arXiv:2302.02803v4 [cs.HC] 6 Mar 2024

再也不要跳过腿部训练日：在虚拟现实运动游戏中通过垂直跳跃进行下肢训练

Sebastian Cmentowski*高性能计算 杜伊斯堡-埃森大学 杜伊斯堡，德国
sebastian.cmentwoski@uni-due.de

Sukran Karaosmanoglu* 人机交互 汉堡大学 汉堡，德国
s ukran.karaosmanoglu@uni-hamburg.de

Lennart E. Nacke HCI Games Group & 斯特拉特福德交互设计与商业学院 滑铁卢大学 滑铁卢，加拿大
lennart.nacke@acm.org

Frank Steinicke 人机交互 汉堡大学 汉堡，德国
frank.steinicke@uni-hamburg.de

Jens Krüger 高性能计算 杜伊斯堡-埃森大学 杜伊斯堡，德国
jens.krueger@uni-due.de

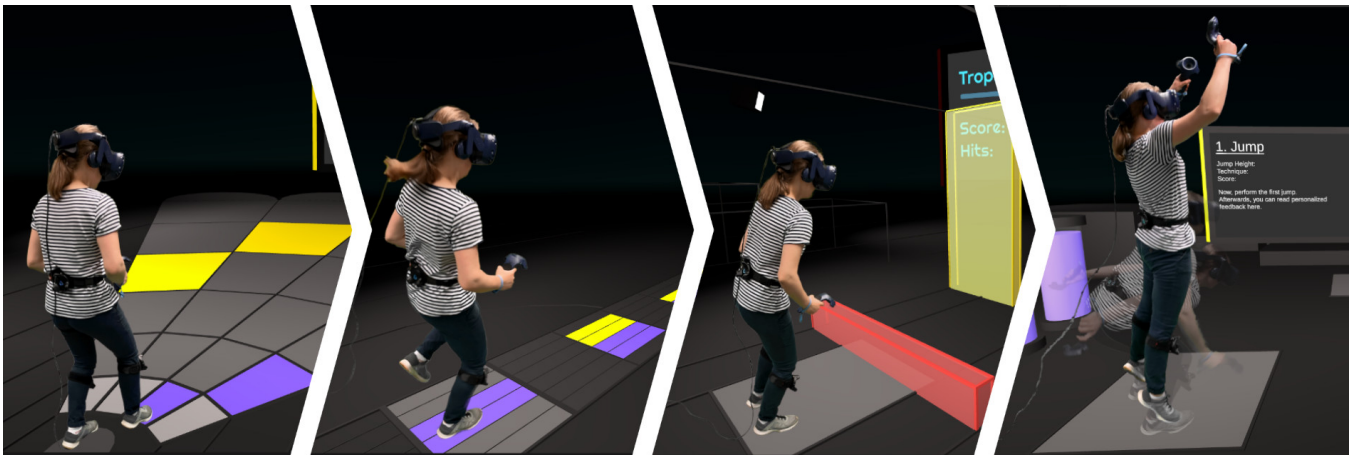


图1：使用我们的运动游戏 *JumpExTra VR* 展示基于VR的全身训练：在前三个关卡中（从左至右），玩家进行各种动作，包括点按、跳跃和跳跃训练，以训练下肢协调性、稳定性和耐力。最后，右侧图中展示了一名进行最大垂直跳训练的玩家。

摘要

虚拟现实（VR）运动游戏能够提升身体活动的参与度和动机。大多数虚拟现实运动游戏侧重于上肢，因为许多VR装置只能追踪用户的头部和双手。要成为现有锻炼项目的有力替代方案，虚拟现实运动游戏还必须提供均衡的锻炼，并训练下肢。为解决这一问题，我们构建了一款专注于垂直跳训练的运动游戏，以探索全身运动应用。为打造安全且有效的训练方案，九名领域专家参与了我们的原型设计。我们的混合方法研究证实，以跳跃为核心的练习提供了值得挑战和积极的玩家体验，表明玩家可能长期留存。基于我们的研究发现，我们提出五项设计启示，以指导未来工作：避免意外的向前漂移，考虑技术约束，解决全身虚拟现实健身游戏中的安全问题，将节奏元素与流畅动作模式相结合，并根据玩家的体能进展状态调整难度。

CCS 概念

• 以人为中心的计算 → 虚拟现实；人机交互实证研究；• 软件及其工程 → 交互式游戏。

关键词

虚拟现实、VR、运动游戏、垂直跳跃、训练、体育、健康、动态难度、严肃游戏

ACM 参考文献格式：
Sebastian Cmentowski、SukranKaraosmanoglu、Lennart E. Nacke、Frank Steinicke 和 Jens Krüger。2023年。再也不要跳过腿部训练日：下肢训练

*两位作者对本研究的贡献相同。

CHI '23，*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡©2023年版权归所有者/作者所有。出版权已授权给 ACM。这是作者版本的作品，仅供个人使用。请勿再分发。最终版本发表于*2023*年*CHI*计算机系统人为因素会议论文集（*CHI '23*），*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡，https://doi.org/10.1145/3544548.3580973。

在*2023*年*CHI*计算机系统人为因素会议论文集（*CHI '23*），*2023*年*4*月*23–28*日，德国汉堡。ACM，美国纽约州纽约市，18页。
https://doi.org/10.1145/3544548.3580973

1 引言

规律的体育锻炼对我们的身心健康至关重要。体育活动不仅能提升我们的整体体能，还能延缓自然衰老过程 [43]，甚至有益于大脑的认知功能 [114]。然而，由于身体活动会给身体带来较大负担，许多人在缺乏激励的情况下，会犹豫是否要转向积极生活方式并养成持久的锻炼习惯 [30, 49]。除了同伴支持或健身追踪器等常见方法外，运动游戏——"结果主要由体力消耗决定的数字游戏*[]*，其结果*[.....]*主要由体力消耗决定" [108]——承诺通过提供引人入胜的体验来激励用户。在虚拟现实（VR）领域，健身游戏是最畅销的游戏类型之一，也是促使用户购买头显的重要原因 [51]。其优势显而易见：价格实惠的移动虚拟现实头戴设备搭配手持控制器，让玩家足不出户，就能将令人愉悦的游戏活动与有益健康的体育锻炼结合起来。

Beat Saber[1] [52] 或 FitXR [47] 等运动游戏的玩法主要依靠头部和手部动作，同时也包含一些下肢动作。虽然也有一些虚拟现实应用旨在支持全身锻炼（例如 OhShape [83] 和 VRWork- out [139]），但大多数应用只会间接运用下肢动作，例如要求玩家躲避障碍物。使用默认的 VR 设备配置，即通过头戴式设备和控制器进行追踪，无需 Vive Trackers 等额外硬件，就能轻松实现这类锻炼。因此，这些运动游戏的训练效果主要体现在心血管改善和上肢健身方面。结果是，玩家无法充分获得均衡全身活动带来的益处，例如协调能力、稳定性和平衡能力的提升 [5, 115, 123]。此外，只训练个别肌肉群最终可能导致肌肉失衡，进而造成不良姿势 [20, 75] 并增加损伤风险 [36, 124]。最后，下肢锻炼以及步行、跑步或跳跃等身体活动在我们的社会中至关重要，因为普通人一天中的大部分时间都坐着，身体活动不足 [138]。为了让虚拟现实运动游戏成为更有价值的运动环境，必须改变其传统上侧重手部动作的玩法，将下肢活动纳入其中。目前，我们尚不清楚虚拟现实运动游戏是否与健身课程或私人训练同样有效，但短期研究表明，运动游戏能极大地激发锻炼动机 [15, 46, 93, 97]。不过，我们注意到，长期运动游戏研究对用户依从性的结果并不一致 [121, 130]。

遗憾的是，在虚拟现实运动游戏中使用下肢或全身动作会带来诸多挑战。这些锻炼更容易出现迅速或不稳定的动作，可能导致危险的碰撞。跑步或跳跃等爆发性动作可能受到追踪稳定性不足的影响， [67, 142], 进而损害玩家体验。全身动作比简单动作更复杂，因此需要专业知识才能安全训练，也比 BeatSaber 中的简单摆臂 [52] 更容易造成损伤或动作执行不当。更重要的是，现有的设计指南和最佳实践主要针对非VR健身游戏中的体育锻炼和动作 [96, 106, 107]。

我们的研究遵循领域专家的反馈，开发了一款全身VR健身游戏，以填补这一知识空白。我们聚焦于一个特定用例：使用虚拟现实体感游戏训练人们的垂直跳跃表现。选择垂直跳跃练习作为全身动作，原因如下：跳跃是人类的一项基础动作，不仅是篮球 [37] 或排球 [119], 等多种体育运动所必需的，也可用于评估一般体能 [55], 、身体成分 [17], 和功能表现 [100]。垂直跳跃是适合本研究的核心动作，同时也颇具挑战性。它们也能在当前 VR头显的追踪区域内完成。与此同时，垂直跳跃是一种爆发性很强的动作，对追踪稳定性提出了挑战。最后，通过多种训练方式可以改善跳跃表现，还可以将跳跃与其他动作结合起来，带来丰富多样的锻炼体验。

我们主要关注通过训练提升一般体能和动机。为此，我们对来自不同领域（如体育研究或《物理治疗》）的专家进行了半结构化访谈。我们讨论了主题分析所揭示的基于虚拟现实的跳跃训练的潜在益处与挑战，并为制定游戏化训练方案提供指导。基于这些见解，我们开发了一款用于垂直跳跃训练的虚拟现实体感游戏。在设计过程中，我们严格遵循专家的建议。具体而言，我们的运动游戏由难度逐渐提升的四个关卡组成，以预防损伤并促进学习过程（见图 1）。

在工作的第二阶段，我们探究用户如何看待我们的健身游戏原型，以及能从中为未来的设计和研究项目得出哪些启示。首先，我们与25名参与者开展了一项探索性研究，以评估用户对这一新训练体验的看法。结果证实，以跳跃为核心的练习带来了恰当的挑战，并创造了积极的玩家体验。研究还揭示了当前 VR 系统的技术局限，参与者也提出了大量改进训练体验的建议。随后，我们将这些见解提炼为设计启示和经验教训。

在设计启示中，我们首先讨论潜在的安全问题。在我们的案例中，频繁地原地跳跃常常会导致玩家在不知不觉中向前移动——即意外向前漂移——最终使玩家离开预定的游戏区域。因此，我们建议特别注意避免危险碰撞，尤其是在使用向前跳跃等非静止移动时。

接下来，我们探讨当前 VR 系统的技术局限所带来的设计启示。硬件追踪器滑脱以及追踪精度不足，影响了我们个性化跳跃反馈的准确率。因此，我们建议让用户能够进行自我纠正（例如，通过回放其动作），并通过自动反馈为这一过程提供支持。

最后，我们将讨论如何基于自身的努力，提供愉悦的游戏体验并提高可重复游玩性，从而得出设计启示。最重要的是，参与者称赞了使用我们的运动游戏 *JumpExTra VR* 进行跳跃训练的体验。我们还将讨论如何实现

[1]我们指出，Beat Saber 是一款 VR节奏游戏。不过，有些用户会将这款游戏用于锻炼，它也一直是运动游戏研究的对象 [4, 125]。

自然流畅的动作序列，例如不同模式（如“行走风格”）是否合适，或是否应安排频繁的休息时段。我们强调，难度应与玩家的能力及其进步相匹配。尤其是，初学者会受益于自动调整难度。

本研究的主要贡献包括：(1) 通过与领域专家开展半结构式访谈，确定虚拟现实跳跃训练的益处与要求；(2) 设计并开发用于训练垂直跳跃的虚拟现实体感游戏原型：*JumpExTra VR*；(3) 开展探索性研究，评估该运动游戏作为训练工具的可行性；(4) 总结开发全身虚拟现实体感游戏的一系列设计指南与经验教训。

我们的探索性运动游戏研究及由此提出的五项设计指南（修复意外向前漂移、考虑技术约束、缓解安全问题、利用流畅动作模式融入节奏元素、根据玩家的体能水平调整难度）是创建更安全、更具参与感的虚拟现实训练环境的第一步。我们的研究结果有助于玩家借助沉浸式技术，在狭小空间内高效训练，同时避免受伤风险。我们认为，这代表了技术增强型体育锻炼的一种可能未来。

2 相关工作

我们的运动游戏设计基于两种领域知识来源：以往研究和专家访谈。因此，我们将介绍基于虚拟现实的训练、垂直跳跃相关的生物力学基础，并概述跳跃训练、虚拟现实中的跳跃以及一般运动游戏的相关研究。

2.1 虚拟现实训练

利用沉浸式体验进行训练具有独特优势，能够帮助用户有效评估并提升个人表现 [23, 131]。尤其是在目标地点进行体育训练较为困难或危险时，例如飞行员 [57] 或消防员 [122],，虚拟现实应用可提供一种便捷的替代方案 [69]。近年来，基于虚拟现实的训练已成功应用于许多领域，包括医疗保健 [95],、医学 [3], 和导航 [99]。在体育运动领域，研究项目利用虚拟现实分析运动表现 [11, 34]，并了解运动及感知技能 [29, 35, 44, 143]。此外，虚拟现实适用于训练动作模式，例如高尔夫挥杆 [73] 或舞蹈动作 [42],，也能提升手眼协调能力（例如乒乓球 [103],、飞镖 [127], 或杂耍 [84]）。同样，虚拟现实训练也能帮助中风或脑瘫患者康复 [31, 77, 105]。

除了提升动机，虚拟体验也有益于体育训练。与传统计算机应用相比，虚拟现实能够以沉浸式方式展示正确的动作模式，从而促进观察学习 [126]。对于体育运动而言，立体信息对于触发正确的运动反应至关重要 [89, 141]。此外，移动头显也能让用户轻松监测自身表现 [110]。在设备可用性方面，虚拟现实应用在一定程度上可以免去对专用运动器材、专门训练环境或锻炼伙伴的需求 [103]。自适应训练方案 [41] 和个性化反馈能够提升个人收益，并可作为专业教练的补充 [76]。尽管虚拟现实应用有这些优势，其在体育训练中的有效性仍是一个有待研究的领域。研究表明，虚拟现实对完成特定练习有积极影响，但这种效果未必能迁移到实际活动中 [7, 85]。在某些应用场景中，虚拟现实训练能够提升现实世界技能 [13, 25, 102],，但在其他场景中却未必能带来同样的收益 [79]，甚至可能导致表现下降 [128]。

2.2 跳跃

跳跃是人类在幼年时期学会的一项基本运动技能，并会在一生中不断提高。虽然大多数人在日常生活中并不经常跳跃，但跳跃常用于体育运动、体能训练和康复。特别是，跳跃能够很好地反映一个人的一般体能水平 [55],、功能表现 [100], 和肌肉组成 [17]。除了篮球等需要频繁跳跃的典型体育运动之外，跳跃还用于康复，以评估病理状况的变化 [58, 59] 并预测个人的损伤风险 [27]。除了对运动表现的积极效应 [22, 118],，跳跃训练也有益于日常活动和职业任务 [9, 80]。

2.2.1 垂直跳跃的组成与执行。跳跃是一种“需要肌间协调的复杂多关节动态运动” [116]，其典型执行时间不足 4 秒 [132]。文献区分了多种跳跃类型 [14],，包括蹲跳、下落跳 [66], 或反向跳。本文聚焦于最后一种类型。反向跳通常从直立站姿开始 [21],，随后身体短暂下沉，再通过爆发性伸展身体并将双臂沿向前上方的弧线摆动，产生向上的冲力 [62]。

跳跃会对下肢的关节和组织施加较大负荷，增加受伤风险（例如，前交叉韧带（ACL）撕裂 [117]，这是由落地过硬或姿势不正确导致垂直地面反作用力（vGRF）过高所引起的 [60]）。正确的指导有助于运动员立即降低 vGRF [120] [101], [39]。其他风险因素，例如运动员的关节刚度和成熟度 [86],，则无法通过正确的动作姿势轻易消除。

2.2.2 跳跃测试。测量一个人的跳跃高度并非易事。专业运动员和研究人员通常依赖动作捕捉系统 [8, 10, 87] 或专门的垂直跳测试 [78]。最古老的技术之一是站在墙边起跳，并分别标记站立时和起跳时能够触及的最高点。然后，可以根据两点之间的差值计算有效跳跃高度 [68]。虽然这种摸高测试遵循简单的原理，但它也会分散运动员的注意力并限制摆臂，从而很容易降低表现。另一种方法是在测力台上起跳，并根据运动员的滞空时间计算跳跃高度 [17]。然而，运动员很容易通过屈曲双腿来延迟地面接触，从而扭曲结果 [78]。相比之下，通过测量运动员质心的垂直位移，可以获得最精确的结果 [132]。因此，我们的虚拟现实应用可以利用安装在用户髋部的硬件追踪器，轻松且舒适地测量精确的跳跃高度。

2.2.3 跳跃训练。 提高跳跃高度的关键在于增加运动员的起跳速度。训练通常集中于提高伸肌的力量和收缩速度 [82]，因为下肢的最大动态力和力量发展率（RFD）与最终跳跃高度直接相关 [12, 135]。时机恰当的摆臂 [24], 、良好的神经肌肉控制（能够以最小延迟启动关节伸展） [65], 以及具有最佳深蹲深度的反向动作 [53]，均已被证明能够显著提高跳跃高度。

事实证明，多种训练方式有助于取得持久的训练效果。首先，增强式训练 [2],（如下落跳或交替腿跨跳） [48], 可以改善肌肉的牵张-缩短周期（SSC），主要有益于涉及快速向心收缩和高强度离心收缩的活动 [94]。增强式训练对跳跃表现的积极效应已得到广泛研究 [14, 91]，其提升幅度因运动员的熟练程度而异，介于 5% 至 35% 之间 [116]。或者，运动员可以通过大负荷负重训练 [136] 来提高最大动态力量 [50]，也可以使用轻负荷进行爆发性动作训练 [92]。对于跳跃训练，研究报告称，采用轻负荷和高速度可取得最佳效果，提升幅度为 2% 至 25% [116]。有些肌肉（如髋关节伸肌）只有在最大跳跃中才会得到最大程度的运用。要取得最佳训练效果，应通过最大跳跃来训练表现 [87]。

2.3 在虚拟现实和运动游戏中的跳跃

虚拟现实和混合现实中的跳跃也一直是其他研究项目的研究主题。先前文献从移动 [56, 90, 137], 运动游戏 [45, 67, 70, 88] 或训练 [32]的角度探讨了跳跃。Wolf 等人 [137] 提出了一种增强型运动技术，用户通过实体垂直跳跃，在虚拟现实中实现超现实前跳。他们的研究结果表明，超现实跳跃能够提升用户体验的某些因素（例如沉浸感）。一项近期研究 [32] 展示了虚拟现实跳跃训练原型，玩家通过跳跃并获得关于其表现的反馈。

虚拟现实运动游戏是虚拟现实游戏社区中最受欢迎的游戏类型之一（例如 Beat Saber [52]），研究表明，与非头戴式虚拟现实运动游戏相比，这类游戏能够激发更强的动机 [15]。尽管使用虚拟现实运动游戏可能存在一些缺点（例如晕动症 [125]），我们仍将这类游戏视为一种机遇，因为无论身处何地或健康状况如何，它们都能提供有趣的身体活动和训练的可及性 [72, 81]。尽管先前研究也涉及了采用全身训练的运动游戏 [67, 70, 98]，并探讨了全身动作识别 [26], ，但许多论文具体聚焦于上肢练习 [16, 71, 72]。虽然在某些情况下，这种侧重或许更可取（例如出于安全性考虑 [72]），全身训练能够锻炼更多肌肉结构，而且至今尚未得到广泛探索 [98]。

许多论文探讨了运动游戏的设计空间，并为设计师、开发者和研究人员提供了启示 [96, 106, 107]。

然而，据我们所知，这些设计指南并未专门针对虚拟现实运动游戏。Márquez Segura等人 [96] 在设计"身体游戏"时，考虑了技术、社交和身体因素。他们的方法主要侧重于理解游戏相关的社交和身体因素，并据此利用技术为用户提供支持。此外，Mueller和Isbister [106] 为基于运动的游戏提出了十条全面的指南，例如：（i）利用追踪误差；（ii）融入节奏元素；（iii）在基于运动的游戏玩法中合理运用风险元素。类似地，Mueller等人[107] 为体力活动游戏，即运动游戏，提出了五条设计建议：（i）让玩家轻松上手；（ii）设定短期可实现的目标，以维持长期动机；（iii）考虑玩家各自的技能水平；（iv）提供表现反馈；（v）通过社交游戏提升动机。虽然这些指南对一般的基于运动的游戏很有帮助，但全身参与的虚拟现实运动游戏可能还具有额外优势（例如，虚拟现实运动游戏能带来更高的动机 [15]），或面临需要关注的挑战（例如，佩戴头戴式设备）。

多位研究人员在其游戏中运用了跳跃。Finkelstein等人 [45] 为自闭症儿童设计了一款基于CAVE的运动游戏，*AstroJumper*。在游戏中，玩家通过跳跃躲避物体；针对神经典型玩家的初步研究结果表明，他们获得了积极的体验。Kajastila等人 [70]考察了三种条件对玩家学习蹦床技能的影响。作者发现，与自主训练条件相比，玩家在游戏条件下（使用夸张跳跃和不使用夸张跳跃的混合现实蹦床游戏）参与度更高，但无论处于何种条件，玩家的表现都有所提升。类似地，另一项研究 [88] 设计了一款多人混合现实蹦床游戏，并开展了实地研究。结果表明，玩家体验积极（例如自主性和身体活动愉悦）。许多基于跳跃的运动游戏侧重于玩家体验，而非通过虚拟现实运动游戏为跳跃提供结构化体能训练。本文在先前研究 [32] 的基础上，设计并检验了一款详尽的跳跃训练虚拟现实运动游戏 *JumpExTra VR*，并邀请领域专家参与这一过程。

3 专家访谈的主题分析

与先前文献不同，我们的研究不只关注职业运动员及其运动表现训练，还着重探讨玩家锻炼的动机。我们通过半结构式访谈，收集了体育和医学领域专家的信息，以设计并实现*JumpExTra VR*（见图 2）。经过内部讨论，第一作者拟定了访谈问题，并为受访者选定了专业领域，例如运动医学医生和教练。基于这些决定，他们选出了几位专家，并通过电子邮件邀请他们参与本研究。我们邀请了来自不同领域（即体育研究、物理治疗和训练）的九位专家参加访谈。鉴于领域多样，第一作者大致遵循了最初的访谈指南（列于补充材料中），但偶尔会偏离这些问题，以适应专家各自的专业特长。访谈使用视频会议工具以德语进行，平均时长为 42.4 分钟。

为准备访谈数据以供分析，我们使用 Dove- tail [40] 软件进行转录。第一作者之一检查了这些转录文本，纠正错误并删去不必要的细节。随后，

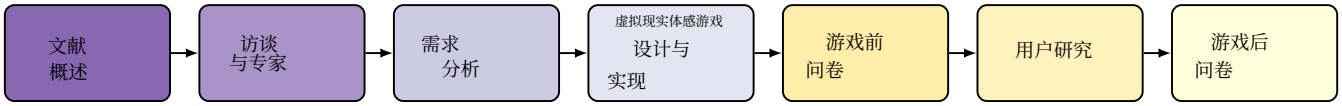


图 2：本研究项目采用的设计流程：我们回顾了文献，与多位专家进行了半结构式访谈，分析了虚拟现实跳跃训练应用的需求，设计并实现了虚拟现实体感游戏，并开展用户研究以检验*JumpExTra VR*。

这些文本使用 DeepL Pro [38] 翻译成英文，之后再次检查是否存在错误。为了分析访谈数据，我们结合了主题分析中反思式方法和编码手册方法的特点 [18, 19]。分析开始前，第一作者确定了与研究问题相关的演绎类别：动作执行、跳跃的重要性、跳跃的安全性和跳跃训练。随后，两位作者分别以小组为单位，对访谈内容进行独立的归纳编码，并在这些类别下使用描述性编码（例如"反向跳时手臂的正确动作执行""落地是造成损伤的主要原因"以及"短期改进很少"）。每组包含两次访谈，最后一组包含三次访谈。每组访谈结束后，第一作者会面讨论编码上的差异，以及双方对数据的理解。这个过程促成了编码的创建、完善、合并或剔除。最后一组访谈结束后，前两位作者根据这些编码绘制亲和图，形成初步主题。最后，他们在多次会议中讨论并调整亲和图及这些主题，从而形成以下四个主题。

3.1 主题 1：跳跃主要用于体育运动，并对整体健康有诸多益处。

无论是在日常生活还是体育活动中，我们都会跳跃。不过，实际的动作形式取决于具体情境，正如"*[...]* 我们去超市购物时不会经常跳跃，可能更多是走路。当然，日常生活中也会遇到需要跳下来的情况"***(E3)***。相反，跳跃大多**融入复合动作中**。例如，跳跃可能与向前或侧向移动结合，以躲避障碍物。尤其是在体育运动中，跳跃大多融入更复杂的动作模式中，例如排球中的拦网跳跃。

我们进行跳跃训练，是因为它对整体健康有多种益处。跳跃动作会激活多种肌肉结构，让我们能够一次锻炼所有这些肌肉。此外，跳跃还能帮助提升诸如**协调能力**等基本的人类技能。要做好跳跃，需要跳跃者"*[.....]* 协调手臂的发力与腿部的发力 *[.....]*"***(E2)***。一位物理治疗师强调了跳跃对于**伤害预防**的重要性，并举例说明跳跃如何发挥作用："如果我是一个缺乏训练的人，绊到路缘时就可能扭伤脚踝。但如果我经过了跳跃训练*]*，并且 *[*因此*]* 能够迅速激活肌肉，我或许就能及时稳定身体，避免这类意外发生"***(E6)***。尽管跳跃训练有助于预防损伤，但它很少应用于康复，因为健康保险通常只涵盖"最基本的必要项目"***(E6)***。通过跳跃，可以降低某些身体健康问题的风险，例如"骨质疏松症"***(E2)***，还可以降低。值得注意的是，跳跃实际上可能有助于刺激骨密度降低的老年人骨骼再生。然而，跳跃也可能存在危险，因为"他们可能还没有足够的稳定性来稳住自己并避免摔倒"***(E5)***。因此，大多数专家认为，通常不宜为老年人安排跳跃训练。具体而言，一位专家指出，应考虑采用其他方式来获得类似益处："那么，跳跃是否真的有意义？还是说，举例而言，使用更多力量训练器械也能达到类似效果？"***(E2)***。

总的来说，我们主要将跳跃用于**检验、训练和体育比赛**。首先，跳跃是检验人们表现的良好手段，也能为理解"*[...]* 力量发展率，也就是我能多快地产生力量，而跳跃能很好地体现这一点"奠定基础***(E1)***。不过，跳跃的主要应用场景还是实际比赛。尤其是在篮球和排球等某些体育运动中，跳跃可能是决定比赛胜负的关键部分。例如，一位接受采访的篮球教练指出，良好的跳跃表现能为某些玩家带来改变比赛局势的优势："跳跃力量本身在篮球运动中尤为重要，因为必要时，你可以通过它在一定程度上弥补身材上的劣势"***(E7)***。最后，在训练中运用跳跃，例如用于排球训练，有助于提升抗疲劳能力："经常练习且跳跃训练有素的人，在跳跃很多次后，仍能更长时间保持跳跃高度，之后才会有所下降"***(E1)***。

3.2 主题 2：跳跃训练结合反应性练习和力量练习。最大跳跃动作执行不当会导致损伤。

领域专家对于如何最好地训练以提升跳跃表现，常常给出显而易见的答案："通过跳跃"***(E1)***。然而，除了这一显而易见的说法之外，明确各项练习的目标也至关重要：提升跳跃力量所需的训练理念，与着重练习跳跃技术的训练理念有所不同。

跳跃力量主要取决于肌肉力量发展率。因此，可以通过多种训练方式加以提升。尤其是，**爆发性动作** 和**速度型练习** 特别有效。一位受访的篮球教练描述了他们经常进行的一种典型反应性训练："我们把几个 *[*箱子*]* 前后排成一排，然后双腿并拢在那里进行弹跳训练。双脚始终踩在箱子上，然后继续向前，向上、向下、向上、向下，就这样穿过整个体育馆"***(E7)***。此外，针对肌肉提举能力的练习，例如传统力量训练，也能提高整体跳跃高度。专家还建议**将跳跃训练与其他体育锻炼结合起来**，并加入"不同的变化形式"***(E2)***，因为跳跃通常不会孤立进行。遗憾的是，

由于肌肉质量和构成的变化通常需要数周时间，因此不能指望短期内取得改进：“通常至少需要*4*到*8*周，才能真正从肌肉层面或显微层面证明有所变化”*(E5)*。

尽管小幅跳跃通常不会造成问题，但大多数专家一致认为，最大垂直跳是一种高度复杂且容易出错的动作。因此，最大跳跃训练的首要目标应是**正确执行**。鉴于所采用的跳跃技术多种多样，我们特别询问了专家，反向纵跳结合摆臂时应如何正确执行。通常，运动员以直立、双脚与肩同宽的站姿开始。快速下蹲后，运动员爆发性地伸展身体。双臂沿向上的弧线摆动，并在脚离地前大约胸部高度处停止：“如果我想尽可能跳高，实际上必须在肩部高度处、并在恰当的时机减慢双臂”*(E2)*。尽管总体动作流程如此，个体体型和运动情境仍可能导致执行方式有所不同，例如，臀肌过于薄弱时，运动员就无法蹲得足够低。

大多数专家认为，跳跃后的**落地** 是**损伤**的主要诱因。膝关节运动尤其值得关注。膝盖应始终保持在脚踝与髋部之间的一条直线上。然而，高冲击力会导致膝盖向内塌陷。这种膝外翻姿势十分危险，会给膝盖及周围韧带造成极大压力。除了肌肉组织发育薄弱之外，性别差异也会导致这一状况，因为女性通常更容易出现膝外翻：“这也有解剖学方面的原因，部分与女性的髋部位置有关”*(E2)*。最后，既往伤病会增加跳跃时再次发生意外的风险。除了错误的落地动作外，专家主要将**运动环境** 视为重要的损伤因素，并建议使用垫子作为保护措施。与肌肉方面的变化不同，跳跃动作的改进很快就能实现，但难以量化。一位专家提议，将落地时的膝关节偏移作为衡量改进情况的一种方法。

3.3 主题3：跳跃训练应循序渐进，并考虑个体差异、目标和改进。

与一般身体活动不同，训练始终以**目标为导向**，由能够提供足够刺激、促使身体进步（例如肌肉增长）的练习组成。然而，受访专家强调，应谨慎权衡训练强度、重复次数和恢复时间，以最大限度地促进改进并避免损伤。对于没有定期锻炼的初学者，应特别注意。例如，“如果他们不习惯，*[*他们的膝盖和脚踝*]* 就很容易出现规避性动作”*(E5)*。

由于受伤风险主要取决于关节活动范围，训练应**从简单的练习开始**，例如小幅跳跃，然后逐渐增加难度。这样做还有另一个好处：许多专家一致认为，小幅跳跃通常是安全的，无需事先热身。相比之下，进行高强度或较长时间的训练前，应先做一些热身动作，例如小幅跳跃，以防止肌肉拉伤。一位研究重点是特殊需求人群的专家建议，甚至可以从简单的步伐开始，让应用更适合有协调和平衡问题的用户：“所以，在真正开始跳跃之前，先跨过一个障碍物。有时用右脚，有时用左脚，以此促进平衡”*(E9)*。

除了根据用户能力和体能水平**调整训练难度**之外，专家还强调了**提供恰当反馈**的重要性。引导用户并帮助他们建立能力，对于获得可持续的训练效果至关重要。一位受访的体育教学专家指出，录下用户动作的好处在于，“这样 *[*他们*]* 就能看到自己的跳跃动作，从而形成自己的动作映像”*(E3)*。将这种内在学习与外在反馈相结合，对持续改进尤其有帮助。此外，专家建议优先关注重复情境，以便用户将所获心得运用到后续动作中。

3.4 主题4：虚拟现实跳跃训练可以提供实时反馈并增强动机，但虚拟现实的安全性可能存在问题。

总体而言，所有专家都认为，使用虚拟现实进行跳跃训练既有潜在益处，也面临挑战。首先，虚拟现实和增强现实的一大优势是能够提供可直接应用的**实时反馈**。此外，虽然有些专家建议使用镜子或视频录像向用户展示他们的动作，但很多人并不喜欢看自己。在这种情况下，回放自己跳跃的视频甚至可能适得其反：“当然，回放一段自己动作没做好的视频一点帮助也没有”*(E3)*。虚拟现实可以通过引入额外的抽象层，帮助避免这类可能使人感到疏离的影响。例如，用户可以看到一个通用虚拟化身回放自己的跳跃动作。

此外，虚拟现实运动游戏能够通过改善情绪、减轻压力并提升用户**训练动机**，促进心理健康。尤其是一位专家指出，游戏化锻炼或许能提供同伴支持等同样强大的激励，并且效果胜过可穿戴设备，因为“健身追踪器 *[...]* 即使能带来改变，效果也只能维持很短时间”*(E4)*。然而，正如我们从《Pokémon Go》等热门增强现实（AR）运动游戏中看到的那样，用户的兴趣可能会随着时间推移而减退。

最后，专家对基于虚拟现实的跳跃训练的**安全性** 提出了担忧。例如，虚拟世界中的反馈与身体动作不一致，可能会导致晕动症，甚至引发危险情况。因此，必须在设计流程的早期考虑潜在问题，因为“如果 *[...]* 跌倒风险更大，或者不知为何感到不适的可能性超过了我所获得的益处，那就立刻成了一个问题”*(E1)*。最后，一位专家对是否应使用虚拟现实测量跳跃高度表示怀疑，因为可能有更经济且更精确的方法。

4 运动游戏：JUMPEXTRAVR

基于专家访谈中的见解，我们使用Unity游戏引擎 [129] 设计了一款虚拟现实体感游戏，用于训练垂直跳跃。我们的首要目标是通过游戏化的方式激励玩家锻炼（即借助游戏的吸引力来激发动力）。不过，我们也希望避免造成任何损伤（即游戏过程中可能出现的损伤，

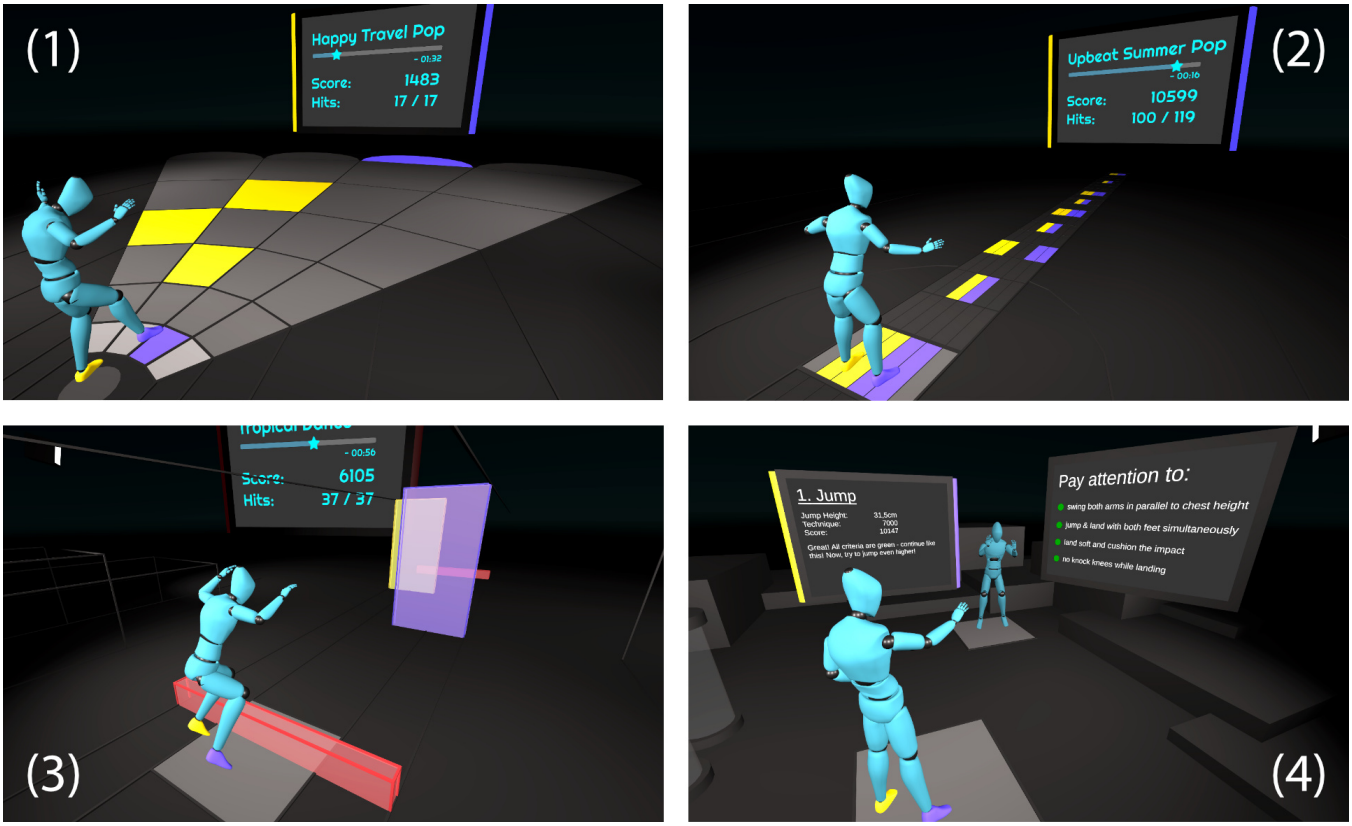


图 3：我们的运动游戏 *JumpExTra VR* 包含四个依次进行的关卡。第一关中，玩家用脚踩彩色方块。第二关是 Hopscotch 跳房子游戏。第三关中，玩家躲避障碍物。最后一关中，玩家训练最大垂直跳，并获得个性化反馈。

例如因跌倒而伤到身体某个部位），或让玩家感到沮丧。因此，我们让游戏玩法与玩家的能力相匹配，并提供反馈，帮助他们改善跳跃。

实现基于跳跃的运动游戏面临的首要挑战，是追踪全身动作，因为大多数 VR 系统只使用头戴式显示器和追踪控制器。在设计过程中，我们尝试了多种方法，例如使用 Kinect 2 for Windows [104]。然而，跳跃时延迟较高且追踪质量较差，因此无标记动作捕捉并不适合我们的使用场景。我们最终选择使用 Vive Pro [63]，并将 Vive Trackers [64] 安装在玩家的小腿胫骨部位和腰部。虽然我们最初的首选是追踪玩家的脚，但先导测试表明，将追踪器放在小腿胫骨部位能显著提升追踪准确性和舒适度。我们将控制器和头戴式设备也计算在内，总共使用六个追踪点，通过逆向运动学为虚拟化身制作动画。

4.1 节奏关卡

许多专家强调，应逐步提高难度，先从小幅跳跃开始，再尝试更高的跳跃。这种设计不仅能让玩家为强度更高的环节做好准备，也可作为热身。与最大跳跃相比，小幅跳跃造成损伤的风险微乎其微。一位专注于特殊需求群体的专家提出了一个顾虑：有些玩家可能完全不适合跳跃，因为一个人进行跳跃的频率主要取决于其锻炼习惯。这位专家建议先从步伐和平衡练习开始，再逐步进行跳跃和幅度更大的跳跃。我们的目标是设计一种无论玩家先前经验如何，都能让所有人乐在其中的体验，因此我们将游戏设计为四个循序渐进的关卡：先进行轻点操作，再逐步增加强度，依次加入跳跃、小幅跳跃，最后是最大垂直跳（见图 3）。

前三个关卡的结构相似，玩家的动作与歌曲节拍相对应。文献 [106] 建议采用这类节奏性动作，而一些最知名的虚拟现实游戏（如 Beat Saber [52] 和 Ragnaröck [133]）也已成功运用这种设计。虽然我们的应用中每个关卡都配有不同的歌曲，但时长都约为两分钟，节奏为每分钟 128 拍。开始行动前，玩家会收到每个关卡的简短介绍，并须正确完成每种相关动作。关卡进行期间，背景屏幕会显示歌曲进度和玩家表现，表现以成功击中次数及据此计算的得分来衡量。此外，游戏会在关卡之间的休息时间提供激励性反馈。

为了兼顾个体差异和体能水平，我们设置了三个难度等级，各等级所需动作的数量和复杂程度有所不同。游戏从最低难度开始；如果玩家的准确率至少达到 90%，游戏便会自动且不易察觉地切换到更高难度；如果玩家漏掉最近音符中超过 40%，则会切换到较低难度。通过这一设计，我们希望确保游戏能为所有玩家带来挑战，同时避免造成挫败感。具体而言，游戏应确保玩家至少成功完成一半动作，从而体验到成功感。反之，如果玩家没有受到挑战，且大多数交互都能成功完成，游戏就应提高难度。最终，我们的目标是将平均命中率控制在 60% 至 90% 之间。通过这种自适应难度，我们确保大多数玩家都能取得高分，从而提升他们的动机和置信感。

第*1*关：随节拍敲击。 在第一关（时长01:54分钟）中，黄色和紫色方块沿着四条相邻轨道向玩家移动。当方块到达前线时，玩家必须用正确的脚敲击它们——黄色方块需用左脚，紫色方块则对应右脚。敲击后，玩家必须收回脚，因为他们不能同时用双脚进入游戏区域。随着歌曲进行，动作模式会变得更加复杂，要求玩家快速切换左右脚或交叉敲击。在最低难度下，游戏中有110个方块，而最高难度下则有135个。本关主要用于热身，并训练玩家的下肢协调性、稳定性和反应时间。

第*2*关：跳房子。 第二关（时长01:56分钟）在第一关的基础上加入了小幅跳跃。与儿童玩的跳房子游戏类似，玩家必须用左脚、右脚或双脚跳到正确的方块上。不过，这些跳跃是在原地完成的，时机是移动中的方块到达玩家所在位置时。方块沿着五条重叠轨道移动，其中一条或两条会亮起黄色或紫色，以指示应使用的脚。两次跳跃之间，玩家必须保持最后的姿势，例如单腿站立，直到另一个方块到达他们面前。在设计阶段，我们发现，长时间单腿站立以及单双腿之间快速切换都极具挑战性，而且常常与音乐节奏不合。因此，我们主要采用较慢的双腿跳跃模式，或较快的单腿“行走式”模式。与前一关相同，动作会随时间推移变得更加复杂，并更多地利用外侧轨道，迫使玩家左右移动。根据难度等级，玩家需要完成108至129次跳跃。第二关以已训练的平衡能力和稳定性为基础。此外，玩家必须把握好跳跃时机，在方块亮起时落到方块上。这一设计还能进一步训练协调能力和神经肌肉控制。

第*3*关：*Obstacle Course*。最后一个基于歌曲的关卡（时长：02:08 分钟）遵循的原则与前两个关卡不同。这一次，障碍物会在每小节的第一个节拍到来时向玩家逼近。玩家必须避免身体碰到这些障碍，才能获得分数。最常见的障碍是低墙，玩家必须跳到中等高度才能越过。正如领域专家强调的，多样化训练和动态练习十分重要，因此我们在需要跳过的障碍之间穿插了两侧的侧向墙体，以及从天花板悬挂下来的障碍栏。这些障碍会迫使玩家横向移动并在再次跳跃前下蹲。此关总共有 65 个障碍，其中 24 个是跳跃栏杆。由于个人身高差异可能造成不公平的劣势，我们会在校准时根据玩家的身高调整低墙和高墙的高度。此外，三个难度等级只影响障碍物的大小，不影响其出现频率。因此，难度越高，玩家就必须跳得越高。第三关主要锻炼肌肉力量和耐力，同时为玩家准备最后一个包含最大垂直跳的关卡。

4.2 最大垂直跳跃

在训练好实现良好跳跃所需的基础能力——一般体能、平衡和协调能力——之后，最后一个关卡将重点教玩家正确的跳跃技术。关卡开始时，玩家会在简短的介绍中观看一段示范跳跃动作。接下来，玩家需要完成最大垂直跳，并根据以下四项评判标准，获得有关自身表现的个性化反馈。游戏会持续记录玩家的动作。检测到跳跃后，系统便会根据领域专家提到的安全高效跳跃的四项标准分析这些数据：

（1）双脚同时起跳、同时落地；（2）轻柔落地（前脚掌先触地），并用全身缓冲冲击力；（3）尤其在落地时，膝盖应保持在脚与髋部之间的一条直线上，不要向内塌陷；（4）双臂同步向前上方摆动，直至约胸部高度。

分析其中大多数标准（例如手臂和腿部动作的同步性）并不困难，只需将位置差异与预先校准的阈值进行比较即可。然而，由于我们不会直接追踪玩家的脚，因此判断玩家的落地方式更具挑战性。落地过程转瞬即逝，追踪系统的红外同步速度无法精确捕捉。相较之下，Vive Trackers 只能依靠精度较低的加速度计。我们利用 Vive 系统的这一追踪局限为己所用：如果玩家落地过重，且没有通过脚和腿缓冲冲击力，小腿追踪器测得的位置就会短暂地降至地面以下。这种垂直位移与落地冲击力直接相关——落地越轻柔，位移就越小，反之亦然。因此，我们的算法可以利用这一追踪误差作为判断玩家落地质量的指标。此外，我们还设置了偏移值，避免因追踪精度不足而将上述因素的轻微偏差判定为违规。完成一次跳跃后，玩家会在一个屏幕上看到自己在四个类别中的表现，并在另一个屏幕上收到一条个性化信息。该信息总结了他们相较上一次跳跃的进步、这次跳跃中表现最差的评判标准，以及下一轮如何改进的实用指导。此外，我们还会在玩家面前循环回放上一次跳跃，让他们能够仔细观察自己的动作。多位专家认为，将外在指导与通过跳跃可视化获得内在反馈的机会结合起来，极具价值。

除了提供个性化指导外，我们还根据技术标准和有效跳跃高度计算跳跃评分，以反映玩家的表现。该值与跳跃高度一起，

显示在高分榜上，让玩家了解自己每次跳跃的改进情况。玩家总共连续跳跃五次，并尝试将上一轮的反馈融入下一次跳跃中。最后一次跳跃结束后，游戏也随之结束。

5 评估

设计完我们的运动游戏 *JumpExTra VR* 后，我们开展了一项探索性用户研究，以了解用户如何看待这种新颖的训练体验。本研究的首要目标是确认我们的原型能够带来愉悦的用户体验，同时不会引起身体不适或危及玩家。由于玩家在整个体验过程中始终待在原地，我们确信该应用不太可能引发晕动症。此外，我们还关注游戏的可用性、吸引力和反馈如何影响玩家的整体游戏体验。

除了这些感知因素，我们还希望探索这款运动游戏对玩家的动机和身体效应。首先，根据专家的反馈，我们认为它能改善玩家的情绪。此外，我们希望玩家觉得游戏中的体育锻炼具有挑战性，但又不会因此感到沮丧或过度疲劳。因此，我们关注玩家在各个关卡中的表现，以及他们认为此类基于运动游戏的跳跃训练未来有哪些发展潜力。考虑到开展这项探索性研究的这些动机，我们采用了多种方法，包括前测和后测问卷、游戏表现数据和定性反馈，以回答以下研究问题：

- 研究问题1：我们的运动游戏会如何影响玩家的晕动症症状?
- 研究问题2：我们的运动游戏会如何影响玩家的情绪?
- 研究问题3：玩家如何评价我们运动游戏的玩家体验及其作为训练工具的可用性?
- 研究问题4：玩家如何看待自己在我们的运动游戏中的身体活动和表现?

5.1 前后测问卷

这些问卷在游戏前后施测。为回答研究问题1，我们使用了德语版模拟器晕动症问卷（SSQ）[74] [61]。该问卷通过16个条目测量三个子类别，即恶心、眼动障碍和定向障碍，采用4点评分。为回答研究问题2，我们使用德语版多维情绪问卷（MMQ）[134],中的精力和效价子类别评估玩家的情绪；该问卷包含四个双极条目，采用7点李克特量表（范围为0至6）。

5.2 后测问卷

为了测量总体游戏体验以回答研究问题3（RQ3），我们采用了德语版《玩家体验量表》[1, 54]中的多个子类别：掌控感、沉浸感、进度反馈、视听吸引力、挑战、操作便捷性、目标清晰度和愉悦感（7点李克特量表，范围为−3至3）。此外，为回答研究问题4（RQ4），我们采用了身体活动愉悦量表（PACES-8）[109]，该量表包含8个两极项目，采用7点李克特量表评分（范围为1至7）。PACES-8的德语项目翻译由一名研究人员提供，该研究人员曾在另一项研究中使用过这一量表。

5.3 游戏表现指标

由于我们希望了解玩家在运动游戏中的表现，以回答研究问题4（RQ4），因此记录了所有参与者的必要表现数据。对于三个节奏关卡中的每一个，我们都记录了动态难度变化和命中率，即成功完成的步伐、跳跃以及跨越障碍物的跳跃次数。此外，我们还收集了最终关卡中每次跳跃的跳跃高度，以及其在四项跳跃标准中的表现。

5.4 定性反馈

我们通过开放式问题收集了玩家的定性反馈，以了解他们体验 *JumpExTra VR*的感受。在这些问题中，我们特别关注了四个主题：风险与益处、安全性与可用性、长期参与以及改进。我们使用以下开放式问题，了解玩家对这些方面的看法：

- “在您看来，这款 *VR* 游戏对您而言有哪些风险与益处？为什么？”
- “在 *VR* 游戏过程中，您是否遇到过影响安全性和可用性的问题？为什么？”
- “如果你可以继续使用这款虚拟现实游戏，你认为这会如何影响你长期参与跳跃训练？为什么？”[2]
- “考虑到你玩过的这款虚拟现实游戏，你希望改变哪些方面，又希望保留哪些方面？为什么？”

6 结果

本研究招募了25名参与者（15名女性、10名男性，M=24，标准差=6.01岁）。其中20人此前有过虚拟现实体验，但只有两人表示经常使用虚拟现实（每月1至2次）。其余参与者中，12人很少使用虚拟现实设备（每年1至2次），剩下的人此前仅体验过一至两次。被问及锻炼习惯时，只有两名参与者表示没有锻炼。其余参与者中，有10人最多每月锻炼一至两次。11人表示至少每周锻炼一次，另有两人每天训练。此外，参与者对身体锻炼愉悦感的总体评价略偏正面（M=1.24，标准差=1.45，范围为-3至3）。

在了解我们的研究目标并签署知情同意书后，参与者完成了问卷的第一部分，内容包括人口统计信息、游戏前模拟器晕动症问卷和情绪评估。完成后，我们向参与者介绍了 Vive Pro VR头显 [63]，并协助他们将 Vive Trackers [64] 安装在小腿胫骨部位和腰部。启动游戏后，参与者接受了操作控制介绍，并在开始体验四个关卡前校准了自己的虚拟化身。体验结束后，他们完成了体验后问卷，并回答了开放式问题。研究平均耗时 35 分钟。

[2]这个问题旨在了解参与者对长期使用这款运动游戏的态度，但我们注意到，这并不能作为人们实际上会继续玩这款游戏的证据。

表 1：该表展示了前测和后测 SSQ 与 MMQ 的描述性统计结果及统计检验结果（* 表示具有显著性）。

问卷	前测问卷 *Mean*	前测问卷 *SD*	后测问卷 *Mean*	后测问卷 *SD*	统计 Test	*P* 值	效应 Size	置信区间（.95）
SSQ 总分	15.41	13.41	21.09	14.76	*t(24)*=-1.71	0.100	*d* =-0.34	[-12.533, 1.163]
SSQ-恶心。	15.26	11.02	33.58	17.44	*V* =4.5	<0.001*	*r* =-0.55	[-28.620, -14.310]
SSQ-眼动不适	15.77	16.80	11.82	14.19	*V* =72.5	0.220	*r* =-0.17	[-7.580, 22.740]
SSQ-总不适。	6.12	12.76	7.80	13.38	*V* =11	0.170	*r* =-0.19	[-13.920, 13.920]
MMQ-精力。	3.6	1.35	4.1	1.61	*t(24)*=-1.50	0.146	*d* =-0.30	[-1.187, 0.187]
MMQ-效价。	4.6	1.24	4.2	1.55	*V* =112	0.092	*r* =-0.24	[-0.000，1.250]

表2：该表展示了 PXI 和 PACES-8 问卷的描述性统计值：玩家的玩家体验和身体活动愉悦感总体较高。

PXI-愉悦 *Mean*	PXI-愉悦 *SD*	PXI-掌握 *Mean*	PXI-掌握 *SD*	PXI-imm *Mean*	PXI-imm *SD*	PXI-pro.费用 *Mean*	PXI-pro.费用 *SD*	PXI-aud.应用 *Mean*	PXI-aud.应用 *SD*	PXI-cha。 *Mean*	PXI-cha。 *SD*	PXI-eas。 *Mean*	PXI-eas。 *SD*	PXI-cla。 *Mean*	PXI-cla。 *SD*	PACES-8 *Mean*	PACES-8 *SD*
1.95	0.79	0.93	1.19	2.03	0.75	1.6	0.88	1.33	0.98	1.71	0.80	1.99	0.84	2.2	0.93	5.44	0.91

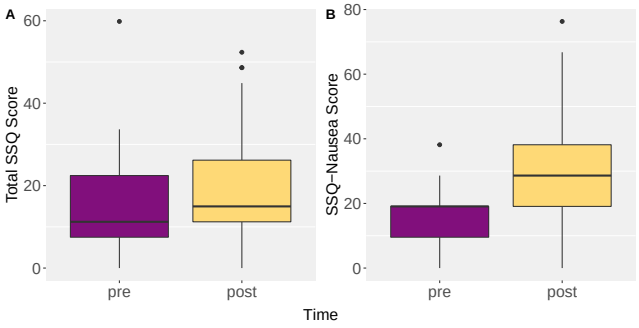


图4：尽管参与者在前后时间点的SSQ总分没有显著差异，但后测SSQ恶心评分显著高于游戏前的SSQ恶心评分。

6.1 前后测问卷

我们进行了夏皮罗-威尔克检验，以检验数据的正态性假设。当数据呈正态分布时，我们采用配对 t 检验，并使用 Cohen 的*d*报告效应量。对于非正态分布的数据，我们采用威尔科克森符号秩检验，并报告 *r*（皮尔逊相关系数）作为效应量指标。我们遵循 Cohen [33] 的建议来解释这些效应量。表 1 列出了统计检验的结果，以及每份问卷及其子类别的描述性统计信息。

Wilcoxon 符号秩检验显示，参与者游戏后的恶心评分显著高于游戏前，V=4.5，p<0.001，见图4b。然而，SSQ 总分及 SSQ 的其他子类别在前测与后测值之间均未显示显著差异。

由于运动的性质，人们往往会出汗。虽然出汗可能是晕动症的症状，但在我们的案例中，它更可能是训练期间体力消耗的效应 [6]。因此，我们还在排除出汗条目后进行了 SSQ 分析。由于该条目仅用于计算 SSQ 总分和 SSQ 恶心类别，我们仅报告这两项的分析结果。前测（M=12.42，SD=13.30）与后测（M=12.42，SD=13.73）的 SSQ 总分没有显著差异，$t(24)$=0，p=1，d=0。同样，玩家的恶心评分在前测（M=7.63，SD=9.54）和后测（M=11.45，SD=13.49）之间也没有显著差异，$t(24)$=-1.29，p=0.211，d=-0.26。

MMQ 的活力子量表和效价子量表在游戏前后的得分均未显示显著差异。

6.2 后测问卷

表2报告了仅作为游戏后测量而施测的问卷描述性数值。结果表明，所有测量指标的评分均呈正向趋势。尽管大多数构念反映出高度积极的体验，但 PXI 精通子类别显示，玩家并未感受到自己在游戏中拥有特别强的掌控感。

6.3 游戏表现

对于前三个关卡，我们记录参与者的命中率，作为主要表现指标。在游戏设计过程中加入动态难度调整后，我们的目标是将总体成功率控制在 60% 至 90% 之间。三个关卡均达成了这一目标：*Tap to the Beat*（M=78.4%，标准差=15.8）、*Hopscotch*（M=69.6%，标准差=15.4）和 *Obstacle Course*（M=85.1%，标准差 =8.6）。参与者平均有 41.77% 的时间处于中等难度（标准差=23.63），其次是最高难度（M=35.33%，标准差=25.11）和最低难度（M=22.88%，标准差=19.33）。

参与者在最终水平的五次跳跃中，跳跃高度基本没有提升。平均高度大致保持不变，从第一轮的38.28cm（标准差=9.12）到

最后一次执行时的37.66cm（标准差=9.10）。不过，参与者在五次跳跃中的技术评分略有提高，平均评分从71.45%（标准差=17.18）升至75.45%（标准差=15.30）。

最后，我们还记录了游戏向玩家提供反馈的频率。尽管这些数据纯粹是描述性的，但能很好地展现我们的系统如何响应玩家的动作。总体而言，在62%的跳跃中，游戏提醒参与者在落地时注意正确的膝关节运动。其次是落地过重，这一问题出现在26%的情况下。最后，在20%的跳跃中，摆臂幅度过大；在8%的跳跃中，摆臂未能完全平行。相比之下，起跳和落地时足部动作不同步并不是问题。

6.4 定性反馈

我们通过开放式问题收集了定性数据。在分析之前，我们使用 DeepL Pro [38] 将数据翻译成英文，并由一位第一作者检查是否存在错误。之后，我们使用 Dovetail 工具对数据进行编码 [40]。

其中一位第一作者采用反思性主题分析方法对这些数据进行了分析 [18, 19]。在分析之前，该作者确定了四个演绎类别：风险与益处、安全性与可用性、参与和改进。作者使用归纳编码（例如"受伤风险""运动机会的可及性""站立区域应得到改进"）对这些类别下的访谈数据进行编码。完成这一步后，他们开展了亲和图法活动，并据此提出了以下主题。

主题***1***：***JumpExTra VR***的主要优势是可及性和愉悦感，但参与者也表达了受伤顾虑。 参与者主要将这款游戏的优势归因于两个因素。第一个因素是体育锻炼机会的可及性："*[...]* 你不需要去健身房，因为在家就可以轻松锻炼"***(P4)***。其次，他们强调了*JumpExTra VR*带来的愉悦感："锻炼时更有趣"***(P9)***。有趣的是，一位参与者同时指出了这款游戏中沉浸感的优点和缺点："忘却现实世界是一种缺点，而完全沉浸在这个世界中则是一种优点"***(P6)***。另一位玩家将这款游戏与另一种商业替代方案进行比较，突出了其积极的一面："相比*Beat Saber*等其他*VR*游戏，玩家的运动量更大"***(P16)***。

JumpExTra VR 被发现存在一些缺点。一些玩家表示，游玩这款游戏时可能会失去对现实世界的感知："缺点是，你可能会过于沉迷于虚拟世界，而忽视现实生活"***(P4)***。此外，许多参与者担心潜在的受伤风险。这些风险有多种成因，但主要是跌倒："我觉得摔倒的风险很大"***(P14)***。还有人指出了身体碰撞的风险："你可能会撞到现实环境中的物体"***(P8)***。针对最后一关的技术反馈，一位参与者强调，游戏化程度较高的关卡也需要类似的训练指导："因为，如果 *[*他们*]* 任务做错了，就可能导致损伤"***(P3)***。一些人还提到保持平衡是个问题："有时候保持平衡有点困难，可能会摔倒在地"***(P7)***。

主题 ***2***：总体而言，***JumpExTra VR*** 并未造成严重的安全性与可用性问题。不过，玩家报告了一些个别情况。 尽管参与者在安全性与可用性方面没有遇到严重问题，但有少数人难以确定自己在现实空间中的位置："我想不起来自己在房间里的什么位置"***(P2)***。也有人提到了与发生意外、跌倒和失去平衡有关的安全问题。此外，有人指出难以保持在*JumpExTra VR* 的站立区域内："我很难待在指定的游戏区域内。有些地方我走得太靠前了，所以第一次游玩时没能让触发器正常工作"***(P5)***。值得注意的是，玩家还报告了一些由虚拟现实设备配置引起的可用性问题：首先，"视力清晰度方面的问题让我眼睛很累"***(P23)***。其次，"追踪不够准确"***(P16)***。第三，"他们 *[*的*]* 背上的线缆很碍事"***(P8)***。不过，只有一位参与者遇到腿部追踪器无法固定在原位的问题，另有一位参与者因色盲而遇到可用性问题。

主题 ***3***：对大多数玩家而言，***JumpExTra VR*** 将对他们参与跳跃训练产生积极影响。大多数参与者都认为，有机会使用*JumpExTra VR* 将有助于他们长期参与跳跃训练。有人评论说："这有助于 *[*他们的*]* 体能"***(P6)***。一位玩家表示，尤其随着时间推移，人们会越来越擅长完成跳跃以及提升受评估的各项能力，这"能提高平均跳跃力量，也能降低受伤风险"***(P3)***。一些参与者特别认可游戏的反馈功能，并将其视为长期使用的理由："通过反馈，我的跳跃可能会有所进步"***(P10)***。对少数参与者而言，*JumpExTra VR* 的激励性或趣味性也发挥了作用："设计和氛围都非常令人愉悦。这会激励我"***(P19)***。特别是一位玩家强调了通过游戏进行体育锻炼的优势："*[...]* 在游戏过程中，你不会真的注意到自己正在练习跳跃，因此不会觉得那么单调"***(P24)***。

然而，有些参与者不会继续使用*JumpEx- Tra VR*。对少数人而言，这是因为在虚拟现实中跳跃时可能出现安全性和舒适度问题："我觉得没有足够的安全感，无法全力跳跃。头戴式设备晃动得太厉害，我担心自己落地不稳，或者损坏头戴式设备。"（***P5***）。追踪不够准确也被指出是一个原因："我还觉得，从追踪的角度来看，跳跃训练环节的准确性太差了"（***P25***）。此外，玩家还提到了其他原因，例如普遍不喜欢VR游戏、过一段时间后失去兴趣，或难以保持习惯。

主题***4***：玩家针对 ***JumpExTra VR*** 的游戏世界、反馈、站立区域和游戏关卡的多样性提出了改进建议。总体而言，我们收到了许多关于游戏设计的反馈。少数参与者甚至表示"什么也不改"*(**P13**)*。其他人则强调了自己最喜欢的部分，例如"*[...]* 一定要保留音乐和教程"***(P6)***。不过，我们也收到了许多关于如何改进*JumpExTra VR*的建议。一些玩家提出了对游戏世界的改进意见，例如"让*[]* 游戏环境更加多彩、美观、生动"***(P8)***，以及"如果虚拟身体能更准确一些，玩起来会更好"***(P14)***。少数参与者希望获得更多反馈："我想改进的是反馈。如果跳跃或躲避障碍成功与否，应该有声音或蜂鸣提示，但现在没有。"***(P20)***。部分玩家不喜欢在游戏过程中一直低头看

，并建议改进站立区域："我希望当你离开指定的游戏区域时能收到提醒"*(P3)*。还有人建议让跳跃训练练习更加多样："将三个关卡结合起来，增加多样性（拍击、跳跃、躲避）"*(P10)*。

7 讨论

本研究项目的主要目标是提供一种有趣且安全的基于VR的跳跃运动游戏。因此，我们综合考量了先前文献和专家访谈的发现，以设计*JumpEx- Tra VR*。最后，我们通过一项混合方法用户研究对原型进行了评估（N=25）。在以下部分中，我们将围绕假设和研究问题讨论研究发现，并提出设计启示，帮助研究人员和从业者拓展全身运动体验。

7.1 研究问题1：我们的运动游戏会如何影响玩家的晕动症症状？

我们的结果显示，玩家在玩游戏后报告的SSQ恶心评分更高。这一发现支持了先前研究 [125]的结论，即虚拟现实运动游戏可能引发晕动症症状。然而，我们并未观察到SSQ其余类别的评分上升，包括眼动障碍、定向障碍和总分。我们推测，晕动症评分上升是由SSQ中的出汗项目导致的。文献 [6]已表明体育训练会影响出汗情况。我们进一步进行的SSQ分析排除了出汗项目，结果支持这一推测：前后测量之间没有显著差异。正如 [125], 所建议的，我们也强调晕动症症状与体育活动症状之间可能存在重叠。我们的结果表明，高强度全身运动可以在虚拟现实中安全进行，而不会造成不适。

7.2 RQ2：我们的运动游戏如何影响玩家的情绪？

领域专家的反馈和文献 [28] 表明，我们运动游戏中的身体活动很可能会改善玩家的情绪。为探究这一潜在效应，我们评估了玩家的能量唤醒和效价。MMQ 的结果显示，这两个分量表均未呈现显著差异。我们从两个方面解释这一结果。对于能量唤醒这一子类别，大多数玩家表示，在进行游戏后感到身体疲惫且大汗淋漓。他们明确将这种状态归因于两个外部原因：夏季高温和头戴式设备的贴合度。不幸的是，本研究恰逢极端的夏季干旱天气，气温很高。此外，新冠疫情防控措施迫使我们使用易于清洁的头显泡沫垫，而这类泡沫垫会积聚额外热量。这两个因素加剧了预期中的疲劳，并可能使玩家感到疲倦而非受到激发。不过，由于玩家总体上认可这种身体挑战，我们相信，从长远来看，这类全身运动游戏能够促进玩家的身体和心理健康。

相比之下，效价评分略有下降，这可能与 PXI 掌控感维度得分较低有关，表明参与者觉得自己并不擅长玩这款游戏。由于研究的时间限制，我们只能让参与者尝试一次游戏。然而，首次尝试这类快速计时动作总是很困难。因此，我们推测，经过更多次练习后，玩家会感到更加放松，也更有能力。反过来，首次体验中缺失的成功感也可能对参与者的效价产生积极影响。

7.3 研究问题3：玩家如何评价我们的运动游戏的玩家体验及其作为训练工具的可用性？

JumpExTra VR 基于先前文献和专家访谈进行开发。因此，我们认为 PXI 的高评分源于游戏的详细设计过程。与以往研究一致， [45, 67, 88], 我们表明，基于跳跃的运动游戏能够带来积极的玩家体验。由此，我们将这些研究的结果拓展到了虚拟现实中的跳跃训练领域。

总体而言，玩家非常享受这款游戏，并认为它具有沉浸感和吸引力。PXI 中进度反馈的高分表明，该游戏针对玩家的进度提供了全面的反馈。定性数据进一步支持了这一发现，因为玩家认可游戏的反馈功能："反馈可能会改善我的跳跃"*(P10)*。我们认为，每个关卡开始前提供的指导（目标清晰度）、交互式教程（操作便捷性）以及动态难度（挑战）反映在 PXI 相应子类别的高分中。然而，玩家批评了需要不断低头看自己的脚这一点。这种姿势令人不适，并可能导致姿势退化。相较之下，在击中或未击中时通过视觉和音频反馈告知玩家，可以减少他们查看自身动作的冲动。

尽管大多数玩家表示会继续使用*JumpExTraVR*，但我们不能将这一反馈视为长期留存的证据。相反，我们强调有必要开展更长期且更具针对性的研究。此外，玩家还要求改进视觉效果，即打造更加生动的世界和更匹配的虚拟化身。他们还提出将各个关卡结合起来，以增加游戏玩法的多样性。尤其是最后这一点，对于未来全身运动游戏的长期成功至关重要。为了确保留存，开发者应专注于具有高可重复游玩性的多样化游戏玩法。我们游戏中采用的节奏元素，或像 Beat Saber 这样的知名作品中的节奏元素，都可以通过添加新歌曲和映射轻松扩展。我们最后一个关卡中重复性的技术性跳跃训练带来了更大的挑战，也很可能导致玩家兴趣下降。因此，如何同样提升高级训练流程的留存率，仍然是一个有待研究的问题。

7.4 研究问题4：玩家如何看待我们的运动游戏中的身体活动并在其中进行表现？

总体而言，所有参与者的表现均处于我们预期的 60% 至 90% 范围内。因此，我们可以认为，动态难度调整很好地使运动游戏的挑战与玩家的个人能力相匹配。在我们的样本中，参与者在最终水平的个人技术评分平均提高了 5.60%。相比之下，我们没有观察到跳跃高度有所提升。这些观察结果与领域专家的反馈一致：肌肉

方面的变化需要数周时间，而技术改进则能较快实现。不过，我们要指出，研究结果纯属描述性。若要确定系统的准确性，还需要在专业的动作分析实验室进行额外评估。就感知效应而言，PXI 中挑战子类别的高分表明，参与者感受到了积极的挑战，却没有觉得负担过重。此外，PACES-8 的结果表明，参与者喜欢在 *JumpExTraVR* 中进行身体活动。最后，我们观察到玩家的技能有所提升。起初，许多参与者在协调能力方面遇到很大困难，使用了错误的脚，或无法跟上歌曲的节奏。随着他们在游戏过程中表现不断改善，我们认为，增加训练次数将有助于提升玩家的身体控制和神经肌肉协调能力。

7.5 设计启示

避免意外向前漂移（*UFD*）。在我们的研究中，频繁地原地踏步和跳跃会导致轻微且不易察觉的向前移动，因此玩家需要监控自己的位置，以免离开游戏区域。这种效应与原地行走移动技术中观察到的意外位置漂移（UPD）[113] 相似。我们将观察到的这种效应称为意外向前漂移（UFD）。遗憾的是，除了在玩家离开指定区域时发出警告并暂停游戏（符合 Xu等人 [140]的指南）之外，我们想不出简单的解决方案。强制玩家精确地停留在同一位置，会增加所需的 mental effort，还可能损害游戏体验。一种选择是融入全向游戏玩法，让玩家向各个方向跳跃，而不只是向前。不过，这种游戏设计颇具挑战，因为它会在玩家身后加入事件。

考虑技术约束。目前市面上的 VR 硬件并非为追踪爆发性的全身动作而设计。其局限体现在需要额外硬件（例如 Vive Trackers），且容易出现追踪误差。尽管这些技术局限限制了其在当今商业游戏中的实际应用，但我们相信，随着未来几代 VR 头显的推出，这些问题都能得到解决。我们想分享的是，如何利用当前的技术实现一款以跳跃为核心的运动游戏，以及我们从中学到的经验。在先导测试中，我们尝试了多种将追踪器固定在玩家腿上的方法。最终，我们选择将其固定在小腿胫骨部位。与常见的鞋部适配器相比，追踪器固定在这个位置更加稳固、佩戴更舒适，也更容易安装。不过，在研究过程中，我们有时会发现追踪器略有滑动，尤其是在参与者穿着光滑面料裤子时。即使追踪器保持在原位，尽管 Vive Lighthouse 追踪属于最精确的 VR 系统之一，但其精度仍不足以追踪快速的腿部动作。因此，我们注意到游戏过程中出现了明显的抖动。这个问题在节奏关卡中并不严重，也没有引起注意。不过，使用追踪数据回放垂直跳跃时，用户会看到追踪质量不尽如人意。因此，我们建议在用户能看到自身动作的场景（例如回放）中，轻微应用低通滤波器，以去除伪影。

除了视觉伪影外，与追踪相关的不准确之处也会影响跳跃技术反馈的质量。结合多种体型和姿势，这些技术约束可能会提高错误检测的假阳性率，例如对膝部动作的错误判断。为了避免错误纠正影响玩家的跳跃技术，自动反馈应仅作为一种工具，帮助他们对自身动作进行批判性反思。在此背景下，我们注意到，玩家往往不记得教程中展示的最佳跳跃是什么样的，因此无法据此对自己的跳跃得出恰当结论。因此，我们建议将“最佳表现”的可视化内容与回放结合起来，并辅以精确度较低的自动反馈。这种组合能进一步提升玩家对自身表现的批判性审视，并可能带来持久的技术改进。

在全身虚拟现实体感游戏中考虑安全问题。我们延续了 Mueller 和 Isbister [106] 的工作，专门针对全身虚拟现实运动游戏提出安全方面的启示。正如我们从 UFD 中看到的，在虚拟现实中进行全身动作存在必须在游戏设计流程早期加以考虑的安全问题。特别是，我们最初选择专注于垂直跳跃的主要原因之一，是它与标准大小的追踪区域相适配。其他动作（例如向前跳跃）会使用户迅速移动到游玩空间的边界甚至超出边界。对于必须考虑消费者游玩空间差异的游戏开发者而言，这一点尤其重要，因为消费者游玩空间通常没有虚拟现实实验室那么宽敞。

另一个关键问题是使用带线缆的 VR头显（例如 Vive Pro）时可能存在的风险。在我们的实验中，玩家大多没有在追踪区域内移动足够远，因此没有遇到与线缆相关的问题。不过，其中一位作者始终在场监控参与者的行为。当然，这种做法无法应用于商业产品。最后，我们注意到，参与者通常比在现实生活中更容易出现平衡问题。由于在较小的追踪区域内意外绊倒很容易导致碰撞，开发者应当考虑这一观察结果。

融入节奏元素与流畅动作模式。 与 Beat Saber 等其他成功的运动游戏类似，我们将玩家在前三个关卡中的动作与歌曲节拍同步。这种游戏设计深受参与者赞赏，他们希望我们“*[...] 一定要保留音乐和教程*”***(P6)***。然而，每个关卡的时长必须有所限制，因为快速跳跃和单脚跳练习会让人筋疲力尽。在我们的游戏中，歌曲时长只有两分钟。此外，我们还加入了频繁的“休息段落”，其中交互较少、节奏较慢，让玩家得以喘口气。

在游戏设计过程中，我们尝试了各种动作模式，并了解哪些模式效果良好，哪些会损害游戏体验。首先，单脚动作与双腿动作之间频繁切换极具挑战性，需要出色的协调性和平衡能力。此外，步伐和跳跃的节奏应大体保持规律，且很少发生变化。例如，每个节拍、每隔一个节拍或每隔四个节拍设置动作，效果都非常好。然而，在这些区间之间反复切换会打断玩家的连贯节奏，并因漏击音符而造成挫败感。对于单脚点踏和单脚跳跃，我们发现，“行走式”模式，即每个音符交替使用左右脚，效果很好。双腿动作的一个良好对应方式，是反复跳入窄站姿和宽站姿。

根据玩家的体能水平和进步情况调整难度。与先前的运动游戏研究 [107, 140], 类似，我们强调采用动态难度调整的重要性——这是确保所有玩家获得满意游戏体验的关键功能。我们的游戏会持续监测玩家表现，并根据需要切换到另一难度等级。无论玩家的体能水平和能力如何，这项功能都能让我们向每位玩家发起挑战，同时避免让初学者负担过重。我们对游戏表现指标的分析显示，参与者大部分时间处于中等和困难难度。相比之下，最低难度很少被使用。因此，我们认为可以进一步平衡各难度等级，并改进转换参数。然而，评估特定歌曲映射的实际难度并不容易。例如，我们在此前的设计启示中解释过，交互较少并不一定意味着游戏玩法简单。总体而言，我们设置的三个难度等级为大多数玩家提供了最佳挑战。不过，我们记录的表现指标显示，仍有少数玩家在最低难度下表现不佳，而另一些玩家甚至未受到最高难度的挑战。因此，我们建议增加更多难度等级，以适应每种体能水平。

7.6 局限性

我们在研究中使用了搭配 Vive Trackers 的 Vive Pro 头显。此决定主要是出于与 Kinect 等替代方案相比，其追踪质量更高。不过，使用有线系统也带来了可用性和安全问题。尽管我们确信，在运动游戏过程中进行主动监控可以避免任何危险情况，但我们承认，参与者可能会觉得虚拟现实系统更令人不安或受到干扰。此外，我们仅开展了一项探索性用户研究，以了解玩家体验这款运动游戏的方式。因此，我们无法对最后一个关卡中自动反馈建议的准确性作出确切判断。总的来说，我们还注意到，使用额外硬件会限制这款运动游戏的使用范围，并希望未来的技术进步能够为虚拟现实中的全身动作追踪带来新的可能性。

对于本研究中的定性数据，我们反思了自身背景以及可能影响分析过程的潜在研究兴趣 [19, 111]。参与专家访谈分析的第一作者之一拥有计算机科学背景，此前曾发表过有关虚拟现实、移动和游戏研究的成果。另一位第一作者负责了两项定性数据分析，拥有针对不同用户群体开展虚拟现实和运动游戏研究的经验，并具有心理学和认知系统背景。因此，他们的兴趣和背景可能给分析带来偏差。不过，我们也认为，这些不同专业领域和视角的结合丰富了数据处理环节。

8 结论

虚拟现实运动游戏可以极大地激励人们追求更积极的生活方式，并在家中定期锻炼。然而，目前大多数游戏在其训练内容中主要追踪并关注手部动作，使得因整日久坐而已经变得虚弱的下肢严重缺乏训练，也未得到针对性锻炼。在这项研究中，我们以垂直跳训练为例，探索了全身虚拟现实体感游戏的潜力。为此，我们采访了九位领域专家，并将他们的反馈与以往研究的见解相结合，开发出健身游戏原型 *JumpExTra VR*。游戏的前三个关卡用于训练下肢协调性、稳定性和耐力，之后会针对最大垂直跳的动作完成情况提供技术反馈。

此外，我们开展了一项探索性用户研究，以评估玩家对使用*JumpExTra VR*进行训练的体验有何感受。结果表明，参与者认可其中的身体挑战，也很享受这款以跳跃为核心的运动游戏。根据参与者的反馈，我们提出了一系列设计启示，可为未来的全身虚拟现实体感游戏研究提供指导，并帮助开发者设计出引人入胜的体验。未来，我们希望通过评估这款运动游戏的长期效果来拓展研究，并将其训练效果与监督式训练进行比较。

致谢

本研究由德国联邦教育与研究部（BMBF）资助。

参考文献

[1] Vero Vanden Abeele、Katta Spiel、Lennart Nacke、Daniel Johnson 和 Kathrin Gerling。2020。《玩家体验量表》的开发与验证：用于衡量玩家在功能和社会心理后果层面体验的量表。《国际人机交互研究》135（2020），102370 10 1016 2019 102370 9 。https://doi.org/ 。/j.ijhcs. 。[2] 页码 # Kent Adams、John P O'Shea、Katie L O'Shea 和 Mike Climstein。1992。深蹲、增强式训练及深蹲-增强式训练六周对力量输出的影响。应用运动科学研究杂志 6, 1 1992 36 41 4 ( ), – 。页码 #[3] 2006 Ali Al-Khalifah 、 Rachel McCrindle 、 Paul Sharkey 和 Vassil Alexandrov。 。利用虚拟现实进行医学诊断、训练和教育。国际残障与人类发展杂志 5, 2 2006 187 194 3 ( ), – 。页码 #[4] 2022 Iannis Albert、Nicole Burkard、Dirk Queck 和 Marc Herrlich。 。以VR节奏游戏 BeatSaber为例探讨运动游戏中的听觉-运动同步效应。《*ACM*人机交互汇刊》6，CHI PLAY，文章 253 2022 26 10 1145 3549516 2 (oct), 页数。https://doi.org/ 。/ 页码 # [5] 2005 Kenneth Anderson 和 David G Behm。 。不稳定抗阻训练对平衡和稳定性的影响。《运动医学》 35, 1 2005 43 53 2 ( ), – 。页码 #[6] 1998 LE Armstrong 和 CM Maresh。 。训练、环境和个体因素对运动出汗反应的影响。国际运动医学杂志 19, 2 1998 103 105 10, 12 S ( ), S –S 。页码 # #[7] 1988 Timothy T Baldwin 和 J Kevin Ford。 。训练迁移：回顾及未来研究方向。人员心理学 41, 1 (1988), 63–105。页码 #3[8] Wendy Balster、ELC Xue 和 WK Pui。2016。熟悉训练三周后，较深的反向运动对垂直跳生物力学的影响——初步发现。国际人体运动与体育科学杂志4, 4 (2016), 51–60。页码 #3[9] E Joan Bassey、Maria A Fiatarone、Evelyn F O'neill、Margaret Kelly、William J Evans 和 Lewis A Lipsitz。1992。高龄男性和女性的腿部伸肌力量与功能表现。《临床科学》（伦敦，英格兰：*1979*82, 3 1992 321 327）( )，– 。页码 #[10] Nathaniel A Bates 、 Kevin R Ford 、 Gregory D Myer 和 Timothy E Hewett。2013。下落垂直跳第一和第二落地阶段地面反作用力与质心的冲击差异及其对损伤风险评估的意义。生物力学杂志46, 7 (2013), 1237–1241。页码 #3[11] B Bideau、R Kulpa、N Vignais、S Brault、F Multon 和 C Craig。2010。虚拟现实：用于理解体育表现和训练运动员的严肃游戏。*IEEE*计算机图形应用 30, 2 2010 14 21 3 ( ), – 。页码 #[12] 1998 Jonathan R Blackburn 和 Matthew C Morrissey。下肢开放式与闭合式动力链力量和跳跃表现之间的关系。《骨科与运动物理治疗杂志》27, 6 (1998), 430–435。页码 #4

[13] James P Bliss、Philip D Tidwell 和 Michael A Guest。1997。虚拟现实用于向消防员实施空间导航训练的有效性。《Presence：远程操作与虚拟环境》 6, 1 1997 73 86 3 ( ), – 。页码 # [14] Maarten F Bobbert。1990。下落跳作为提升跳跃能力的训练方法。《运动医学》 9, 1 1990 7 22 3, 4 ( ), – 。页码 # # Felix Born、Sophie [15] Abramowski 和 Maic Masuch。2019。VR中的运动游戏：沉浸式具身化对动机、表现和感知用力程度的影响。载于2019年第11届虚拟世界与严肃应用游戏国际会议（VS-Games）。IEEE，美国纽约市，1–8。https: //doi.org/ 10 1109 2019 8864579 2, 4 。/VS-Games。。页码 # # Felix [16] Born、Adrian Rygula 和 Maic Masuch。2021。在虚拟现实运动游戏中使用虚拟表现增强，激励玩家完成可选的高强度活动。《ACM人机交互汇刊》5，CHI PLAY，文章225（2021年10月），21页。https://doi.org/10.1145/3474652 页码 #4[17] C. Bosco、P. V. Komi、J. Tihanyi、G. Fekete 和 P. Apor。1983。人类腿部伸肌的机械功率测试与纤维组成。《欧洲应用生理学与职业生理学杂志》51, 1 (1983), 129–135。https://doi.org/ 10 1007 00952545 2, 3 。/BF 页码 # # Virginia Braun 和 [18] Victoria Clarke。2019。反思反思性主题分析。《运动、锻炼与健康质性研究》11, 4 (2019), 589–597。https://doi.org/ 10 1080 2159676 2019 1628806 5, 11 。/ [19] X. 。页码 # # Virginia Braun 和 Victoria Clarke。2021。我可以使用TA吗？我应该使用TA吗？我不该使用TA吗？比较反思性主题分析与其他基于模式的质性分析方法。《咨询与心理治疗研究》21, 1 (2021 37 47 10 1002 12360 5, 11, 14), – 。 [20] https://doi.org/。/capr。页码 # # # Eva Buchtelová、M Tichy 和 2013 Kateřina Vaniková。。肌肉失衡对骨盆位置和腰椎前凸的影响：理论基础。《护理、社会研究、公共卫生与康复杂志》1, 2 (2013), 25–36。页码 #[21] Lee N Burkett、Wayne T Phillips 和 Joana Ziuraitis。2005。大学年龄段男性运动员垂直跳的最佳热身方式。《力量与体能训练研究杂志》 19, 3 2005 673 676 3 ( ), – 。页码 # Paul K [22] Canavan 和 Jason D Vescovi。2004。功率预测方程的评估：女性峰值垂直跳跃功率。《运动与锻炼医学与科学》36, 9 (2004), 1589–1593。页码 #3[23] Alberto Cannavò、Filippo Gabriele Pratticò、Giuseppe Ministeri 和 Fabrizio Lamberti。2018。基于沉浸式虚拟现实和可穿戴技术的运动训练运动分析系统。载于第四届虚拟现实国际会议论文集（香港，香港）（ICVR 2018）。计算机协会，美国纽约州纽约市，26–31。https: //doi.org/ 10 1145 3198910 3198917 3 。/ 。页码 # Kevin Carlson、Marshall [24] Magnusen 和 Peter Walters。2009。不同训练方式对垂直跳的影响。《运动医学研究》17, 2 (2009), 84 94 4 – 。页码 # Patrick Carlson、Anicia Peters、Stephen B Gilbert、Judy M Vance 和 Andy Luse。2015。虚拟训练：装配任务的学习迁移。《 [25] IEEE可视化与计算机图形学汇刊》 21, 6 2015 770 782 3 ( ), – 。页码 # Polona [26] Caserman、Shule Liu 和 Stefan Göbel。2022。沉浸式虚拟现实运动游戏中的全身动作识别。《IEEE游戏汇刊》 14, 2 2022 243 252 10 1109 2021 3064749 4 ( ), – 。 [27] https://doi.org/ 。/TG. 。页码 # Guilherme M. Cesar、Curtis L. Tomasevicz 和 Judith M. Burnfield。2016。下落跳与垂直跳的额状面对比：对前交叉韧带损伤风险评估的意义。《运动生物力学》15, 4 (2016年10月), 440–449。https://doi.org/ 10 1080 14763141 2016 1174286 3 。/ 。。页码 # John S. Y. Chan、 [28] Guanmin Liu、Danxia Liang、Kanfeng Deng、Jiamin Wu 和 Jin H. Yan。2019。专题——身体活动对情绪的治疗益处：关于运动强度、持续时间和方式效应的系统综述。《心理学杂志》153, 1 (2019), 102–125。https://doi.org/10.1080/00223980.2018.1470487 arXiv:https://doi.org/10.1080/00223980.2018.1470487 PMID: 30321106。页码 #12[29] A Chardenon、Gilles Montagne、MJ Buekers 和 Michel Laurent。2002。人体移动过程中对球拦截的视觉控制。《神经科学通讯》 334, 1 2002 13 16 3 ( ), – 。页码 [30] # Gary Charness 和 Uri Gneezy。2009。运动激励。《计量经济学》 77, 3 (2009 909 931 2), – 。页码 # Yu-Ping Chen、Lin-Ju Kang、Tien-Yow [31] Chuang、Ji-Liang Doong、Shwn-Jan Lee、Mei-Wun Tsai、Suh-Fang Jeng 和 Wen-Hsu Sung。2007。运用虚拟现实改善脑瘫儿童的上肢控制：单被试设计。《物理治疗》 87, 11 2007 1441 1457 3 ( ), – 。页码 # Sebastian [32] Cmentowski 和 Jens Krueger。2021。探索虚拟现实中垂直跳训练的潜力。载于2021年计算机与人类游戏交互年度研讨会扩展摘要集（虚拟活动，奥地利）（CHI PLAY '21）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 179 185 10 1145 3450337 3483503 4 – 。https://doi.org/ 。/ 。页码 [33] # Jacob Cohen。1992。心理学中的定量方法：统计功效入门。《心理学公报》112, 1 (1992), 153–159。https://doi.org/10.1.1.1043.9095 [10] 页码 #[34] Cathy Craig。2013。理解体育运动中的感知与行动：虚拟现实技术能提供什么帮助？Sports Technology 6, 4 (2013), 161–169。页码 #3[35] Cathy M Craig、Eric Berton、Guillaume Rao、Laure Fernandez 和 Reinoud J Bootsma。2006。判断球的去向：足球弧线任意球案例。Naturwissenschaften 93, 2 2006 97 101 3 ( ), – 。页码 # Jean-Louis [36] Croisier。2004。体育运动中的肌肉失衡与急性下肢肌肉损伤。International SportMed Journal 5, 3 2004 169 176 2 ( ), – 。 [37] 页码 # Don Decker 和 Mike Vinson。1996。运用周期化训练提升垂直跳跃表现。Strength & Conditioning Journal 18, 1 (1996), 13–17。页码 # 2, 3 # DeepL SE。2017。 [38] DeepL 翻译器。DeepL Pro 版本。德国科隆。https://www.deepl.com/pro?cta = 5, 11 header-pro/。页码 # # P [39] AUL Devita 和 William A Skelly。1992。着地刚度对下肢关节动力学和能量学的影响。Med Sci Sports Exerc 24, 1 (1992), 108 115 3 – 。页码 # Dovetail Research PTY. [40] LTD. 2016。Dovetail。澳大利亚萨里山。https: //dovetailapp.com/。页码 # 4, 11 # Peter Düking、Hans-Christer Holmberg 和 Billy [41] Sperlich。2018。虚拟现实系统对运动员的潜在用途：简要 SWOT 分析。Frontiers in Physiology 9 (2018), 128。页码 #3[42] Daniel L Eaves、Gavin Breslin、Paul Van Schaik、Emma Robinson 和 Iain R Spears。2011。实时虚拟现实反馈对舞蹈运动学习的短期影响。Presence: Teleoperators and Virtual Environments 20, 1 (2011), 62–77。页码 #3[43] Kirk I Erickson、Michelle W Voss、Ruchika Shaurya Prakash、Chandramallika Basak、Amanda Szabo、Laura Chaddock、Jennifer S Kim、Susie Heo、Heloisa Alves、Siobhan M White 等。2011。运动训练可增加海马体大小并改善记忆。Proceedings of the national academy of sciences 108, 7 (2011 3017 3022 2), – 。页码 # Philip W Fink、Patrick S Foo 和 William H [44] Warren。2009。在虚拟现实中接高飞球：对外野手问题的关键检验。Journal of vision 9, 13 (2009 14 14 3), – 。页码 # Samantha Finkelstein、Andrea Nickel、 [45] Tiffany Barnes 和 Evan A. Suma。2010。Astrojumper：利用 VR 游戏激励自闭症儿童锻炼。载于《CHI '10 扩展摘要：计算机系统中的人为因素》（美国佐治亚州亚特兰大）（CHI EA '10）。计算机协会，美国纽约州纽约市，4189–4194。 https://doi.org/10.1145/1753846.1754124 页码 #4, #12[46] Samantha Finkelstein、Andrea Nickel、Zachary Lipps、Tiffany Barnes、Zachary Wartell 和 Evan A Suma。2011。Astrojumper：利用沉浸式虚拟现实运动游戏激励锻炼。Presence: Teleoperators and Virtual En- vironments 20, 1 (2011), 78–92。 https://doi.org/10.1162/pres_a_00036 页码 #2 [47] 2019 [ ] 2 FitXR。。 [48] FitXR。VR游戏。FitXR，英国伦敦。2014。页码 # Steven J Fleck 和 William Kraemer。。抗阻训练计划设计，第4版。Human Kinetics，美国伊利诺伊州尚佩恩。页码 #4[49] Jenny Gabel、Sukran Karaosmanoglu、Celeste Mason、Sebastian Rings 和 Frank Steinicke。2021。Corona Beat——通过踢球打破长期社交隔离造成的久坐习惯。载于《2021 IEEE 虚拟现实与 3D 用户界面会议摘要与研讨会》（VRW）。IEEE，葡萄牙里斯本，687–688。https://doi.org/ 10 1109 52623 2021 00226 2 . / VRW . 。页码 # David A Gabriel、Gary Kamen 和 Gail Frost。2006。抗阻运动的神经适应。 [50] 《运动医学》 36, 2 2006 133 149 4 ( ), – 。页码 # Mat Gallagher。2022 3。你应该购买 VR 头显的理由。https: //www.t [51] 3 3 2 .com/news/ - [52] 2019 [ ] reasons-why-you-should-buy-a-vr-headset 页码 # Beat Games。。Beat Saber。VR游戏。Beat Games。美国加利福尼亚州洛杉矶。https://beatsaber.com/。Steam 评论：https://store.steampowered.com/app/ 620980/Beat_Saber/。访问日期：30.12.2021。页码 #2, #4, #7[53] Rodrigo Ghedini Gheller、Juliano Dal Pupo、Luis Antonio Pereira de Lima、Bruno Monteiro de Moura 和 Saray Giovana dos Santos。2014。深蹲深度对反向动作垂直跳跃表现和生物力学参数的影响。页码 #4[54] Linda Graf、Maximilian Altmeyer、Katharina Emmerich、Marc Herrlich、Andrey Krekhov 和 Katta Spiel。2022。玩家体验量表（PXI）德语版的开发与验证。载于《Mensch Und Computer 2022 会议论文集》（德国达姆施塔特）（MuC '22）。计算机协会，美国纽约州纽约市，265–275。https://doi.org/10.1145/3543758.3543763 页码 #9[55] John Graham。1994。提供有效运动员体适能水平检验的指南。Strength & Conditioning Journal 16, 6 1994 7 14 2, 3 ( ), – 。页码 # # [56] Daigo Hayashi、Kazuyuki Fujita、Kazuki Takashima、Robert W. Lindeman 和 Yoshifumi Kitamura。2019。重定向跳跃：在虚拟现实中以不可察觉的方式操控跳跃动作。载于《2019 IEEE 虚拟现实与 3D 用户界面会议》（VR）。IEEE，美国纽约市，386–394。 https: //doi.org/ 10 1109 2019 8797989 4 . /VR. 。页码 # Robert T [57] Hays、John W Jacobs、Carolyn Prince 和 Eduardo Salas。1992。飞行模拟器训练效果：荟萃分析。军事心理学 4, 2 (1992), 63–74。页码 #3

[58] Eric J Hege d我们, Suzanne McDonoug h, Chris B leakley, C had E Coo k, and G Davi d Baxter. 2015. 运动员下肢身体表现测量指标：测量属性及其与损伤相关性的系统综述，第1部分。包括膝关节功能测试（如跳跃测试）。《英国运动医学杂志》 49, 10 2015 642 648 3 ( ), –。页数 # Christian Helland、[59] Jens Bojsen-Møller、Truls Raastad、Olivier R Seynnes、Marie M Moltubakk、Vidar Jakobsen、Håvard Visnes 和 Roald Bahr。2013。患有和未患髌腱病的精英排球运动员的髌腱力学特性。《英国运动医学杂志》47，13（2013年9月），862–868。https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092275 页数 #3[60] Timothy E Hewett、Gregory D Myer、Kevin R Ford、Robert S Heidt Jr、Angelo J Colosimo、Scott G McLean、Antonie J Van den Bogert、Mark V Paterno 和 Paul Succop。2005。女性运动员的神经肌肉控制及膝关节外翻负荷生物力学测量指标可预测前交叉韧带损伤风险：一项前瞻性研究。《美国运动医学杂志》33，4（ 2005 492 501 3 ），–。页数 # Anne Hösch。. 驾驶模拟环境中的模拟器晕动症——关于 *Human Factors* 的三项研究。博士学位论文。伊尔梅瑙工业大学。https://www.db-thueringen.de/receive/dbt _ _00037865 9 mods 页数 # Paul A [61] Hough、Emma Z Ross 和 Glyn Howatson。. 动态拉伸和静态拉伸对垂直跳跃表现及肌电活动的影响。《力量与体能训练研究杂志》 23, 2 2009 507 512 3 ( ), –。页数 # HTC公司。. HTC Vive Pro。网站。检索于10月，网址：https://www.vive.com/eu/product/vive-pro/。页数 # [62] 7, 9 # HTC公司。. HTC Vive Tracker。网站。检索于2022年7月12日，网址：https://www.vive.com/us/accessory/tracker [63] 3 7, 9 /。页数 # # Jackie L Hudson。. 垂直跳跃中的身体节段协调。《运动与锻炼医学与科学》 18, 2 1986 241 252 4 ( ), –。页数 # Joseph P [64] Hunter 和 Robert N Marshall。. 力量训练和柔韧性训练对垂直跳跃技术的影响。《运动与锻炼医学与科学》 34, 3 2002 478 486 3 ( ), –。页数 # Christos Ioannou、[65] Patrick Archard、Eamonn O'Neill 和 Christof Lutteroth。2019。沉浸式跳跑运动游戏中的虚拟表现增强。载于*2019*年计算机系统人为因素*CHI*会议论文集（英国苏格兰格拉斯哥）*(CHI '19)*。计算机协会，美国纽约州纽约市， 1 15 10 1145 3290605 3300388 2, 4, 12 –。[66] https://doi.org/ . /。页数 # # # Clayne R Jensen 和 A Garth Fisher。. 运动训练的科学基础：一本专门论述科学信息在运动训练中实际应用的独特著作。《健康、体育教育与娱乐杂志》 43, 8 1972 6 7 3 ( ), –。页数 # Jason Jerald。.《*VR*之书：[67] 虚拟现实的以人为中心的设计》。计算机协会和 Morgan & Claypool，美国纽约州纽约市。页数 #[70] Raine Kajastila、Leo Holsti 和 Perttu Hämäläinen。2014。赋能锻炼：身体控制的蹦床训练游戏。《国际体育计算机科学杂志》 1, 13 2014 6 23 4 ( ), –。页数 # Sukran [68] Karaosmanoglu、Lucie Kruse、Sebastian Rings 和 Frank Steinicke。2022。Canoe VR：一款支持老年人认知与身体锻炼的沉浸式运动游戏。载于*2022*年计算系统中的人为因素*CHI*大会扩展摘要（美国路易斯安那州新奥尔良）*(CHI EA '22)*。计算机协会，美国纽约州纽约市，第342篇文章，共7页。https://doi.org/10.1145/3491101.3519736 页数 #4[72] Sukran Karaosmanoglu、Sebastian Rings、Lucie Kruse、Christian Stein 和 Frank Steinicke。2021。面向痴呆症患者的沉浸式运动游戏以人为中心设计的经验教训。《*ACM*人机交互汇刊》5，CHI PLAY，第252篇文章（2021年10月），27页。https://doi.org/10.1145/ 3474679 4 页数 # Philip Kelly、Aoife Healy、Kieran [69] Moran 和 Noel E. O'Connor。2010。用于改进高尔夫挥杆技术的虚拟教练环境。载于*2010*年*ACM*超现实媒体与虚拟克隆研讨会论文集（意大利佛罗伦萨）*(SMVC '10)*。计算机协会，美国纽约州纽约市，51–56。https://doi.org/ 10 1145 1878083 1878098 3 . /。页数 # Robert S. Kennedy、[70] Norman E. Lane、Kevin S. Berbaum 和 Michael G. Lilienthal。1993。模拟器晕动症问卷：一种量化模拟器晕动症的改进方法。《国际航空心理学杂志》3，3（1993）， 203 220 10 1207 15327108 0303_3 9 –。https://doi.org/ . /s [71] ijap 页数 # Ho-Jun Kim、Seokhee Chung、Sungsoo Kim、Hyundae Shin、Jongsoo Lee、Sehyun Kim 和 Mi-Yeon Song。2006。躯干肌肉对腰椎前凸和骶骨角的影响。《欧洲脊柱杂志》 15, 4 2006 409 414 2 ( ), –。[72] 页数 # Jungjin Kim、Jaebum Son、Nayeon Ko 和 BumChul Yoon。. 基于虚拟现实的无监督锻炼计划可改善老年人的髋部肌力和平衡控制：一项试点研究。《物理医学与康复杂志》 94, 5 2013 937 943 3 ( ), –。页数 # Joong Hwi Kim、Sung Ho [73] Jang、Chung Sun Kim、Ji Hee Jung 和 Joshua H You。2009。利用虚拟现实改善慢性卒中患者的平衡和步行能力：一项双盲随机对照研究。《美国物理医学与康复杂志》88，9（2009），693–701。页数 #3

[78] P Klavora 等，2000。垂直跳跃测试：批判性综述。《力量与体能训练杂志》 22, 5 2000 70 75 3 ( ), –。页码 # JJ Kozak、Peter A [79] Hancock、EJ Arthur 和 Susan T Chrysler。1993。虚拟现实中的训练迁移。《人体工效学》36，7（1993），777–784。页码 #3[80] William J Kraemer、Scott A Mazzetti、Bradley C Nindl、Lincoln A Gotshalk、Jeff S Volek、Jill A Bush、JIM O MARX、KEI DOHI、Ana L Gomez、MARY MILES 等。2001。抗阻训练对女性力量/爆发力及职业表现的影响。《运动与锻炼医学与科学》33，6（2001），1011–1025。页码 #3[81] Lucie Kruse、Sukran Karaosmanoglu、Sebastian Rings、Benedikt Ellinger、Daniel Apken、Thandiwe Feziwe Mangana 和 Frank Steinicke。2021。新冠疫情期间针对轻度痴呆老年人的沉浸式运动游戏长期用户研究。载于《ICAT-EGVE 2021 - 国际人工现实与远程存在会议暨Eurographics虚拟环境研讨会》，Jason Orlosky、Dirk Reiners 和 Benjamin Weyers（编）。Eurographics协会，荷兰埃因霍温，9–18。https://doi.org/10.2312/egve.20211322 页码 #4[82] H Kyröläinen、J Avela、JM McBride、S Koskinen、JL Andersen、S Sipilä、TES Takala 和 PV Komi。2004。力量训练对跳跃机械效率的影响。《欧洲应用生理学杂志》91，2（2004），155–159。页码 #4[83] Odders Lab。2019。OhShape。游戏 [虚拟现实]。Odders Lab。西班牙塞维利亚。https://ohshapevr.com/。Steam 评论：https://store.steampowered.com/app/1098100/OhShape/。访问日期： 22 11 2022 2 。 。 。页码 # Rote [84] m Lammfromm 和 Daniel Gopher。2011。技能从虚拟现实训练器向真实杂耍的迁移。BIO会议网络1（2011），00054。https: //doi.org/10.1051/bioconf/20110100054 页码 #3[85] Corinna E Lathan、Michael R Tracey、Marc M Sebrechts、Deborah M Clawson 和 Gerald A Higgins。2002。将虚拟环境用作训练模拟器：测量迁移。载于《虚拟环境手册》。CRC出版社，美国佛罗里达州博卡拉顿， 443 454 3 –。页码 # Savvas Lazaridis、Eleni Bassa、[86] Dimitrios Patikas、Giannis Giakas、Albert Goll- hofer 和 Christos Kotzamanidis。2010。青春期前男孩与成年男性在下落跳中的神经肌肉差异。《欧洲应用生理学杂志》 110, 1 2010 67 74 3 ( ), –。页码 # Adrian Lees、Jos [87] Vanrenterghem 和 Dirk De Clercq。2004。最大与次最大垂直跳跃：对力量与体能训练的启示。《力量与体能训练研究杂志》 18, 4 2004 787 791 3, 4 ( ), –。页码 [88] # # Lauri Lehtonen、Maximus D. Kaos、Raine Kajastila、Leo Holsti、Janne Karsisto、Sami Pekkola、Joni Vähämäki、Lassi Vapaakallio 和 Perttu Hämäläinen。2019。多人混合现实蹦床游戏中的运动赋能。载于《计算机与人类游戏交互年度研讨会论文集》（西班牙巴塞罗那）（CHI PLAY '19）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 19 29 10 1145 3311350 3347181 4, 12 –。[89] https://doi.org/ . / 。页码 # # Matthieu Lenoir、Eliane Musch 和 Nancy La Grange。生态效度：立体视觉在单手接球中的作用。《知觉与运动技能》89，2（1999）， 495 508 3 –。页码 # Yi-Jun Li、De-Rong Jin、Miao Wang、Jun-Long Chen、[90] Frank Steinicke、Shi-Min Hu 和 Qinping Zhao。2021。重定向跳跃中水平与垂直联合增益的检测阈值。载于《2021 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议》（VR）。IEEE，美国纽约市，95–102。https://doi.org/10.1109/ VR 50410 2021 00030 4 . 。页码 # Phil Lundin 和 William Berg。1991。增强式训练：增强式训练综述。《力量与体能训练杂志》 13, 6 1991 22 34 4 ( ), –。页码 # [91] Andrew D Lyttle、Greg J Wilson 和 Karl J Ostrowski。提升表现：最大功率训练与负重和增强式综合训练。《力量与体能训练研究杂志》 10 1996 173 179 4 ( ), –。页码 # [92] Andrew Macvean 和 Judy Robertson。理解运动游戏用户随时间变化的身体活动、动机和行为。载于《SIGCHI人机交互系统中的人为因素会议论文集》（法国巴黎）（CHI '13）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1251–1260。https://doi.org/ 10 1145 2470654 2466163 2 . / 。页码 # Laurent Malisoux、[93] Marc Francaux、Henri Nielens 和 Daniel Theisen。2006。牵张-缩短循环训练：提升人类单条肌纤维功率输出的有效训练范式。《应用生理学杂志》100，3 2006 771 779（），–。页码 #[95] Fabrizia Mantovani、Gianluca Castelnuovo、[94] Andrea Gaggioli 和 Giuseppe Riva。2003。面向医疗保健专业人员的虚拟现实训练。《网络心理学与行为》 6, 4 2003 389 395 3 ( ), –。页码 # Elena [96] Márquez Segura、Annika Waern、Jin Moen 和 Carolina Johansson。2013。身体游戏的设计空间：技术、身体与社会设计。载于《SIGCHI人机交互系统中的人为因素会议论文集》（法国巴黎）（CHI '13）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 3365 3374 10 1145 2470654 2466461 2, 4 –。[97] https://doi.org/ . / 。页码 # # Anna Lisa Martin-Niedecken、Andrea Mahrer、Katja Rogers、Eling D. de Bruin 和 Alexandra Schättin。2020。"HIIT" ExerCube：比较传统训练与运动游戏训练中功能性高强度间歇训练的效果。《计算机科学前沿》2（2020），15页。https://doi.

org/ 10 3389 2020 00033 2 . /fcomp. 。页码 # Anna Lisa Martin-Niedecken、Katja Rogers、Laia Turmo Vidal、Elisa D. Mekler 和 Elena Márquez Segura。2019。ExerCube 对比私人教练：评估整体式、沉浸式且自适应的健身游戏设置。载于《2019年计算机系统人为因素CHI会议论文集》（英国苏格兰格拉斯哥）（CHI '19）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–15。https://doi.org/ 10 1145 3290605 3300318 4 . / 。页码 # Arnaud Mas、Idriss Ismaël 和 Nicolas Filliard。Indy：用于导航技能训练的虚拟现实多人游戏。载于《2018 IEEE第四届协作虚拟环境国际研讨会》（3DCVE）。IEEE，IEEE，美国纽约市， 1 4 3 –。页码 # Daniel Travis McMaster、Nicholas Gill、John Cronin 和 Michael McGuigan。2014。体育运动中力量与爆发力评估方法简述。《运动医学》44，5（2014年5月），603–623。https://doi.org/10.1007/s40279- 014 0145 2 2， 3 - - 页码 # # Peter J McNair、Harry Prapavessis 和 Karen Callender。2000。降低着地冲击力：指导的作用。《英国运动医学杂志》34，4（ 2000 293 296 3），–。页码 # Stefan C Michalski、Ancret Szpak 和 Tobias Loetscher。2019。利用虚拟环境提升体育运动中的现实世界运动技能：系统综述。《心理学前沿》10（2019），2159。页码 #3[103] Stefan Carlo Michalski、Ancret Szpak、Dimitrios Saredakis、Tyler James Ross、Mark Billinghurst 和 Tobias Loetscher。2019。投入游戏：利用虚拟现实提升真实乒乓球技能。《公共科学图书馆·综合》14，9（ 2019），e0222351。页码 #[104] 微软公司。2014。Kinect 2 for Windows。网站。已停产产品。页码 #[105] Anat Mirelman、Benjamin L Patritti、Paolo Bonato 和 Judith E Deutsch。2010。虚拟现实训练对中风患者步态生物力学的影响。《步态与姿势》 31, 4 2010 433 437 3 ( )，–。页码 # Florian Mueller 和 Katherine Isbister。基于运动的游戏指南。载于《SIGCHI人机交互系统中的人为因素会议论文集》（加拿大安大略省多伦多）（CHI '14）。计算机协会，美国纽约州纽约市，2191–2200。https://doi.org/10.1145/2556288.2557163 页码 # 2， 4， 7， 13 # # # Florian Mueller、Rohit Ashok Khot、Kathrin Gerling 和 Regan Mandryk。2016。体力活动游戏。《人机交互基础与趋势》10，1 2016 1 86 10 1561 1100000041 2， 4， （），–。https://doi.org/ . / 页码 # # # Florian 'Floyd' Mueller、Darren Edge、Frank Vetere、Martin R. Gibbs、Stefan Agamanolis、Bert Bongers 和 Jennifer G. Sheridan。2011。体育设计：体力活动游戏框架。载于《SIGCHI人机交互系统中的人为因素会议论文集》（加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华）（CHI '11）。计算机协会，美国纽约州纽约市，2651–2660。https: //doi.org/10.1145/1978942.1979330 页码 #2[109] Sean P Mullen、Erin A Olson、Siobhan M Phillips、Amanda N Szabo、Thomas R Wójcicki、Emily L Mailey、Neha P Gothe、Jason T Fanning、Arthur F Kramer 和 Edward McAuley。2011。测量老年人身体活动的愉悦感：身体活动愉悦量表（PACES）在不同群体和时间上的不变性。《国际行为营养与身体活动杂志》8，1（2011），1–9。https://doi.org/10.1186/1479-5868-8-103 页码 #9[110] David L Neumann、Robyn L Moffitt、Patrick R Thomas、Kylie Loveday、David P Watling、Chantal L Lo mbard、Simona Antonova 和 Michael A Tremeer。2018。交互式虚拟现实在体育运动中的应用：系统综述。《虚拟现实》 22, 3 2018 183 198 3 ( )，–。页码 # Benjamin John Newton、Zuzana Rothlingova、Robin Gutteridge、Karen LeMarc- hand 和 Jon Howard Raphael。2012。没有反思性的位置吗？定性研究系统综述后的批判性反思。《健康心理学杂志》17，6（2012），866–885。https://doi.org/10.1177/1359105311427615 页码 #14[112] Niantic、任天堂和宝可梦公司。2016。Pokémon Go。游戏 [增强现实]。https://www.pokemongo.com/en-us/。页码 #[113] Niels C Nilsson、Stefania Serafin 和 Rolf Nordahl。2013。意外位置漂移及其可能的解决方案。载于《2013 IEEE虚拟现实会议》（VR）。IEEE，IEEE，美国纽约市，121–122。页码 #13[114] Rui Nouchi、Yasuyuki Taki、Hikaru Takeuchi、Atsushi Sekiguchi、Hiroshi Hashizume、Takayuki Nozawa、Haruka Nouchi 和 Ryuta Kawashima。2014。为期四周的组合运动训练改善了健康老年人的执行功能、情景记忆和加工速度：一项随机对照试验的证据。《年龄》36，2（2014），787–799。页码 #2[115] Anderson Souza Oliveira、Priscila Brito Silva、Morten Enemark Lund、Dario Farina 和 Uwe Gustav Kersting。2017。平衡训练可增强受扰情况下侧向跨步变向任务中的运动协调能力。《骨科与运动物理治疗杂志》 47, 11 2017 853 862 2 ( )，–。页码 # Jorge Perez-Gomez 和 JA Calbet。改善垂直跳跃表现的训练方法。《运动医学与体能杂志》53，4（2013），339–357。页码 #3， #4[117] Dana P Piasecki、Kurt P Spindler、Todd A Warren、Jack T Andrish 和 Richard D Parker。与前交叉韧带相关的关节内损伤撕裂：高中运动员和业余运动员韧带重建后的研究结果：性别差异分析。《美国运动医学杂志》31，4（2003），601–605。第3页 ( )，–。#[118] Jeffrey A Potteiger、Robert H Lockwood、Mark D Haub、Brett A Dolezal、Khalid S Almuzaini、Jan M Schroeder 和 Carole J Zebas。1999。增强式训练 8 周后的肌肉力量与肌纤维特征。《力量与体能训练研究杂志》 13 1999 275 279 3 ( )，–。第页 # Michael E Powers。垂直跳训练：排球。《力量与体能训练》 18 1996 18 23 2 ( )，–。第页 # Harry Prapavessis 和 Peter J McNair。1999。跳跃技术指导与跳跃经验对地面反作用力的影响。《骨科与运动物理治疗杂志》29，6（1999），352–356。第3页[121] Judy Robertson、Andrew Macvean、Samantha Fawkner、Graham Baker 和 Ruth G. Jepson。2018。品味我们的错误：从 FitQuest 项目中学习。《国际儿童—计算机交互期刊》16（2018），55–67。https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2017.12.003 第2页[122] Sharon Stansfield、Daniel Shawver、Annette Sobel、Monica Prasad 和 Lydia Tapia。2000。虚拟现实系统的设计与实现及其在医疗急救人员训练中的应用。《Presence：远程操作与虚拟环境》9，6（ 2000），524–556。第3页[123] Dejan Stošić、Slavoljub Uzunović、Saša Pantelić、Saša Veličković、Marko Đurović 和 Danica Piršl。2019。运动计划对大学舞蹈专业学生协调能力和爆发力的影响。《大学学报·体育教育与运动》17，3（2019），579–589。第2页[124] Yusaku Sugiura、Tomoyuki Saito、Keishoku Sakuraba、Kazuhiko Sakuma 和 Eiichi Suzuki。2008。通过髋伸肌向心动作和腘绳肌离心动作发现的力量缺陷，会使精英短跑运动员易受腘绳肌损伤。《骨科与运动物理治疗杂志》38，8（ 2008 457 464 2），–。第页 # Ancret Szpak、Stefan Carlo Michalski 和 Tobias Loetscher。2020。使用 Beat Saber 进行运动游戏：虚拟现实后效应研究。JMIR Serious Games 22, 10 23 2020 19840 10 2196 19840 2， 4， 12 （10月），e。https://doi.org/。/ 第页 # # # Kazumoto Tanaka。D 使用虚拟玩家进行行动作重建，以辅助空手道训练。载于《2017 IEEE 虚拟现实会议（VR）》。IEEE，IEEE，美国纽约州纽约市， 395 396 3 –。第页 # Judith Tirp、Christina Steingröver、Nick Wattie、Joseph Baker 和 Jörg Schorer。2015。虚拟现实作为体育运动的理想学习环境——虚拟与真实掷飞镖的迁移研究。《心理测验与评估建模》 57, 1 2015 57 3 ( )，。第页 # Emanuel Todorov、Reza Shadmehr 和 Emilio Bizzi。1997。在虚拟环境中提供增强反馈可加快困难运动任务的学习。《运动行为杂志》 29, 2 1997 147 158 3 ( )，–。第页 # Unity Technologies。Unity。网站。检索于2020年10月26日，网址：https://unity.com/。第页# Stephen Uzor 和 Lynne Baillie。2014。调查老年跌倒者在家中长期使用运动游戏的情况。载于《计算机系统人为因素CHI会议论文集》（加拿大安大略省多伦多）（CHI '14）。计算机协会，美国纽约州纽约市，2813–2822。https://doi.org/ 10 1145 2556288 2557160 2 。/。第页 # Etienne van Wyk 和 Ruth de Villiers。采矿业虚拟现实训练应用。载于《第六届非洲计算机图形、虚拟现实、可视化与交互国际会议论文集》（南非比勒陀利亚）（AFRIGRAPH '09）。计算机协会，美国纽约州纽约市，53–63。https://doi.org/10.1145/1503454.1503465 第3页[132] Athanasios Vanezis 和 Adrian Lees。2005。垂直跳跃表现优劣者的生物力学分析。《人体工效学》48，11-14（2005），1594–1603。第页#[133] WanadevStudio。2020。Ragnaröck。游戏 [虚拟现实]。WanadevStudio。法国里昂。https://www.ragnarock-vr.com/home/。第页#[134] Peter Wilhelm 和 Dominik Schoebi。评估日常生活中的情绪：用于测量情绪三个基本维度的简短量表的结构效度、变化敏感性和信度。《欧洲心理评估杂志》 23, 4 2007 258 10 1027 1015 5759 23 4 258 9 ( )，。https://doi.org/。/ -。。。第页 # Greg J Wilson 和 Aron J Murphy。等长肌肉功能测试在运动员评估中的应用。《运动医学》 22, 1 1996 19 37 4 ( )，–。第页 # Greg J Wilson、Aron J Murphy 和 Anthony Giorgi。负重训练与增强式训练：对离心和向心力量产生的影响。《加拿大应用生理学杂志》 21, 4 1996 301 315 4 ( )，–。第页 # Dennis Wolf、Katja Rogers、Christoph Kunder 和 Enrico Rukzio。2020。JumpVR：基于跳跃的虚拟现实移动增强。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–12。https://doi.org/10.1145/3313831. 3376243 4 页 # 世界卫生组织。2020。身体活动。网站。检索于2022年9月5日，网址：https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity。第页# 2021 XRWorkout Inc. VRWorkout。游戏 [虚拟现实]。Michael Gschwandtner，奥地利维也纳。第2页

[140] Wenge Xu、Hai-Ning Liang、Qiuyu He、Xiang Li、Kangyou Yu 和 Yuzheng Chen。2020。重复测量设计实验的结果与指南：比较站立和坐姿全身手势式沉浸式虚拟现实运动游戏——被试内评估。*JMIR Serious Games* 8，3（2020 17972 10 2196 17972 13，14 年7月27日），e。[141] https://doi.org/。/ 第页 # # Yei-Yu Yeh 和 Louis D Silverstein。单目与立体呈现透视显示时的空间判断。*Human Factors* 34，5（1992），583–600。第3页 1992

[142] Soojeong Yoo 和 Judy Kay。2016 年。VRun：原地跑步虚拟现实运动游戏。载于第 *28* 届澳大利亚计算机与人类交互会议论文集（澳大利亚塔斯马尼亚州朗塞斯顿）（*OzCHI '16*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，562–566。https://doi.org/10.1145/3010915. 3010987 2 页 # Frank TJM Zaal 和 Reinoud J Bootsma。2011 年。虚拟现实作为研究知觉-行动的工具：跑动接飞球案例。*Presence* 20，1（2011），93–103。页 #3 [143]