使用环境与以往研究所假设的环境截然不同。因此，为了在日常使用中更好地传递信息，了解人们如何感知智能手机发出的振动触觉刺激十分重要。

本研究聚焦于现实生活约束下由智能手机产生的振动触觉感受。我们通过真实环境

本研究获得日本学术振兴会科研费青年研究者科研费（科研费）资助，项目编号为20K13615。

实验评估了振动触觉感受的可重复性。我们使用普通设备研究振动的感知转换，以评估在智能手机上实现更丰富的振动触觉通信的可能性。我们还考察了真实环境对振动触觉感受的调节效应，以实现更好的触觉设计，让智能手机用户能够顺畅沟通。

II. 相关研究与研究动机

振动是一种能够引发多种触觉感知的刺激。先前的研究阐明了粗糙度和光滑度等振动触觉感知，这些感知可通过振动频率加以区分 [7],[8], 在触摸屏上再现的材料虚拟纹理 [9], 以及需要考虑振动执行器材料的柔软度 [10]。其中大多数研究都专注于设计实验环境下用于引发特定感知的装置和振动模式 [6]。很少有研究阐明，在真实环境条件下，人类如何感知具有特定物理属性的执行器所产生的振动刺激。

来自智能手机的振动刺激主要用于传达非物质信息，例如来电通知和任务完成提示。为此，刺激的强度在传达重要及紧急信息、降低用户主观工作负荷方面发挥着关键作用 [11],[12],[13]。目前，人们在智能手机上拥有数字资产，例如数字钱包。由于数字资产没有实体，因此很难感知其存在。重量是感知实体的重要因素。研究人员利用振动触觉反馈在触摸屏和虚拟空间中进行物体识别 [14],[15]。可以合理地假设，感知到的数字资产重量能够增强人们对其实体性的感知；鉴于其商业影响，这一假设颇具吸引力 [3]。一些研究将智能手机振动感知映射至用户的心理状态 [16],[13], ，但很少有研究直接将其映射至触觉感知。因此，本研究聚焦于人们对来自智能手机的振动触觉刺激的感知强度和重量。

本研究选择 iPhone 作为实验设备，因为它是当今最受欢迎的振动执行器之一，而且 iPhone 8 及后续型号均采用同一款触觉引擎，即 Core Haptics [17]，[18] 。我们开展了基于 Web 的真实场景实验，而非实验室实验。

在我们的实验中，参与者在尽可能贴近日常生活的环境中完成任务。

III. 研究问题

本研究的主要研究问题是：人们如何感知并将智能手机的振动呈现为振动触觉刺激，以及如何评估振动触觉感受的大小：强度和重量。振动触觉刺激的强度是一种直观的感觉，普通智能手机用户能够对其进行评估。与此同时，振动重量是一种比强度更复杂的感知：它可能是用户头脑中发生的一种感知转换。因此，我们提出了以下研究问题：

RQ1：人们对智能手机上相同振动触觉刺激所产生的不同质性感觉的评估，是相似还是不同?

在日常环境中，外部和内部因素会影响人们对振动触觉刺激的感知：设备的物理规格、设备的使用方式以及用户的个人特质。以往研究表明，设备的物理规格会影响振动触觉刺激的特性 [19]。iPhone 的外形简单、呈常见的矩形，不同于以往研究中开发的原始设备；然而，各模型的大小和重量各不相同。

此外，设备的操作方式会影响振动触觉感知 [19]，尤其是握持 iPhone 的方式。我们关注人们通常用哪只手握持 iPhone，以及是否使用优势手。神经科学[20], [21]领域已有研究探讨大脑对与手优势相关的振动触觉刺激如何作出反应；不过，我们关注的是人们如何感知这些刺激，并将其评估为可解读的感觉，以便将相关启示应用于振动触觉刺激的设计。

最后，在考察智能手机用户如何感知智能手机振动时，还需要考虑用户的个人特质，例如他们在获取信息时的触摸欲望。“触觉需求”（NFT）量表 [22]反映了个体对触觉（触摸）信息偏好的差异。NFT 分数较高的人往往希望通过触摸物体来获取关于物体的精确信息，或享受物体带来的触觉感知。我们假设，与触摸相关的个人特质可能会影响用户对振动触觉刺激的感知。

总体而言，我们探讨了以下研究问题：

研究问题2：移动设备的物理规格、操作设备的方式，以及用户对触摸的欲望等因素会导致振动触觉感知出现何种差异?

IV. 实验

本实验旨在测量参与者对振动刺激的感知反应，并确定各种因素对其感知的影响。我们采用幅度估计法[23] ，测量参与者对 iPhone 产生的振动刺激的判断。为了评估和比较参与者如何

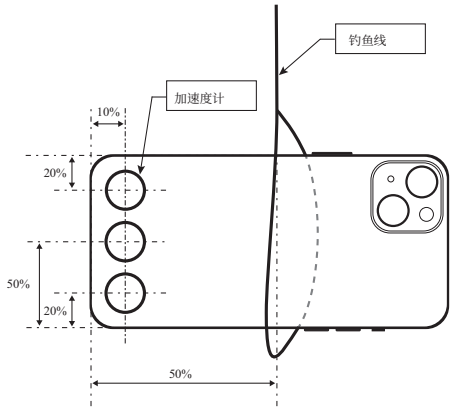

图1. 测量 iPhone 振动加速度的实验环境。

在不同感觉的情境下感知来自 iPhone 的振动触觉刺激，我们通过普通最小二乘法估计了 [24] 每种感觉对应的史蒂文斯幂律方程。史蒂文斯幂定律表示如下：

$$\psi = k\phi^{\alpha} \tag{1}$$

其中， ψ 是振动触觉刺激引发的感知强度， ϕ 是 iPhone 振动的振幅， k 和 α 是待估计的参数。

A. 实验装置

我们使用了 iPhone 8 或更高版本的模型，以及能够运行 Core Haptics 的 iOS 15 或更高版本的 iOS；借助该功能，我们可以基于 Apple 触觉与音频模式（AHAP）文件编排触觉效果。

尽管不同 iPhone 型号的具体物理规格有所差异，但根据大小可以大致分为两种型号组：常规大小和小型，例如 iPhone SE 系列。巧合的是，在日本，这两种型号组的 iPhone 持有比例约各为 50% [25]；因此，为了增加实验的样本量，我们将 iPhone 8 或更高版本的模型划分为这两种型号组。在这种分类中，考虑到评估振动刺激的可用性，我们分别将 iPhone 14 和第二代 iPhone SE 设为常规大小型号组和小型型号组的样本模型。我们根据高度、宽度、厚度和重量这四项物理规格，将各个 iPhone 型号划分到最接近的型号组中。分类结果列于表 I。

我们开发了一款实现幅度估计的模拟应用程序。该应用程序使参与者能够比较振动，并在 iPhone 屏幕上评估感知感觉的幅度。

B. 刺激

我们准备了八个时长为 1,000 ms 的单次振动脉冲。这些振动刺激由 AHAP 文件中名为 hapticIntensity [27],[28] 的参数控制；参数

表 I iPhone型号组

型号组	型号名称[b]	宽度[a] [mm]	高度[a] [mm]	厚度[a] [mm]	重量[a] [g]
常规	8 Plus	78.1	158.4	7.5	202
	X Global	70.9	143.6	7.7	174
	XS	70.9	143.6	7.7	177
	XS Max	77.4	157.5	7.7	208
	XR	75.7	150.9	8.3	194
	11	75.7	150.9	8.3	194
	11 Pro	71.4	144.0	8.1	188
	11 Pro Max	77.8	158.0	8.1	226
	12	71.5	146.7	7.4	162
	12 Pro	71.5	146.7	7.4	187
	12 Pro Max	78.1	160.8	7.4	226
	13	71.5	146.7	7.65	173
	13 Pro	71.5	146.7	7.65	203
	13 Pro Max	78.1	160.8	7.65	238
	14	**71.5**	**146.7**	**7.8**	**172**
	14 Plus	78.1	160.8	7.8	203
	14 Pro	71.5	147.5	7.85	206
	14 Pro Max	77.6	160.7	7.85	240
小	8	67.3	138.4	7.3	148
	SE 第二代	**67.3**	**138.4**	**7.3**	**148**
	12 Mini	64.2	131.5	7.4	133
	13 Mini	64.2	131.5	7.65	140
	SE 第三代	67.3	138.4	7.3	144

a 图取自 [26]。b 粗体标出的 iPhone 规格值用作各组分类的参考值。

从 0.3 开始，以 0.1 为步长递增至 1.0。在幅度估计中，我们将 hapticIntensity 参数为 0.6 的振动设为参考刺激。

我们在三个位置测量了这些刺激的振动加速度：右下角、下方中央和左下角，如图 1 所示。iPhone 用钓鱼线悬挂在中间，并通过磁性底座（小野测器；型号 NP-0102）和蜡将加速度计（小野测器；型号 NP-3414）固定在背面。通过数据采集板（ACO株式会社；型号 SpectraDAQ-200），加速度计与运行于 Windows 10 的 FFT 分析仪（ ACO 株式会社；型号 SpectraPLUS-SC ）之间建立了连接。测量采样率为 24千赫。

图 2 显示了三个测量位置中触觉强度参数的最大振幅。所有振动刺激均在 230 赫兹处观测到。我们发现，振幅与触觉强度之间呈非线性关系，且因模型而异；与此同时，图 3 中幅度估计所依据的相对于参考刺激的振幅大致相同。

C. 参与者

我们通过 Yahoo! Cloudsourcing [29] 招募了年满 18 岁、使用 iPhone 8 或更新型号的参与者。实验平均耗时 20 分钟，每位参与者可获得 300日元报酬。由于本研究处理的是匿名化数据，因此我们的机构无需进行伦理审查。

D. 实验程序

实验流程分为四个阶段：1）简报和实验条件分配；2）指导；3）实验；4）事后询问。

1) 简报与实验条件分配：在这一阶段开始时，我们举行了简报会，向参与者说明实验，并征得他们的知情同意。随后，我们询问了他们使用的 iPhone 型号，以及是否使用 iPhone 保护套等配件。

收集这些信息后，我们请他们安装模拟应用程序，并在操作智能手机前取下所有配件。在安装过程中，参与者被随机分配到振动触觉感受的某一实验条件：强度或重量。

2) 指导：这一阶段开始时，我们指导参与者如何在实验期间握持 iPhone，如图4所示。随后，我们说明了评估实验刺激感觉量级的基本协议。

模拟应用程序首先显示一个界面，如图5(a)所示。点击该界面会触发参考振动，并提示参与者感知振动。随后显示下一个界面，如图5(b)所示；点击第二个界面会触发实验振动，并要求参与者感知该振动。基本协议结束时，显示第三个界面，并要求参与者将实验振动与

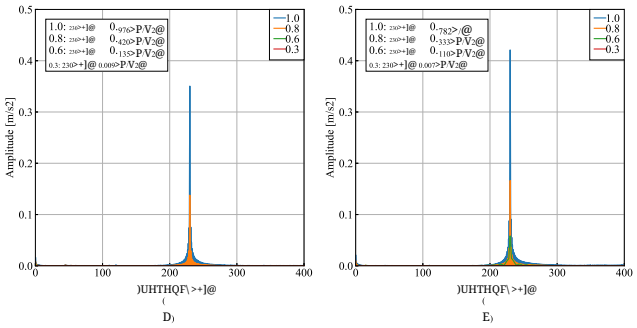

图 2. AHAP 文件中由触觉强度参数控制的振动振幅。(a) 第二代 iPhone SE 底部中央的振幅，以及 (b) iPhone 14 右下角的振幅。两部设备均以 230 赫兹振动。

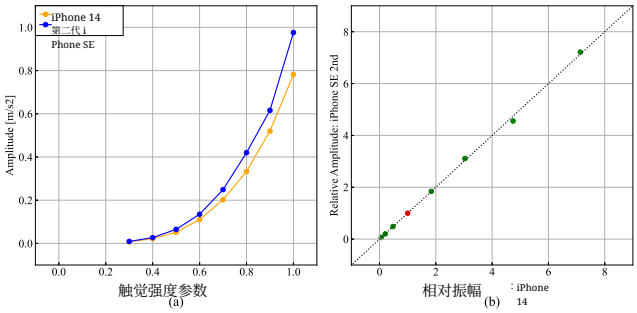

图 3。（a）振幅与触觉强度参数之间呈非线性关系。（b）相对于参考刺激（触觉强度 = 0.6，红点）的相对振幅，绘制在虚线附近；该虚线表示 iPhone 14 和第二代 iPhone SE 的相对振幅相等。



图4。实验期间手持 iPhone 的指导。

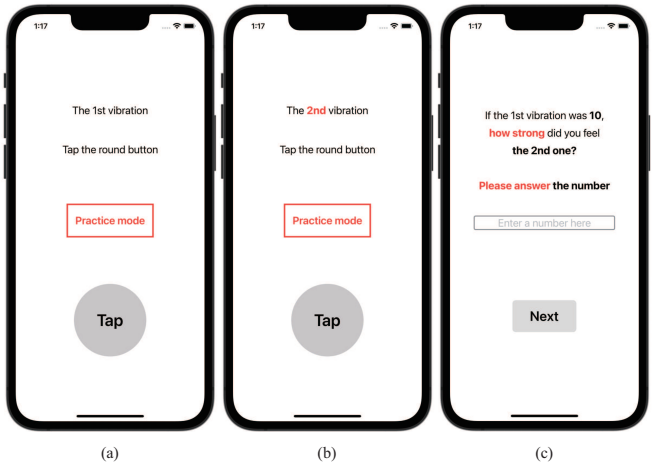

图5。应用程序界面转换：基于量值估计法测量感知感觉水平的基本流程。

参考刺激进行比较，并使用数字进行评价，如图5(c)所示。

我们规定，参考刺激的基本感觉强度视为 10。因此，如果参与者感觉实验刺激的强度是参考刺激的两倍，则要求其提供数值“20”。分配到强度（重量）条件的参与者需要对振动作为振动触觉感受时的主观强度（重量）进行评分。

我们准备了练习模式，以帮助参与者在实验前理解该流程，并按照自己的意愿操作应用程序。

3）实验：我们准备了一个由八个实验刺激组成的实验组，参与者根据基本流程随机评估该组中的每个刺激。在实验中，我们反复提供了五个实验组；参与者共40次反馈了他们的振动触觉感受。

在实验后调查中，我们询问参与者在实验期间如何握持 iPhone（图4）。我们还提出了12个问题来测量触摸需求量表 [22]。实验阶段结束时，我们收集了参与者的人口统计信息（年龄、性别、职业），以及他们的优势手和日常使用时的 iPhone 持握方式。

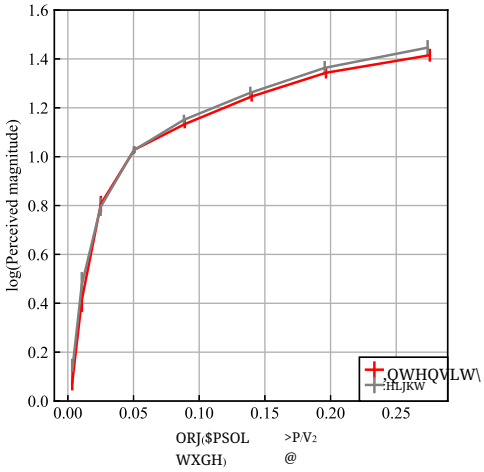

图 6. 振动触觉的感知强度（强度与重量）。

4）事后询问：使用模拟应用程序进行测量后，我们确认参与者在实验期间是否移除了所有智能手机配件；对于使用此类配件的参与者，我们不予处罚。

如果参与者花费超过 60 分钟，实验将自动结束。此外，只有当参与者能够感知振动触觉刺激并正确通过振动检查时，模拟应用程序才会从指导阶段继续。

E. 合理性检查

我们将参考刺激作为指令操控检查中的八个实验刺激之一呈现给参与者。我们指导参与者在模拟过程中将参考刺激的感觉幅度设为10（见图5(c)）。因此，对于该参考刺激给出异常值（例如零）的参与者，我们将其所有回答视为不诚实并予以排除。对于每个触觉强度参数下的幅度变异超出均值三个标准差的参与者，我们也将其视为不可靠并予以排除。最后，为了去除可能的数据噪声，我们排除了在实验的事后询问环节回答未移除配饰的参与者。

因此，分析使用了167名参与者的数据。其中包括89名年龄为19–73岁（M = 42.7）的男性和78名年龄为19–56岁（M = 37.2）的女性。共有89名参与者（49名男性和40名女性）被分配至强度条件；其余78名参与者被分配至重量条件。

V. 结果

A. 研究问题 1

图 6 展示了参与者对不同感觉下振动触觉刺激强度的感知。幂函数的估计指数 α 为 0.65（$p < .01$），与在一项实验室实验中评估的手指感知振幅为 250 Hz 的振动时所得指数相当接近（$\alpha = 0.60$） [23]。结果表明，

参与者在这项真实环境实验中形成的振动触觉感知，与在实验室条件下形成的感知相近。

平行性检验显示，幂律方程的常数 k 在强度条件和重量条件之间存在显著差异（$F(3, 5) = 32.201, p < .01, \eta^2 = 0.00480$）。与此同时，指数 α 呈现出不同趋势，但两个条件之间的差异并不显著（$F(3, 8) = 3.5695, p = 0.0589, \eta^2 = 0.000534$）。结果表明，支配强度和重量情境下振动感知转换的幂律在统计上等效。感知转换所处的情境会通过一个常数 k 影响缩放，该常数与原始幂律关系相乘；然而，这一效应量 η^2 非常小。

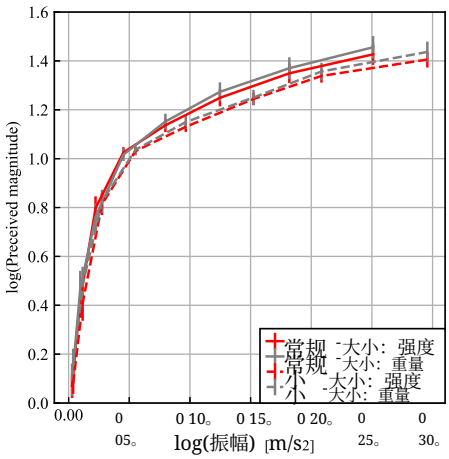

图7. 不同 iPhone 型号组（常规大小与小大小）和振动触觉类型（强度与重量）下的振动触觉感知强度。

表 II 平行线分析的多重比较：iPhone 型号组－振动触觉

组合[c]		效应量（η^2）[a, b] 常数（k）	指数（α）
（i）模型之间			
常规-I 小型-I		**.035****	.000
常规-W	小型-W	**.018****	.004**
(ii) 感觉之间			
常规-I	常规-W	.002	.000
小型-I	小型-W	.007**	.003**
（iii）交互作用			
常规-I	小型-W	**.010****	.004**
常规-W	小型-I	**.048****	.000

a ** $p < .01$; * $p < .05$; b 粗体显示的效应量值大致等于或大于“小”效应量（$\eta^2 = 0.01$）。c 缩写如下：常规-I：常规尺寸模型 - 强度 常规-W：常规尺寸模型 - 重量 小型-I：小尺寸模型 - 强度 小型-W：小尺寸模型 - 重量

B. 研究问题2的调节变量

为探究研究问题2，我们考察了日常生活中的各种因素如何造成振动触觉感受的差异，例如移动设备的物理规格、设备的操作方式，以及用户与触摸欲望相关的个人特质。我们将三个因素视为（1）中 k 和 α 的调节变量：以 iPhone 型号组作为设备物理规格的替代指标，以手优势作为握持 iPhone 的手的特征，并使用二分式 NFT 量表评估个体在触觉信息处理过程中的差异。我们针对振动触觉感受与这些因素的每种组合，分别估算幂律方程（1），随后对平行性检验进行多重比较。

iPhone型号组是一个二分变量：常规尺寸或小尺寸。我们获取了实验期间访问模拟应用程序的 iPhone 型号信息。按照与 IV-A 节所述相同的规则，将其分为两组。总计，78 位参与者的 iPhone 被归入常规尺寸组，89 位参与者的 iPhone 被归入小尺寸组。

“手优势”变量表示握持 iPhone 时所用手的特征。实验后调查的结果将 75 位主要用优势手支撑 iPhone 的参与者标记为“优势手”，将 92 位未用优势手握持设备的参与者标记为“非优势手”。

NFT量表根据实验后调查中 12 个题项的回答计算得出。在样本中，量表的取值范围为 -23 至 32，计算所得 NFT 的信度（Cronbach’s α）为 .90。与原论文 [22], 一样，采用中位数二分法确定高、低 NFT 值：得分高于中位数 6 的 82 名受试者被归类为二分 NFT 中的高值组，得分低于 6 的受试者则被归类为低值组。

为检验平衡性，我们确认振动触觉感受与 iPhone 型号组（$\chi^2(1) = 0.238, p = .626$）、手优势（$\chi^2(1) = 1.579, p = .209$）及 NFT量表（$\chi^2(1) = 2.127, p = .145$）之间不存在显著的样本不平衡。独立性卡方检验显示，各因素之间均无显著关联：型号组与手优势（$\chi^2(1) = 0.000, p = .993$）、型号组与NFT量表（$\chi^2(1) = 0.509, p = .476$），以及手优势与NFT量表（$\chi^2(1) = 0.774, p = .379$）之间均无显著关联。

C. 研究问题2

1) iPhone型号：图7展示了不同感觉与iPhone型号组组合下振动触觉刺激的感知强度。幂函数的估计指数 α 在各组合间介于0.646至0.664之间（所有 α 值均为 $p < .01$）。平行性检验表明，各组合间幂律方程的常数 k（$F(3, 5) = 71.732, p < .01, \eta^2 = 0.0312$）和指数 α（$F(3, 8) = 3.5695, p < .01, \eta^2 = 0.00264$）存在显著差异。然而，根据效应量 η^2，设备的物理规格主要影响常数差异，且影响程度为中等。

表 II 列出了采用 Bonferroni 校正的平行性检验多重比较结果，用于考察

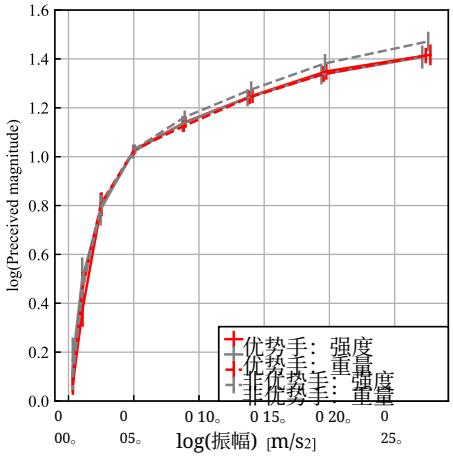

图 8. 以不同方式（优势手与非优势手）握持 iPhone 时振动触觉的感知强度，以及不同感觉维度（强度与重量）。

表 III 平行线分析的多重比较：优势手与非优势手——感觉

组合[c]		效应量 (η^2) [a,b] 常数 (k)	指数 (α)
(i) 手优势之间			
D-I	NonD-I	.001	.003*
D-W	NonD-W	.000	**.012****
（ii）感觉之间			
D-I	D-W	.005**	**.012****
NonD-I	NonD-W	.004**	.002*
（iii）交互作用			
D-I	NonD-W	**.009****	.000
D-W	NonD-I	.002	.004**

a ** $p < .01$; * $p < .05$; b 以粗体显示的效应量数值约等于或大于“小”（$\eta^2 = 0.01$）。c 缩写如下：D-I：优势手 - 强度；D-W：优势手 - 重量；NonD-I：非优势手 - 强度；NonD-W：非优势手 - 重量

组合中的哪一对存在显著差异。我们不仅考虑统计显著性，还考虑效应量是否至少约等于或大于“小”（$\eta^2 = 0.01$），以确定对振动触觉感知产生实质影响的因素。根据表 II (ii)，同一型号组内，强度和重量的感知强度没有统计学差异；即使存在差异，效应量也很小。与此同时，根据表 II (i) 和 (iii)，型号组的差异主要影响强度和重量感知强度的水平：对于相同的刺激，较大且较重的设备产生了更强的感觉强度。

2) 手优势：无论参与者是右利手还是左利手，约有一半人使用优势手操作 iPhone。其余参与者则用非优势手握持 iPhone，并用优势手进行操作。

图 8 展示了不同感觉与手优势组合下，触觉刺激的感知强度。各组合的幂函数估计指数 α 介于 0.629 至 0.669 之间（所有 α 值均为 $p < .01$）；估计指数的范围比 iPhone 型号类型更广。平行性检验表明，幂律方程的常数 k ($F(3, 5) = 12.186, p < .01, \eta^2 = 0.00545$) 和指数 α ($F(3, 8) = 17.243, p < .01, \eta^2 = 0.00769$) 在不同组合间存在显著差异。根据效应量 η^2，人们握持 iPhone 的方式对振动触觉感知的影响较小，但对指数的影响相对明显，超过了对常数的影响。

表 III 列出了采用邦费罗尼校正的平行性检验多重比较结果。与表 III (ii) 中对强度的感知相比，受试者在优势手上感知到更强的振动触觉刺激带来了更大的重量。此外，当刺激

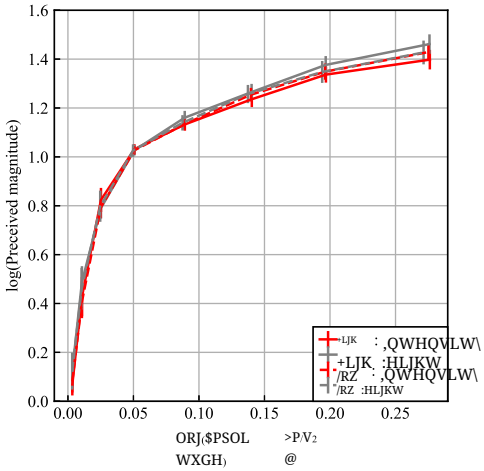

图 9. 不同触觉需求（NFT）量表得分（高与低）及感觉类型（强度与重量）下的振动触觉感知强度。

增强时，非优势手上的感知重量大于优势手上的感知重量（见表 III (i)）。表 III (iii) 平行性检验中估计的常数 k 显示，非优势手上的重量感知感觉幅度比优势手上的强度约高 3.2%。这一发现表明，iPhone持握方式显著影响了振动的知觉转换。

3) 触觉需求：图 9 展示了不同感觉组合与二分式 NFT 量表下对振动触觉刺激的感知强度。幂函数的估计指数 α 范围为 0.644 至 0.657（所有 α 值均为$p < .01$）；在各组合中，估计指数的范围是三个因素中最窄的。平行性检验显示，幂律方程的常数 k 在各组合间存在显著差异（$F(3, 5) = 11.438, p < .01, \eta^2 = 0.00511$）。与此同时，指数 α 呈现出不同但不显著的趋势（$F(3, 8) = 2.472, p = 0.0598, \eta^2 = 0.00111$）。

表 IV 平行线分析的多重比较：触觉需求—感觉

组合[c]		效应量（η^2）[a, b] 常数（k）	指数（α）
（i）二分 NFT 之间			
高 I	低 I	.000	.001
高 W	低 W	.001	.000
（ii）感觉之间			
高 I	高 W	**.008****	.000
低 I	低 W	.003*	.002
(iii) 交互作用			
高 I	低 W	.004**	.000
高 W	低 I	.006**	.001

a ** $p < .01$; * $p < .05$; b 粗体显示的效应量数值约等于或大于“小”（$\eta^2 = 0.01$）。c 缩写如下：高 I：高触摸需求 - 强度；高 W：高触摸需求 - 重量；低 I：低触摸需求 - 强度；低 W：低触摸需求 - 重量

表 IV 列出了采用邦费罗尼校正进行平行性检验的多重比较结果。标度指数之间没有显著差异，这表明感觉组合与二分 NFT 分数组合中的所有幂律关系均成比例等效。表 IV (ii) 和 (iii) 中，各感觉的感知强度水平以及 NFT 分数的交互作用存在显著差异；与此同时，图 9 显示，NFT 分数较低者感知到的强度和重量相当，且其水平相较于 NFT 分数较高者处于中等程度。这些结果表明，在进行振动触觉感觉转换时，应考虑个人特质，例如触觉信息处理水平。

VI. 讨论

通过一系列分析，我们明确了人们对智能手机振动的强度和重量有不同的感知。在相同的振动刺激条件下，人们对振动刺激重量的感知强度往往高于对其强度的感知。

对于相同的刺激，较大、较重的设备会让人感受到更大的重量，这表明振动执行器的物理规格会影响振动触觉向重量的转换。可以合理地推测，人们在将振动感受转换为感知到的重量时，会无意识地把 iPhone 的重量也计算在内。我们的结果表明，在振动触觉感觉转换过程中，考虑用户的个人特质（例如触觉信息处理水平）十分重要：与 NFT 分数较低的人相比，NFT 分数较高的人更有可能从相同的振动触觉刺激中区分出不同的感觉。为了更好地进行触觉系统设计，最好考虑用户个人特质的各个方面；目前关注这一方面的研究寥寥无几。

日常生活中，智能手机的使用方式无法控制；然而，我们发现，智能手机的握持方式以及用于握持它的手会影响振动触觉刺激的感知转换。与我们研究的前两个要素不同，智能手机的握持方式对幂律差异的影响小于不同感觉之间振动的感知转换所产生的影响。这一结果表明，在设计用于感知数字对象重量的振动触觉刺激时，需要考虑一些关键问题。开发能够鼓励人们以特定方式握持智能手机的用户界面，可能是最大限度发挥振动触觉刺激效果的关键。

局限性及未来研究方向如下。应将智能手机的重量和大小分开进行详细分析。智能手机的大小或形状会影响人们握持它的方式以及使用时的舒适度。我们简化了模拟应用程序的用户界面和情境，以尽可能多地生成振动。未来研究应考虑用户界面设计、施加振动的情境与振动触觉感知之间的交互作用。

参考文献

[1] R. T. Verrillo、A. J. Fraioli 和 R. L. Smith，《振动触觉刺激的感觉强度》，《知觉与心理物理学》，第 6 卷，第 6 期，第 366–372 页，1969年。[2] A. Chang、S. O’Modhrain、R. Jacob、E. Gunther 和 H. Ishii，《Com-Touch：振动触觉通信设备的设计》，载于《交互系统设计：流程、实践、方法与技术》第 4 届会议论文集，丛书 DIS ’02。纽约：计算机协会，2002年6月，第 312–320 页。[3] S. Choi 和 K. J. Kuchenbecker，《振动触觉显示器：感知、技术与应用》，《IEEE 论文集》，第 101 卷，第 9 期，第 2093–2104 页，2013年。[4] E. Hoggan、T. Kaaresoja、P. Laitinen 和 S. Brewster，《跨模态一致性：触摸屏控件的视觉、触感与声音》，载于《多模态界面》第 10 届国际会议论文集，丛书 ICMI ’08。纽约：计算机协会，2008年10月，第 157–164 页。[5] J. Rantala、P. Majaranta、J. Kangas、P. Isokoski、D. Akkil、O. ˇSpakov 和 R. Raisamo，《结合振动触觉反馈的注视交互：综述与设计指南》，《人机交互》，第 35 卷，第 1 期，第 1–39 页，2020年。[6] J. R. Blum、P. E. Fortin、F. Al Taha、P. Alirezaee、M. Demers、A. Weill-Duflos 和 J. R. Cooperstock，《走出实验室：开展可穿戴振动触觉研究的实用入门指南》，《IEEE触觉汇刊》，第 12 卷，第 3 期，第 232–246 页，2019年。[7] H. Z. Tan、N. I. Durlach、C. M. Reed 和 W. M. Rabinowitz，《利用多指触觉显示器传递信息》，《知觉与心理物理学》，第 61 卷，第 6 期，第 993–1008 页，1999年。[8] G. Park 和 S. Choi，《调幅振动触觉刺激的感知空间》，载于《2011年IEEE世界触觉会议》。IEEE，2011年，第 59–64 页。[9] J. M. Romano 和 K. J. Kuchenbecker，《利用接触加速度数据创建逼真的虚拟纹理》，《IEEE触觉汇刊》，第 5 卷，第 2 期，第 109–119 页，2011年。[10] Y. Visell 和 S. Okamoto，《振动触觉与柔软度感知》，载于《多感官柔软度：来自多种信息源的感知顺应性》，M. Di Luca 编。英国伦敦：施普林格，2014年，第 31–47 页。[11] E. Hoggan、S. A. Brewster 和 J. Johnston，《探究触觉反馈对移动触摸屏的有效性》，载于《SIGCHI计算机系统中的人为因素会议论文集》，丛书 CHI ’08。纽约：计算机协会，2008年4月，第 1573–1582 页。[12] G. Park、S. Choi、K. Hwang、S. Kim、J. Sa 和 M. Joung，《移动设备触摸屏上虚拟按钮的触觉效果设计与评估》，载于《人与移动设备及服务交互》第 13 届国际会议论文集，丛书 MobileHCI ’11。纽约：计算机协会，2011年10月，第 11–20 页。[13] N. M. C. Palomares、G. B. Romero 和 J. L. A. Victor，《评估用户对手机中各种振动信号的解读》，载于《神经工效学与认知工程进展》，丛书 AHFE 2019。《智能系统与计算进展》，H. Ayaz 编。瑞士沙姆：施普林格，2020年，第 500–511 页。

[14] C. Park、J. Yoon、S. Oh 和 S. Choi，《通过振动触觉反馈增强实体按钮，实现可编程触感》，载于《第 33 届 ACM 用户界面软件与技术年会论文集》，丛书 UIST '20。纽约：计算机协会，2020年10月，第 924–937 页。[15] H. Khosravi、K. Etemad 和 F. F. Samavati，《利用振动触觉反馈和共位物理建模虚拟手在 VR 中进行质量模拟》，《计算机与图形》，第 102 卷，第 120–132 页，2022年。[16] M. S. Manshad、D. Brannon、S. A. Alharthi 和 V. Iyer，《触觉支付：通过移动设备中的振动反馈刺激支付“痛感”》，载于《2019年 ACM 交互表面与空间国际会议论文集》，丛书 ISS '19。纽约：计算机协会，2019年11月，第 379–384 页。[17] 苹果公司。《Core Haptics：编排并播放触觉模式，自定义 iOS 应用的触觉反馈》。访问日期：2023年1月13日。 [在线]。网址：https://developer.apple.com/documentation/corehaptics [18] R. Abou Chahine、D. Kwon、C. Lim、G. Park 和 H. Seifi，《众包研究和实验室研究中的振动触觉相似性感知》，载于《触觉：科学、技术与应用》，丛书 EuroHaptics 2022。《计算机科学讲义》，H. Seifi、A. M. L. Kappers、O. Schneider、K. Drewing、C. Pacchierotti、A. Abbasimoshaei、G. Huisman 和 T. A. Kern 编。瑞士沙姆：施普林格，2022年，第 255–263 页。[19] R. S. Johansson 和 J. R. Flanagan，《物体操作任务中指尖触觉信号的编码与运用》，《自然综述：神经科学》，第 10 卷，第 5 期，第 345–359 页，2009年。[20] S. T. Yang、S. H. Jin、G. Lee、S. Y. Jeong 和 J. An，《触觉刺激期间优势手与非优势手呈现不同的皮层激活模式：一项功能性近红外光谱研究》，载于《2018年第六届脑机接口国际会议（BCI）》。IEEE，2018年，第 1–3 页。[21] M.-Y. Kim、H. Kwon、T.-H. Yang 和 K. Kim，《面向大脑的振动警示：优势手与非优势手食指接受高频振动触觉刺激时诱发和引发的脑磁图反应》，《人类神经科学前沿》，第 14 卷，第 576082 页，2020年。[22] J. Peck 和 T. L. Childers，《触觉信息处理的个体差异：“触觉需求”量表》，《消费者研究杂志》，第 30 卷，第 3 期，第 430–442 页，2003年。[23] S. S. Stevens，《心理物理学：感知、神经与社会前景导论》。劳特里奇，2017年。[24] ——，《论心理物理定律》，《心理学评论》，第 64 卷，第 3 期，第 153–181 页，1957年。[25] Mobile Marketing Data Labo.，《2022年5月智能手机操作系统市场份额调查 [5月智能手机操作系统市场份额调查 2022],》白皮书，2022年5月。[26] 苹果公司。《技术规格 [技术规格]》。访问日期：2023年1月13日。[在线]。网址：https://support.apple.com/ja JP/specs [27] ——。《在 AHAP 文件中表示触觉模式》。访问日期：2023年1月13日。 [在线]。网址：https://developer.apple.com/documentation/ – corehaptics/representing haptic patterns in ahap files [28] ——。《类型属性：触觉强度》。访问日期：2023年1月13日。 [在线]。网址：https://developer.apple.com/documentation/corehaptics/chhapticevent/parameterid/3114595-hapticintensity [29] 《Yahoo! Cloudsourcing》。访问日期：2022年10月1日。 [在线]。网址：https://crowdsourcing.yahoo.co.jp/