

虚拟现实徒手三维旋转中的运动增益控制性能与 forearm 负担研究进展

康海星

华东理工大学艺术设计与传媒学院, 上海

收稿日期: 2026年9月11日; 录用日期: 2026年10月12日; 发布日期: 2026年10月21日

摘 要

在虚拟现实环境中, 徒手三维旋转可能因交互时间、动作方式和控制要求导致用户疲劳与任务绩效下降。运动增益通过改变真实动作与虚拟物体运动的对应关系, 为减少操作幅度提供了方法; 但动作减少是否意味着身体负担降低, 不能由完成时间或主观偏好直接判断。本文采用主题驱动的叙述性研究进展综述, 围绕三维旋转、空中手势和 forearm 表面肌电, 综合运动映射、精细操作、伪触觉、上肢疲劳模型及肌电输入研究。研究表明, 非一比一映射可以提高特定任务的运动效率, 却可能增加末端修正, 并改变控制感与物体重量感; 这种权衡受旋转轴、姿势、操作阶段、输入设备和追踪质量共同影响。肌电幅值、累计肌电暴露、局部用力 and 持续疲劳反映不同现象, 不宜相互替代。现有证据尚不能直接回答: 在任务目标与身体约束一致时, 不同旋转轴是否需要不同增益, 以及精度变化是否伴随局部肌电暴露的改变。基于这一缺口, 本文构建连接任务与约束、增益策略、动作与控制表现、生理负担与体验以及测量效度的分析框架, 提出三项可检验假说, 并形成面向坐姿三维模型检查与编辑的设计检查清单。

关键词

虚拟现实, 徒手交互, 旋转增益, 表面肌电, 人机功效学

Motion Gain Control Performance and Forearm Burden in VR Bare-Hand 3D Rotation: A Review

Haixing Kang

School of Art Design and Media, East China University of Science and Technology, Shanghai

Received: September 11, 2026; accepted: October 12, 2026; published: October 21, 2026

文章引用: 康海星. 虚拟现实徒手三维旋转中的运动增益控制性能与 forearm 负担研究进展[J]. 设计进展, 2026, 11(5): 266-280. DOI: 10.12677/sheji.2026.115024

Abstract

In virtual reality environments, bare-hand 3D rotation may lead to user fatigue and decreased task performance due to interaction duration, motion methods, and control demands. Motion gain offers a method to reduce operational amplitude by altering the correspondence between real-world movements and virtual object motion; however, whether this reduction in movement translates to reduced physical burden cannot be directly inferred from completion time or subjective preference alone. Adopting a topic-driven narrative review approach, this paper synthesizes research on 3D rotation, mid-air gestures, and forearm surface electromyography (sEMG), integrating findings from studies on motion mapping, fine manipulation, pseudo-haptics, upper-limb fatigue models, and EMG-based input. Research indicates that non-one-to-one mapping can improve motion efficiency for specific tasks but may increase terminal correction and alter the sense of control and perceived object weight. This trade-off is jointly influenced by the axis of rotation, posture, operation phase, input device, and tracking quality. Furthermore, sEMG amplitude, cumulative EMG exposure, local exertion, and sustained fatigue reflect distinct phenomena and should not be used interchangeably. Current evidence does not directly answer whether different axes of rotation require different gains when task goals align with physical constraints, nor whether changes in precision are accompanied by alterations in local EMG exposure. Addressing this gap, this paper constructs an analytical framework linking task and constraints, gain strategies, motion and control performance, physiological burden and experience, and measurement validity. Based on this framework, three testable hypotheses are proposed, and a design checklist oriented towards seated 3D model inspection and editing is presented.

Keywords

Virtual Reality, Bare-Hand Interaction, Rotation Gain, Surface Electromyography (sEMG), Ergonomics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

虚拟现实环境中徒手交互使用户能够直接伸手接触和操纵虚拟物体，是一种无需握持手柄或其他外设硬件即可交互的便捷交互方式，但“看起来像现实动作”不代表“适合反复使用”。真实物体通常提供支撑、接触力和惯性反馈，虚拟物体则未必具备这些条件。用户可能需要悬持手臂、维持抓取姿势，并反复调整手腕和前臂，用户可能由于徒手交互而产生肌肉疲劳，并在长期交互过程中可能出现工作绩效下降。比较控制器与徒手输入的研究表明，交互表现和用力程度取决于具体任务、动作路径与姿势，徒手方式并不天然占优[1]。

运动增益为这一问题提供了一条直接的设计路径：让较小的真实运动产生较大的虚拟运动。早期非同构旋转研究已经突破真实转角与虚拟转角必须一致的假设，后续研究进一步比较固定、动态以及针对精细操作的映射[2]-[7]。然而，较大的增益也会放大动作的扰动，使用户在接近目标时更谨慎，或者持续保持肌肉紧张稳定手部。因而，“少转一些”与“更轻松”之间存在需要实际验证的环节。

这一问题在三维旋转中尤其突出。同样的虚拟转角，可以通过前臂旋前旋后、腕屈伸、腕桡尺偏或肩肘代偿完成。这些动作不能仅因角度相同就被视作同等身体需求，不同姿态由不同的肌肉和骨骼控制。

早期六自由度控制研究揭示了方向之间相关的表现差异,较新的生理研究又说明,前臂姿态与腕部活动会影响肌肉的活动模式[8]-[10]。因此,评价旋转增益需要结合界面控制研究与局部身体指标的测量,而不只是寻找一个平均完成时间最短的参数组合。

本文围绕三个相互关联的问题展开论述:运动增益怎样改变旋转任务的控制要求;如何辨别动作减少、肌电暴露降低与疲劳改善;哪些应用允许改变运动参数的映射,并且能够从轴向差异化设计中获益。本文的目标是以研究进展综述的形式建立可解释的证据框架,在此基础上提出可检验假说和实践设计准则,而非把不同设备、任务和人群中的“最佳参数”拼接为通用规则。

2. 综述范围与分析框架

本文为主题驱动的叙述性研究进展综述,而非系统综述或立场论文,目的不是估计统一效应量或主张预定算法,而是沿“任务约束-增益策略-控制表现-身体与体验后果-测量效度”的证据链,综合能够界定徒手旋转增益效应及适用边界的研究。检索围绕运动增益、三维操纵、伪触觉、上肢负担、肌电归一化及肌电手势输入展开;英文检索词包括 virtual reality、mid-air interaction、rotation gain、control-display ratio、non-isomorphic manipulation、upper-limb fatigue、forearm electromyography、perceived exertion 和 neuromotor interface,并采用组合检索追踪相邻主题。

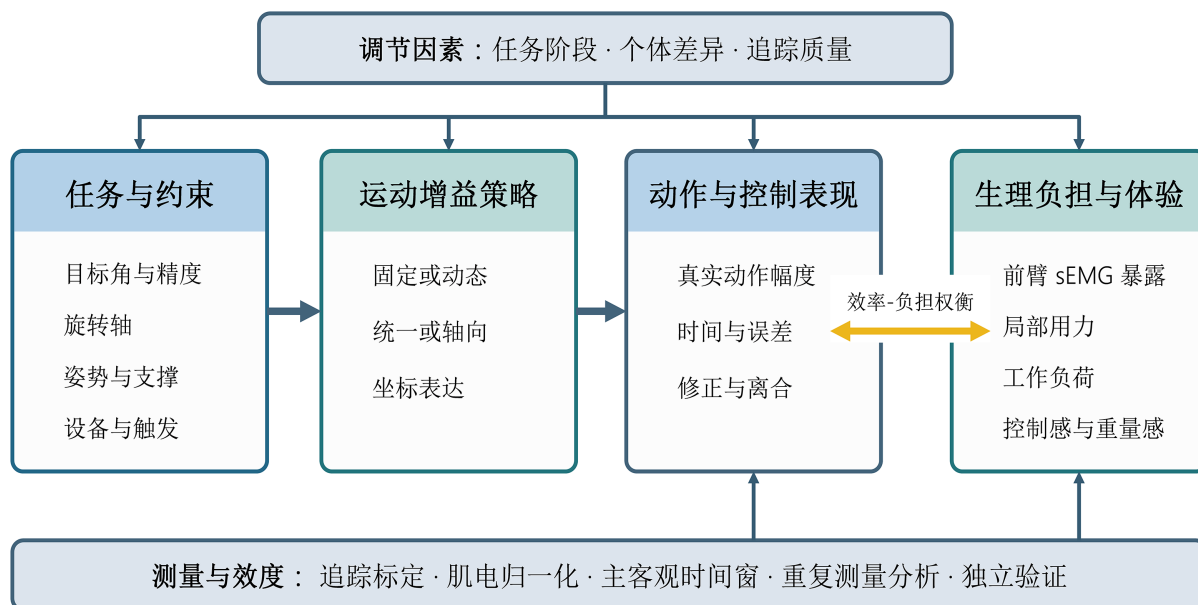
本文综述共讨论 47 项前人研究,时间覆盖 1982 年至 2026 年。较早研究用于界定相关基础概念、主观量表和肌电测量方法,近期研究用于分析交互技术与输入设备的发展。证据范围同时包括期刊论文、方法章节以及 CHI、ISMAR 和 VRST 等交互领域的代表性会议论文。不同来源的研究在同行评审形式、研究任务和证据强度上并不完全一致,因此本文不依据出版载体排序论述,而是将与徒手旋转增益相关的问题分类后展开论述。

文献证据被按照与问题的相关程度论述。直接证据来自旋转映射与三维操作研究;邻近证据来自平移、头部指向、鼠标增益和伪触觉研究;方法证据来自肌电、生理负担及量表研究。邻近研究用于提出机制和约束,不用于证明特定徒手旋转条件下的效果。本文不进行效应量合并,也并未覆盖全部数据库;没有直接比较的设计关系保留为待验证问题。

本文沿一条从设计变量指向应用判断的逻辑顺序展开。首先界定旋转增益的定义、策略及三维旋转的坐标边界,然后分析运动映射如何改变效率、精度、动作组织和前臂需求;随后讨论视觉映射引起的控制感与用力感,并建立肌电、局部用力和总体工作负荷的互证框架;最后综合已有共识、关键缺口、可检验假说及适用场景。

本文中关于肌电部分的论述需要区分“肌电测量”与“肌电输入”。前者把前臂表面肌电作为局部活动或累计暴露指标;后者利用肌电分类或回归动作意图。研究级腕部神经运动接口已经显示肌电可承载连续和离散交互信息,平移手势数据集与疲劳感知识别研究也说明设备布局、训练方式和状态变化会影响识别稳定性。这些工作用于界定设备能力和长期稳定性,而不能直接回答哪种旋转增益的身体负担最低。如果同一肌电信号同时控制旋转并评价负担,控制规则会直接改变收缩需求,使研究问题转向肌电控制策略的工效学。因此,在基础增益实验中,手追踪适合承担输入与虚拟手显示,肌电臂环适合承担独立测量;IMU (Inertial Measurement Unit, 惯性传感单元)姿态映射和肌电动作分类仅作为背景边界。

本文总体论述分析框架如图 1 所示,任务目标、旋转轴、姿势支撑及输入条件共同限定增益策略的设计空间;增益先改变真实动作幅度、完成时间、误差、修正和离合等动作组织,再影响前臂肌电暴露、局部用力、总体工作负荷以及控制感和重量感。任务阶段、个体差异与追踪质量可能调节上述关系,而追踪标定、肌电归一化、主客观时间窗匹配、重复测量分析和独立验证决定这些关系能否被有效推断。分析框架把“参数设置”、“行为后果”、“身体与体验后果”及“测量效度”置于同一证据链中。



来源：自绘。

Figure 1. An analysis framework of motion gain, control performance, and forearm burden in freehand 3D rotation

图 1. 徒手三维旋转中运动增益、控制表现与前臂负担的分析框架

3. 运动增益的控制机制与三维旋转边界

3.1. 增益定义、映射策略与坐标表达

本文将旋转增益定义为 $g = \text{虚拟角度增量} / \text{真实角度增量}$ 。 $g = 1$ 表示一比一映射； $g > 1$ 表示动作放大，例如真实转动 30° 产生 60° 虚拟旋转； $g < 1$ 表示动作缩小。部分文献将 C/D (控制/显示比 Control/Display Ratio) 定义为真实控制运动除以显示运动，此时 $C/D = 1/g$ ；也有部分文献可能使用相反方向比例或不同术语表述。引用数值时必须先核对公式，不能仅依据“高 C/D”判断动作是被放大还是缩小。

鼠标 DPI (Dots Per Inch) 描述设备位移与计数的关系，而应用程序中的指针映射还可能叠加系统灵敏度和加速度。它与 VR 运动增益在“输入运动怎样转换成显示运动”这一层面相似，但度量值、感觉反馈及身体参与方式并不相同。虽然鼠标增益相关的研究提示表现与疲劳可能存在权衡[11]，但是却不能把一个鼠标增益数值换算为 VR 旋转的推荐值，因为他们的工作维度也不一样。将不同的运动映射策略一起比较可以看出相互之间的区别，如表 1 所示。

固定增益表示在整个操作过程中保持不变，适合检验基本的旋转动作稳定映射的关系。速度相关增益根据动作速度调整映射，其目标通常是兼顾快速移动和小幅修正。目标相关增益则依赖系统掌握目标位置或姿态，它可以在接近目标时降低灵敏度，但已包含额外的任务信息。按轴设置不同参数是另一种策略，并不必然依赖目标信息，也不必然要求实时自适应[3][4][12]，完成不同轴向旋转的人体肌肉和骨骼的控制方法也不同。

这些设计解决的问题不同。如果系统明确知晓一个装配零件的最终正确姿态，目标相关策略则有实现条件；但是如果用户正在自由查看模型内部结构，系统通常不知道下一次或者下一段交互过程中用户感兴趣的视角。后一个场景更适合讨论固定、速度相关或轴向差异化映射，而不能默认存在一个可供算法使用的“剩余误差”，因为难以预测。尽管实验可以用已知目标统一测量难度，但这并不意味着实际算法必须利用该目标。

Table 1. Differences in motion mapping strategies
表 1. 运动映射策略的区别

策略	映射参数依赖	适合回答的问题	主要限制
固定增益	常数	增益本身如何影响表现和负担	粗调与精调可能相互牵制
速度相关增益	当前运动速度	快速转动与慢速修正能否兼顾	滤波和延迟影响实际映射
目标相关增益	到目标的距离或姿态误差	已知目标任务能否更快完成	不能直接迁移到自由探索
轴向差异化增益	选定坐标轴或动作方向	不同方向是否需要不同灵敏度	虚拟轴不等于解剖关节轴
个体化映射	舒适活动范围等特征	不同用户是否需要不同参数	校准成本及跨时段稳定性
速度相关增益	当前运动速度	快速转动与慢速修正能否兼顾	滤波和延迟影响实际映射
目标相关增益	到目标的距离或姿态误差	已知目标任务能否更快完成	不能直接迁移到自由探索

策略分类明确了算法依赖，但三维旋转还要求说明增益如何落实为坐标运算。平移增量可以在固定坐标系中逐分量缩放，而三维有限旋转不满足交换律。绕某一轴转动后再绕另一轴转动，与反过来的结果通常不同，部分研究显示相反方向的旋转任务在使用姿态控制时并不具备对称性。因此，轴向增益必须说明采用世界坐标、物体局部坐标还是手部坐标，并明确更新规则。对于单轴任务，可对指定轴上的有符号角度增量进行映射；对于自由三维任务，则需要明确旋转增量的分解、缩放和复合方式。否则，所谓“轴向效应”可能实际来自坐标系变化、角度跳变或实现误差。

这一点对工效学解释也非常重要，世界坐标中的竖直轴旋转并不总是由同一种前臂动作完成。如果研究以解剖动作作为解释依据，就需要同时规定起始姿势并检查是否有其他肌肉参与了代偿；如果只研究界面轴，则应将结论限定为该界面和姿势组合，避免直接命名为某块肌肉的增益优势。

3.2. 从动作节省到效率 - 精度权衡

非同构旋转技术的基本贡献，是证明真实与虚拟旋转可以采用不同尺度，而不必把用户的真实动作和虚拟旋转映射比例限制在一比一映射之内[2]。Gao 等比较了非同构旋转对三维操作的影响，发现静态与动态映射的收益并不完全一致，运动阶段及环境也会影响最终表现[3]。这表明研究不能只记录一段大幅转动的收益，还应观察目标附近用户的修正过程。

从控制机制看，较高增益可能减少完成目标转角所需的真实运动，但也提高同一输入扰动对应的显示误差。用户可能用更慢的动作、更多反向修正或更长的稳定等待来实现补偿。较低增益则可能提高了细调分辨率的同时却增加了转动幅度或离合的次数。因而总时间相同的两种映射，也可能具有不同的动作组织和肌肉活动。把粗调时间、精调时间与离合次数分开，有助于解释表面上相互矛盾的结果[3][13]。

自适应增益研究已经探索根据任务状态改善远距离对象操作[4]。但如果一项研究同时改变增益函数、选择机制和目标辅助，就无法将全部收益归因于增益本身，因为参与的变量过多，但是未来依旧可能通过这种复合的方法来优化特定场景下的旋转交互方法。为了回答基础的轴向差异问题，先保持这些机制一致，比直接设计复杂的自适应系统更容易建立因果关系的解释。

3.3. 自由度、学习与设备误差的混杂作用

自由度分离、自定义变换轴以及高精度三维操作技术，说明三维任务的困难并不只来自输入灵敏度，也来自同时控制多个方向的负担[5]-[7]。虚拟轨迹球则展示了通过交互结构重新组织旋转输入的另一条路线[14]。这些研究与轴向增益相关，却不是同一个问题。

如果把自由三维旋转的一比一条件,与只允许单轴转动的高增益条件相比,即使后者更准确,也无法判断优势来自增益还是约束,更合理的比较应该是在同样的自由度约束下改变增益,再通过附加条件检验结果能否推广到自由旋转。任何沿用约束旋转范式的研究都应保留这一边界,避免把任务约束的作用解释为增益效应。

离合机制同样需要单独处理。离合允许用户暂停映射并回到舒适姿势,能够绕开关节活动范围限制;它也增加操作步骤并改变暴露时间[13]。如果高增益条件显著减少离合,总体收益可能主要来自少做一次重置,而不是每一段旋转本身更轻松,所以这种方式本身如果能够提升绩效,则无法解释是否是旋转增益带来的效果。

非熟悉映射需要适应。运动学习指标研究强调,时间和准确率之外,还应关注表现如何随练习变化[15]。如果某种增益在第一轮较差、后期较好,简单平均可能误判了初学成本和稳定表现。实验应记录练习试次与正式试次的区别,并检查条件顺序与重复次数的影响,与此同时尽可能在所有实验人员序列中平均安插有顺序的不同试次和旋转方向等,而不是默认一次练习即可消除学习效应或者某些特定旋转方向导致的常见差异。

另外,手追踪系统也会引入误差与延迟。Abdlkarim 等以 Quest 2 建立了追踪精度评估框架[16],其价值在于提供独立测量思路;该设备的具体误差不能直接替代 Quest 3 以及其他使用摄像头进行手部空中交互定位以及不同软件版本或腕部旋转条件的标定结果。手势识别稳定性、遮挡及平滑参数的差别,都可能被高增益放大,在不同的硬件设备和软件算法当中也可能产生差异。

一项受控比较专门减少了追踪和触发差异造成的误判,说明比较输入设备时不能把整套系统的表现全部归因于“徒手”或“控制器”[1]。面向精细手物交互的研究也提醒我们,接触与操作模型本身会影响精度[17]。旋转增益实验因而需要报告虚拟手、物体抓取点、触发方式、滤波和确认规则,不能只给出增益数值,在开展相关研究时需要严格约束和控制变量。

4. 旋转运动增益的用户体验差异

4.1. 轴向动作与前臂负担

六自由度操作中的各向异性已得到前人研究支持[8]。它说明不同方向值得分别考察,但不能单独证明哪一种当代手追踪增益最优。生理层面,腕部运动和前臂旋转研究表明,姿态、运动形式及外部负载会影响肌肉活动[9][10]。这些结果共同支持将方向与姿势纳入解释,而不是把三个虚拟轴简单当作可互换重复。用户自定义手势、腕部状态与偏好研究[18],以及基于不适程度评价手势的研究[19],进一步表明主观偏好与身体需求需要分开分别测量。老年人手势负荷研究把多个上部部位的肌电与主观体验联系起来[20];相关可穿戴手势的研究则报告了与方向相关的疲劳差异[21]。这些发现能够支持关注动作方向,但年龄、手势范围与任务内容差异限制了直接迁移。

因此,如果各方向的动作组织不同,就不应先验假设同一个增益适用于所有方向。轴向差异化设计是否必要,应由增益与方向的交互模式支持,而不只由某个方向的平均肌电暴露值较高支持。惯用手、前臂长度、关节活动范围、性别和年龄还可能改变用户采用的动作策略;这些因素至少需要被记录,并在样本允许时分层描述,而不能默认随机化顺序会消除个体差异。

4.2. 支撑条件与负担测量边界

手肘置于桌面能够减少部分上肢悬持需求,并使起始姿势更一致。然而,支撑不等于肩部和上臂完全不参与:用户仍可能旋转肱骨、移动身体躯干或改变肘部的受力;支撑点也可能限制原本自然的运动路径。因此,把“肘部有支撑”写成“仅有手腕工作”并非准确表达,需要确认更加具体的实验条件。

而对于局部前臂负担研究,较合理的限定方法是研究“坐姿、有支撑的手部旋转操作”,允许明确范围内的自然微调,同时记录明显代偿和违规,但是机械方式固定肘关节会引入额外约束甚至不适,只有在确实需要严格分离动作且有相应依据时才适合使用。肘关节获得支撑条件下得到的结果,首先适用于桌前坐姿的虚拟现实环境操作,而不能迁移到站姿大范围的装配训练等场景。

Piecewise 将上肢舒适活动范围纳入非同构映射设计[22],说明用户差异值得进入映射参数。但其比较结果并不是个体化方法在所有指标上胜出。这一点很重要,人体因素应当被纳入设计,却不能由此推断任何“符合人体工效学”的算法都优于简单的基线。

支撑与姿势界定了实际动作条件后,还需要选择能够覆盖相应身体部位的负担指标。Consumed Endurance 将空中交互中的身体需求转化为可估算指标[23];后续累积疲劳模型进一步强调动作序列和恢复过程[24]。NICER 结合用力与恢复,对空中交互中主观疲劳的预测作出推进[25]。这条研究路线的优点是可以覆盖持续姿势及更大范围的上肢需求,而不只依靠单个电极检测的局部位置。

但模型输出与肌电实测不是同一种证据。基于关节力矩或运动学的模型依赖人体参数和任务假设;前臂臂环则直接记录局部电活动,却不能观察肩部。如果研究采用有支撑坐姿,其肩部负荷结构也与典型悬臂模型不同。可以把两类方法并列用于解释,但不能用一个模型的高相关系数证明某款臂环已完成疲劳测量效度验证。另外还需要注意,有些工作负荷的出现可能因为任务难度和任务场景设计而出现,而非人体本身在实现同等任务目标时需要付出同等的努力。

4.3. 视觉映射对用力感与控制感的影响

伪触觉重量研究利用视觉运动与真实动作之间的差异,改变用户对物体重量的感知[26]。后续研究讨论视觉增益、动态重量变化及运动学线索如何影响这种体验[27]-[30]。这为“操作映射不仅影响位置控制,还影响物体属性感知”提供了直接研究基础。

旋转相关的 Turn-It-Up 通过物理旋钮与显示映射探索感知阻力[31],而 RayFlex 利用远距离交互中的视觉形变增强重量反馈[32]。它们说明不同交互载体可以产生与阻力或重量有关的体验,但物理旋钮、射线和平面拖动的证据并不能直接替代徒手三维旋转实验证据。尤其是“感觉更重”不意味着设备施加了相同大小的真实阻力。

这种区别可以解释一种看似矛盾的结果:用户认为某种映射更费劲,但前臂肌电暴露没有增加。主观评价可能反映视觉运动不匹配、控制困难或预期阻力,而不只是肌肉活动。因此,研究需要分别提问局部用力、控制难度及物体重量感,不宜把三者只压缩成为一个“负担”的量化分数。

同时,感知属性的改变还会反馈到操作者对控制本身的判断。虽然 Sun 等在长距离与短距离物体移动任务中考察运动增益和控制感,提示任务尺度会影响映射评价[33],但是该研究中用户使用了控制器进行平移,并不是徒手旋转实验,因此其工作负荷评分的方向解释也需要区分看待。它更适合作为控制感依赖任务的邻近证据,不适合直接提供轴向旋转参数或充当唯一的量表依据。

运动缩放还可能改变身体体验。手部运动缩放研究能够考察可察觉性与具身感[34],虚拟手同步性研究则将视觉身体表现与感知疲劳联系起来[35]。这些研究提示,显示一只被缩放运动的虚拟手,与保持虚拟手真实运动、只改变物体运动,并不是同一种干预。研究必须说明究竟缩放了什么。

对于旋转增益,较容易解释的基础方案是保持虚拟手与真实手追踪一致,只改变对象的旋转映射。但这种方案也可能产生手物接触滑移或抓取关系不自然。如果改为同时缩放虚拟手,又引入身体所有感与视觉本体感觉冲突。不存在可以忽略这一问题的显示选择;应明确选择、统一各条件,并将控制感或自然性作为必要的检查指标。

4.4. 邻近增益证据的可迁移边界

双增益头部指向研究显示,快速接近目标与最后修正对增益的需求不同[12];HeadShift 也在头部输入领域探索了控制性能[36]。与鼠标相关的研究则更多的把增益与长时段肌肉活动、主观疲劳联系起来[11]。这些邻近成果共同支持“更高灵敏度未必始终更好”,但头颈、手指和前臂的生物力学约束不同,不能直接迁移到不同人体部位上适用。

因此,这些文献之间最有用的迁移单位是类似的机制,而不是各自的最佳数值。例如可以迁移“粗调和精调可能冲突”、“主观体验不一定与动作量同向”等假设;但是不能直接迁移具体增益阈值、耐受时间或机电变化比例。

5. 前臂负担的主客观测量框架

5.1. 肌电活动、累计暴露与疲劳

首先,肌肉电活动的信号经常被记录下来用于解释肌肉状态,通常以肌电幅值或其归一化指标来描述和解释;然后就是可以记录在一定任务时段内的累计肌电暴露,既受活动水平影响,也受持续时间影响;还有用户报告的局部用力、不适或疲劳感;另外还有随持续任务产生的疲劳过程,需要结合时间变化和任务条件判断和解释。这四者可以相关,却不是彼此的定义。

表面肌电受肌肉激活、肌纤维传导、组织及电极条件等不同要素共同影响。关于从表面肌电推断神经策略的方法研究,明确提示了信号解释的限制[37]。因此,肌电幅值不能够直接被解释成肌肉力,更不能未经校准地换算为焦耳单位以及直接量化单位意义上的能量消耗数值。有研究开展了自然手势定量分析研究,为比较不同交互活动提供了方法实例[38],但如果需要引用其中的能耗表述时,仍然需要保留其原有的模型及指标定义。

动态旋转中的幅值降低可能来自更短的动作、更低的稳定需求,也可能来自动作方式变化、接触变差或肌电通道位置改变。相反,幅值上升可能反映稳定性增加,并非必然说明已经发生疲劳,而涉及到动态、短时、间歇性任务时则尤其不适合直接套用持续等长收缩中的单一依据。

5.2. 暴露指标、归一化与采集质量

如果每个条件要求完成相同的虚拟目标,可以计算有效任务时段的平均归一化包络,以及包络对时间的积分,前者描述任务期间的平均电活动水平,后者描述完成一次任务的累计电活动暴露。两者回答不同问题:一个条件可能更快完成而平均幅值略高,也可能幅值较低却耗时更长。由于积分指标与完成时间存在数学联系,因此不能在积分降低后又把时间降低当作完全独立的生理证据,解释时应把平均幅值、时长和累计暴露放在一起。例如,如果积分下降而平均幅值不变,可以说完成同一任务的累计暴露减少;如果两者都下降,才能支持任务期间活动水平和累计暴露同时降低。两种结果都不自动等同于长期疲劳或损伤风险降低,是各自结果独立的解释。

多通道臂环可以逐通道报告,也可以形成预先定义的区域汇总。不能在看到结果后挑选变化最大的通道作为主要终点。如果使用平均值,要承认它会稀释局部峰值;如果使用最大通道,应处理通道选择和噪声敏感性。尤其是环形通道首先是电极位置,不可以在没有解剖定位验证时直接命名为八块独立肌肉,而且有时用户的个体差异和活动记录也会导致电极位置偏移无法完全固定。旋转中的稳定控制还可能依赖屈伸肌群的协同收缩:即使整体平均幅值变化很小,不同通道之间的共同激活模式也可能发生改变。因此,单一汇总值最好和通道模式、动作轨迹以及稳定阶段共同解释,而不应当独立解释机制结论。

肌电归一化综述指出,不同参考方法各有用途与限制[39]。最大随意收缩不是任何设备和任务下都自

动最优,而标准化参考动作也不能直接称为百分比 MVC。研究应选用安全、可重复且能够覆盖目标活动的参考程序,实验结论中应当如实报告测量方法、测量过程的细节、分母如何获得、重复几次以及何时重测等具体结果。

臂环佩戴位置、旋转方向、松紧、皮肤接触与重戴变化都会影响比较。对有多方向动作的实验,不能只用某一方向的动作作为“共同最大值”而不检查其他通道。更不能对每个正式条件分别归一化到其自身峰值,否则可能消除原本需要比较的条件差异。

采样率、实际时间戳、丢包、数字滤波和有效分析带宽应在数据采集前确认,因为设备标定的硬件能力并不等于当前 SDK 输出的信号质量。如果只能获得处理后的幅值,而没有可靠原始波形与采样时序,就无法承诺开展频谱疲劳分析。而对于以动作诱发的短时暴露为主要问题的研究,少而可靠的幅值指标实际可能是优于一组缺少质量保证的特征的。

在采集条件可靠之后,能否进一步把信号解释为疲劳,还需要取决于任务的结构。频谱下移及幅值变化常用于研究肌肉疲劳,但不同动作、肌肉和阶段中的表现并不一致。ICORR 的一项研究在重复负重动作中比较多种 EMG 特征,发现各特征识别变化的表现不同[40]。这一结果支持不要仅凭单一频率指标下结论,而不是证明某个特征在所有 VR 任务中都最可靠。

如果主要实验只有短时旋转试次,相对可以使用的术语是局部肌电活动或肌电暴露数值。如果要研究持续疲劳,则需要相应的累积负荷、恢复控制和时序分析,并避免把热身、学习、动作策略变化和电极漂移误认为疲劳。前者可以采用较快的实验,而后者则往往需要不同的任务结构设计。

5.3. 局部用力、总体工作负荷与主客观互证

Borg 量表体系为感知用力提供了基础[41],发展至今 Borg 量表也有多种类型的量表,例如 Borg CR10 和 Borg CR100 在量度上就有不同。如果研究关注前臂,应明确要求评价哪一侧、哪个部位、哪段任务中的用力程度,并选定具体版本。Borg CR10 与传统常见的其他量表不能混写,也不应自行改动锚点数值后还宣称采用原版标准量表,需要与官方验证过的量表保持完全一致才具备验证能力。

NASA-TLX 用于多维工作负荷评价,包含身体和心理相关维度[42]。它适合判断较高增益是否让控制更费心,但不能充当前臂肌电的直接主观替代。如果主要问题是局部身体需求,可将局部 Borg 评分作为主要主观指标,额外选用工作负荷或控制体验指标回答次要问题。保留 TLX 子维度含义,比只报告一个总分更有利于解释“省动作但难控制”的结果。

评分频率也会影响实验。每次短试次后填写完整问卷可能打断节奏并提供额外的临时性恢复;较长区组后才评分,又可能混合多个动作体验。量表与肌电应对应同一个可解释的时间窗口,问卷期间的休息也应纳入流程记录。

如果高增益同时降低累计肌电暴露和局部用力评分,可认为两类指标在该任务下方向一致。如果肌电降低但控制难度上升,则可能是身体运动成本减少、控制成本增加。如果肩部不适上升而前臂肌电下降,则可能存在代偿或测量范围外的负担转移。不能只保留符合预期的指标,也不能把不一致自动判为某种测量失效。

相关性应遵循数据层级。如果将所有被试、所有条件混在一起计算普通相关,可能把个体基线差异误当作条件内关系。重复测量相关提供了一种处理共同个体内关联的方法[43],混合效应模型则可以进一步纳入条件等因素。不过,相关不证明两种指标测量同一构念;存在相关也不能把主观评分用作肌电“真值”。

总体看来,主客观联合评估的价值在于解释不同的负荷来源怎样变化,而不是强求所有指标都显著下降,研究前应明确哪个指标回答主要问题,以及什么样的差异在结果和应用中需要被重点汇报和关注。

6. 证据综合与未来假说

6.1. 证据链与关键缺口

舒适度与测量精度的多目标优化已成为明确的研究主题。Wang 等建立手势舒适与测量精度模型，并讨论两者的协调[44]。该研究中的测量精度主要涉及视觉测量误差，并不等同于用户完成旋转对齐的终点误差。研究中共享了多目标权衡的思想，但研究对象、误差来源和生理证据并不相同。因此，只声称“兼顾精度和舒适”或“用肌电验证手势负担”，不足以形成明确的知识增量。更具体的研究贡献应来自尚未建立的条件关系，例如在相同任务、相同支撑和相同确认机制下，增益与轴向是否出现稳定交互，以及这种交互能否转化为比统一增益更有效的参数选择。

现有研究分别说明了旋转映射影响控制表现、动作方向影响身体需求、视觉映射影响感知、肌电可以描述局部活动，详见表 2。但这些结论往往来自不同任务、输入设备和测量方法，真正需要补充的是在同一受控手追踪任务内连接这些证据，而不是把它们串联后直接当作因果证明。由此形成的研究问题是：在坐姿有支撑的徒手旋转中，提高对象旋转增益后，任务精度与完成同一任务的前臂肌电暴露如何共同变化；这种变化是否因旋转方向而异？进一步的问题是，按轴选定参数的方法是否优于统一参数。此类问题具有明确条件和可检验结果，但其成立的依据是直接证据尚不充分，还可以开展更多相关研究。

Table 2. Contributions and boundaries of key studies to the current problem
表 2. 关键研究对当前问题的贡献与边界

文献	研究对象	可以支持的判断	不能直接推出的判断
Luong 等[1]	徒手与控制器	用力和表现取决于任务及输入	徒手天然更省力
Gao 等[3]	非同构旋转	映射收益依赖操作阶段与条件	高增益必然降低前臂 EMG
Mendes 等[5] [6]	自由度与变换轴	控制结构影响操作表现	约束收益就是增益收益
Wang 等[20]	特定人群上肢负荷	应关注部位和人群差异	健康年轻人结果可反向通用
Kartick 等[22]	舒适活动范围映射	个体活动范围值得考虑	个体化必然全面优于基线
Li 等[25]	累积用力与恢复	疲劳预测需要时间与恢复信息	等同于臂环局部生理测量
Samad 等[26]	伪触觉重量	视觉映射改变重量体验	感觉重等于真实肌肉力增加
Feick 等[31]	物理旋钮与显示	旋转映射可影响阻力感	可直接迁移到徒手三维旋转
Burden [39]	肌电归一化	参考方法决定比较含义	任意归一化都能称为 MVC
Kaifosh 等[45]	腕部肌电输入	肌电可以承载丰富交互信息	普通臂环可直接复现能力
Lakra 等[46]	长时段肌电识别	识别需考虑状态与手势差异	20 分钟是普适疲劳阈值
Wang 等[44]	舒适与测量精度模型	多目标权衡具有明确研究基础	已解决手追踪旋转轴向增益

6.2. 可检验的未来假说

前述证据并不足以预先断言某一虚拟轴应采用更高或更低的增益，因为虚拟坐标轴与解剖动作并非固定对应。更合适的推进方式，是在坐姿、有支撑、目标和确认规则一致的条件下检验以下三项假说。

假说 1 (非线性效率 - 负担权衡): 与一比一映射相比，中等对象旋转增益将减少完成同一虚拟目标所需的真实转角和累计前臂肌电暴露；当增益超过与任务精度相容的范围后，终点误差、修正次数或稳定

时间将增加。因此, 最优区域表现为非单调的帕累托权衡, 而不只是“增益越高越好”。

假说 2 (增益 $\times$ 轴向交互): 在目标角、支撑、起始姿势、坐标定义和确认机制相同的条件下, 增益对精度与累计肌电暴露的影响将在对象局部坐标的不同旋转轴之间存在差异。只有当交互效应稳定、且轴向参数在独立验证中优于统一增益时, 轴向差异化设置才可以获得支持。

假说 3 (主客观负荷部分分离): 增益引起的累计肌电暴露变化与主观工作负荷变化不会完全一致。真实动作幅度和任务时长将更多解释累计肌电暴露, 而修正负担、控制感和视觉-运动不匹配将更多解释 NASA-TLX 相关维度、控制难度或重量感。该关系应当采用重复测量相关或混合效应模型检验。

三项假说均保留明确的否定路径: 如果各轴在相近增益附近达到相同的可接受表现, 则统一增益可能已经足够; 如果肌电收益伴随不可接受的精度损失, 则该参数不具有应用优势; 如果差异主要来自离合减少、追踪失效或坐标实现错误, 则不能解释为前臂工效学规律。而且单轴筛选结果也不保证能迁移到自由三维旋转, 因此轴向参数的价值应由独立验证而非同一批数据内的最优拟合确认。

6.3. 应用场景与任务等价

非一比一增益适用于坐姿数字模型检查与编辑: 用户以较小的手部转动获得较大的模型转角, 用于查看零件背面、孔位或内部结构, 系统无需预知最终视角。实验中的标准姿态目标仅用于统一测量精度。轴向增益的价值应由实验验证; 若任务旨在训练真实拧转或工具操作, 增益可能破坏训练等价性。振动等工业环境因素也会影响手势表现和肌肉活动[47], 因此桌前实验结果不能直接推广至工业现场。

实验应在虚拟目标、容差、支撑、起始姿势和触发方式一致的条件下, 比较不同固定增益与旋转方向, 测量终点误差、完成时间、归一化肌电、累计肌电暴露和局部用力, 并记录真实转角、修正、离合及追踪异常。目标角不得与增益绑定; 增益范围应通过预实验确定, 虚拟手-对象映射、稳定确认、自动吸附和触发机制也须保持一致。若实际产品需要持续捏合, 还需单独验证其影响。

6.4. 验证原则与判据

参数选择应先规定可接受的精度条件, 再评估负担变化, 而不是挑选显著结果最多的一组。如果要汇报精度不受有意义的损害, 应事先确定有应用依据的容许差异, 不能用“不显著”替代等效性结论。样本量也应围绕主要比较及其不确定性规划, 不能把试次数当作独立被试数。重复测量分析需要保留被试层级, 重点检验增益、轴向及其交互, 并报告效应估计和区间。主客观关联是次要解释, 不可以在多次尝试后只呈现最佳相关。当采用轴向参数时, 独立验证的最低价值是确认筛选收益不是同一批噪声数据上的最优拟合。在验证基础关系的研究中, 实时识别、自适应算法和复杂场景并非必要组成部分; 信号可用性、时间同步、任务等价及姿势检查则不能省略。这些条件决定测得的究竟是增益作用, 还是设备与流程差异。

7. 结论与设计启示

7.1. 面向 VR 交互设计师的检查清单

如表 3 所述的问题用于在采用徒手旋转增益前判断任务适配性, 并把设计选择转换为可记录、可验证的条件, 但是仅作为建议, 并不能直接替代具体设备上的预实验与独立验证。

7.2. 结论

运动增益研究已经证明非一比一映射具有实用价值, 也揭示了运动效率、精细控制和体验之间的条件性权衡。空中手势与生理测量研究进一步表明, 方向、姿势、持续时间和恢复会改变身体需求。因此,

单凭动作变小、完成变快或主观觉得轻松，都不足以证明前臂疲劳得到改善。

Table 3. Interaction design checklist for freehand 3D rotation
表 3. 徒手三维旋转交互设计检查清单

检查问题	初步设计建议	需要记录或验证
任务是否要求高精度末端修正？	先确定可接受误差，再选择中等或分阶段增益；避免仅以速度最优。	终点误差、修正次数、稳定时间
系统是否知道目标姿态？	目标已知时才使用目标相关增益；自由检查优先固定、速度相关或轴向策略。	算法是否使用隐藏目标信息
旋转轴和起始姿势是否明确？	报告世界、物体或手部坐标系及更新规则；不要把虚拟轴直接等同于解剖动作。	实际转角、动作策略、代偿
用户是否有肘部或前臂支撑？	有支撑结论限于桌前坐姿；无支撑或站姿任务需增加肩部和上臂评估。	支撑位置、躯干和肩肘代偿
抓取或触发是否要求持续收缩？	研究增益效应时优先使用低持续收缩的触发方式；产品需要捏合时另行验证。	触发时长、误触发、基线肌电
虚拟手还是对象被缩放？	基础研究宜保持虚拟手接近一比一，仅改变对象映射，并报告接触或滑移规则。	控制感、自然度、接触异常
追踪和肌电采集是否稳定？	正式实验前独立标定；高增益条件尤其要记录丢帧、延迟、遮挡和电极重戴。	时间同步、丢包、滤波、有效带宽
需要回答哪一种负荷问题？	局部负担用归一化肌电与累计暴露、局部 Borg；总体工作负荷可用 NASA-TLX，但不能替代肌电。	指标定义、时间窗、效应估计与区间
真实动作是否属于训练目标？	如果训练真实拧转或工具动作，不应默认动作节省有益；数字模型检查与编辑更适配增益。	任务等价性与应用边界
参数选择与性能证明是否独立？	用预实验筛选范围，在独立试次或样本中验证统一与轴向参数。	预注册判据、等效界限、独立验证

对徒手三维旋转而言，当前直接证据的不足集中在同一任务内的跨层连接：增益如何同时影响精度、局部肌电暴露和感知用力，以及这种关系是否随轴向变化。肌电臂环可作为独立测量工具，手追踪继续承担输入与虚拟手显示；在以增益效应为核心的问题中，这种分工有助于建立可解释的因果比较。

应用意义应落在允许运动映射改变的具体工作中，例如坐姿数字零件查看与编辑，而不是泛指所有装配训练。最终有价值的成果可以是一组经验证的轴向参数，也可以是统一增益已经足够、某些轴不宜放大或某种收益以精度损失为代价的边界。而可靠的设计原则来自说明何时有效、为何有效以及何时不适用，而不是预先承诺全面降低负担，可能会违背任务和场景本身的应用目的。

因此，未来设计与评价不应把“高增益”“低肌电”或“低主观负担”视为单独充分的优化目标。更稳健的结论应同时满足任务等价、测量有效、统计层级正确和应用边界明确，并说明收益来自真实动作减少、控制过程改变还是负担转移。本文提出的分析框架、可检验假说和设计检查清单，为这一跨层验证提供了可直接实施的研究路径。

参考文献

[1] Luong, T., Cheng, Y.F., Möbus, M., Fender, A. and Holz, C. (2023) Controllers or Bare Hands? A Controlled Evaluation

- of Input Techniques on Interaction Performance and Exertion in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **29**, 4633-4643. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2023.3320211>
- [2] Poupyrev, I., Weghorst, S. and Fels, S. (2000) Non-Isomorphic 3D Rotational Techniques. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, The Hague, 1-6 April 2000, 540-547. <https://doi.org/10.1145/332040.332497>
 - [3] Gao, Z., Wang, H., Lv, H., Wang, M. and Qi, Y. (2022) Evaluating the Effects of Non-Isomorphic Rotation on 3D Manipulation Tasks in Mixed Reality Simulation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **28**, 1261-1273. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2020.3010247>
 - [4] Liu, X., Wang, L., Luan, S., Shi, X. and Liu, X. (2022) Distant Object Manipulation with Adaptive Gains in Virtual Reality. 2022 *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 17-21 October 2022, Singapore, 739-747. <https://doi.org/10.1109/ismar55827.2022.00092>
 - [5] Mendes, D., Relvas, F., Ferreira, A. and Jorge, J. (2016) The Benefits of DOF Separation in Mid-Air 3D Object Manipulation. *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, Munich, 2-4 November 2016, 261-268. <https://doi.org/10.1145/2993369.2993396>
 - [6] Mendes, D., Sousa, M., Lorena, R., Ferreira, A. and Jorge, J. (2017) Using Custom Transformation Axes for Mid-Air Manipulation of 3D Virtual Objects. *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Gothenburg, 8-10 November 2017, 1-8. <https://doi.org/10.1145/3139131.3139157>
 - [7] Rodrigues, F., Giovannelli, A., Pavanatto, L., Miao, H., Oliveira, J.C.D. and Bowman, D.A. (2023) AMP-IT and WIS-DOM: Improving 3D Manipulation for High-Precision Tasks in Virtual Reality. 2023 *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Sydney, 16-20 October 2023, 303-311. <https://doi.org/10.1109/ismar59233.2023.00045>
 - [8] Zhai, S.M., Milgram, P. and Rastogi, A. (1997) Anisotropic Human Performance in Six Degree-of-Freedom Tracking: An Evaluation of Three-Dimensional Display and Control Interfaces. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, **27**, 518-528. <https://doi.org/10.1109/3468.594917>
 - [9] Zhang, L., Sun, X., Su, P., Li, J., Chang, Y., Gao, Y., et al. (2025) Physiological Characteristics of Forearm Muscles during Different Movement Patterns of Wrist. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **38**, Article No. 141. <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01296-6>
 - [10] Ikeda, K., Kaneoka, K., Matsunaga, N., Ikumi, A., Yamazaki, M. and Yoshii, Y. (2025) Effects of Forearm Rotation on Wrist Flexor and Extensor Muscle Activities. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **20**, Article No. 53. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-05363-x>
 - [11] Ren, Y., Gou, B., Chen, R., Gan, Y., Wang, M., Jiang, A., et al. (2025) Effects of Computer Mouse Control-Display Gain on Upper Extremity Muscle Fatigue, Subjective Fatigue and User Performance. *WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation*, **82**, 1058-1073. <https://doi.org/10.1177/10519815251351849>
 - [12] Deng, C., Sun, L., Zhou, C. and Kuai, S. (2023) Dual-Gain Mode of Head-Gaze Interaction Improves the Efficiency of Object Positioning in a 3D Virtual Environment. *International Journal of Human—Computer Interaction*, **40**, 2067-2082. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2223861>
 - [13] Gao, Z., Lyu, X., Ge, A. and Wang, H. (2023) The Influence of Clutching Mechanism on Object Manipulation Tasks in Virtual Environments. *International Journal of Human—Computer Interaction*, **40**, 4454-4464. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2227830>
 - [14] Kim, S. and Lee, G. (2023) Virtual Trackball on VR Controller: Evaluation of 3D Rotation Methods in Virtual Reality. *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Hamburg, 23-28 April 2023, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3544549.3585682>
 - [15] Yu, D., Cibulskis, M., Mortensen, E.S., Christensen, M.S. and Bergström, J. (2024). Metrics of Motor Learning for Analyzing Movement Mapping in Virtual Reality. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Honolulu, 11-16 May 2024, 1-18. <https://doi.org/10.1145/3613904.3642354>
 - [16] Abdikarim, D., Di Luca, M., Aves, P., Maaroufi, M., Yeo, S., Miall, R.C., et al. (2023) A Methodological Framework to Assess the Accuracy of Virtual Reality Hand-Tracking Systems: A Case Study with the Meta Quest 2. *Behavior Research Methods*, **56**, 1052-1063. <https://doi.org/10.3758/s13428-022-02051-8>
 - [17] Mangalam, M., Oruganti, S., Buckingham, G. and Borst, C.W. (2024) Enhancing Hand-Object Interactions in Virtual Reality for Precision Manual Tasks. *Virtual Reality*, **28**, Article No. 166. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-01055-3>
 - [18] Huang, J., Qi, M., Mao, L., An, M., Ji, T. and Han, R. (2021) User-Defined Gestures for Mid-Air Interaction: A Comparison of Upper Limb Muscle Activity, Wrist Kinematics, and Subjective Preference. *International Journal of Human—Computer Interaction*, **37**, 1516-1537. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898825>
 - [19] Son, M., Jung, J. and Park, W. (2017) Evaluating the Utility of Two Gestural Discomfort Evaluation Methods. *PLOS ONE*, **12**, e0176123. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176123>

- [20] Wang, Y., Wang, W., Bao, D. and Luo, Z. (2021) Research on the Physiological Load of Interactive Gesture in Elderly Based on SEMG. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, **3**, 186-198. <https://doi.org/10.1007/s42486-021-00060-8>
- [21] Hou, W., Wu, C. and Chen, X. (2017) The Research of Wearable Device User Fatigue Based on Gesture Interaction. In: Kurosu, M., Eds., *Human-Computer Interaction*, Springer, 172-182. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58077-7_14
- [22] Kartick, P., Uribe-Quevedo, A. and Rojas, D. (2023) Piecewise: A Non-Isomorphic 3D Manipulation Technique That Factors Upper-Limb Ergonomics. *Virtual Worlds*, **2**, 144-161. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds2020009>
- [23] Hincapié-Ramos, J.D., Guo, X., Moghadasian, P. and Irani, P. (2014) Consumed Endurance. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Toronto, 26 April-1 May 2014, 1063-1072. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557130>
- [24] Jang, S., Stuerzlinger, W., Ambike, S. and Ramani, K. (2017) Modeling Cumulative Arm Fatigue in Mid-Air Interaction Based on Perceived Exertion and Kinetics of Arm Motion. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver, 6-11 May 2017, 3328-3339. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025523>
- [25] Li, Y., Tag, B., Dai, S.Z., et al. (2024) NICER: A New and Improved Consumed Endurance and Recovery Metric to Quantify Muscle Fatigue of Mid-Air Interactions. arXiv: 2406.08875.
- [26] Samad, M., Gatti, E., Hermes, A., Benko, H. and Parise, C. (2019) Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects by Manipulating Control-Display Ratio. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Glasgow, 4-9 May 2019, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300550>
- [27] Moosavi, M.S., Raimbaud, P., Guillet, C. and Mérienne, F. (2024) Enhancing Weight Perception in Virtual Reality: An Analysis of Kinematic Features. *Virtual Reality*, **28**, Article No. 72. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00948-7>
- [28] Moosavi, M.S., Raimbaud, P., Guillet, C., Plouzeau, J. and Merienne, F. (2023) Weight Perception Analysis Using Pseudo-Haptic Feedback Based on Physical Work Evaluation. *Frontiers in Virtual Reality*, **4**, Article 973083. <https://doi.org/10.3389/frvir.2023.973083>
- [29] Chen, Y. and Yang, X. (2023) Can Manipulating Control-Display Ratio Dynamically Really Work in Changing Pseudo-Haptic Weight? *Computer Animation and Virtual Worlds*, **35**, e2205. <https://doi.org/10.1002/cav.2205>
- [30] Stellmacher, C., Pujianto, F.I., Kojic, T., Voigt-Antons, J. and Schöning, J. (2024) Experiencing Dynamic Weight Changes in Virtual Reality through Pseudo-Haptics and Vibrotactile Feedback. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Honolulu, 11-16 May 2024, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3613904.3642552>
- [31] Feick, M., Zenner, A., Ariza, O., Tang, A., Biyikli, C. and Krüger, A. (2023) Turn-It-Up: Rendering Resistance for Knobs in Virtual Reality through Undetectable Pseudo-Haptics. *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, San Francisco, 29 October-1 November 2023, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3586183.3606787>
- [32] Wei, Y., Zhang, S., Shi, R., Fong, S., Hui, P. and Liang, H. (2026) RayFlex: Inducing Weight Perception through Raycast Pseudo-Haptics in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **32**, 4081-4091. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2026.3679883>
- [33] Sun, W., Huang, M., Luo, W., Wang, L. and Yang, R. (2023) Feeling of Control Evaluation: Movement Gain for Virtual Object Manipulation in Virtual Reality. *2023 9th International Conference on Virtual Reality (ICVR)*, Xianyang, 12-14 May 2023, 428-434. <https://doi.org/10.1109/icvr57957.2023.10169169>
- [34] Feng, X., Okamoto, S. and Hara, M. (2026) Perception and Embodiment for Motion-Scaled Virtual Hands. *Virtual Worlds*, **5**, Article 29. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds5030029>
- [35] Reynaert, V., Rekik, Y., Berthaut, F. and Grisoni, L. (2023) The Effect of Hands Synchronicity on Users Perceived Arms Fatigue in Virtual Reality Environment. *International Journal of Human-Computer Studies*, **178**, Article ID: 103092. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103092>
- [36] Wang, H., Sidenmark, L., Weidner, F., Newn, J. and Gellersen, H. (2024) HeadShift: Head Pointing with Dynamic Control-Display Gain. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, **32**, 1-28. <https://doi.org/10.1145/3689434>
- [37] Farina, D., Merletti, R. and Enoka, R.M. (2004) The Extraction of Neural Strategies from the Surface EMG. *Journal of Applied Physiology*, **96**, 1486-1495. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01070.2003>
- [38] Ma, F., Song, F., Liu, Y. and Niu, J. (2020) Quantitative Analysis on the Interaction Fatigue of Natural Gestures. *IEEE Access*, **8**, 190797-190811. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3031967>
- [39] Burden, A. (2010) How Should We Normalize Electromyograms Obtained from Healthy Participants? What We Have Learned from over 25years of Research. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, **20**, 1023-1035. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.07.004>
- [40] Aghamohammadi-Sereshki, A., Bayazi, M.D., Ghomsheh, F.T. and Amirabdollahian, F. (2019) Investigation of Fatigue Using Different EMG Features. *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, Toronto,

- 24-28 June 2019, 115-120. <https://doi.org/10.1109/icorr.2019.8779402>
- [41] BORG, G.A.V. (1982) Psychophysical Bases of Perceived Exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **14**, 377-381. <https://doi.org/10.1249/00005768-198205000-00012>
- [42] Hart Sandra, G. and Staveland Lowell, E. (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. Human Mental Workload. *Advances in Psychology*, **52**, 139-183.
- [43] Bakdash, J.Z. and Marusich, L.R. (2017) Repeated Measures Correlation. *Frontiers in Psychology*, **8**, Article 456. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00456>
- [44] Wang, W., Hou, Y., Tian, S., Qin, X., Zheng, C., Wang, L., *et al.* (2023) The Comfort and Measurement Precision-Based Multi-Objective Optimization Method for Gesture Interaction. *Bioengineering*, **10**, Article 1191. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10101191>
- [45] Kaifosh, P., Reardon, T.R., Allen, B.D., Anderson, C., Arnoud, S., Arora, R., *et al.* (2025) A Generic Non-Invasive Neuromotor Interface for Human-Computer Interaction. *Nature*, **645**, 702-711. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09255-w>
- [46] Lakra, K., Garg, C., Jain, P., Jyotirmay, R. and Singh, P. (2025) Rethinking Gesture Recognition: Toward Fatigue-Aware SEMG Gesture Recognition for VR Interaction. *Proceedings of the 2025 31st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Montreal, 12-14 November 2025, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3756884.3766042>
- [47] Tao, D., Luo, W., Wu, Y., Yang, K., Wang, H. and Qu, X. (2024) Ergonomic Assessment of Mid-Air Interaction and Device-Assisted Interactions under Vibration Environments Based on Task Performance, Muscle Activity and User Perceptions. *International Journal of Human-Computer Studies*, **192**, Article ID: 103364. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103364>