

触觉反馈对动态 VR 行人环境中的回避行为和视觉探索的影响

Kyosuke Ishibashi¹, Atsushi Saito¹, Zin Y. Tun², Lucas Ray³, Megan C. Coram³,
Akihiro Sakurai¹, Allison M. Okamura³, and Ko Yamamoto¹

Abstract—虚拟现实 (VR) 中的人群模拟是一项强大的工具, 潜在应用包括紧急疏散训练和评估建筑物布局。虽然 VR 中的触觉反馈可以增强沉浸式体验, 但它对密集动态人群中行走行为的影响尚不清楚。通过一项用户研究, 我们探讨了在 VR 的拥挤人流中, 触觉反馈如何改变用户的行走动作。结果表明, 触觉反馈改变了用户的碰撞避免运动, 这体现在行走轨迹长度增加和骨盆角度变化上。当用户与非玩家角色 (NPC) 发生碰撞时, 其横向位置和骨盆角度的位移也有所增加, 即使 NPC 在视野范围内也是如此。触觉反馈还增强了用户对侧方和后方接近的 NPC 的感知和视觉探索能力。此外, 行走速度的变化也被触觉反馈所增强。这些结果表明, 触觉反馈提高了用户在 VR 环境中对碰撞的敏感度。

I. 介绍

人群模拟对于日常生活中的导航、建筑设计布局、紧急情况下的疏散引导以及踩踏风险评估都非常重要。预测拥堵失败可能导致严重的踩踏事故, 例如: 相生步行桥事件 (2001 年, 日本)、爱之游行灾难 (2010 年, 德国) [1] 和梨泰院踩踏事件 (2022 年, 韩国)。这些事故的发生是因为由于高输入人流速率和有限的出口导致空间内人群过于拥挤。一旦人们变得拥挤, 就很难从密集区域逃脱。为了防止此类严重事故发生, 重要的是要预测会发生多少拥堵, 并在人群变得拥挤之前适当引导人们。

在文献中, 有许多关于行人人群模拟的研究, 包括多智能体 [2]、连续介质 [3], [4], [5] 和元胞自动机 [6], [7], [8] 模型。在多智能体模拟中, 生成行人行为的一种方法是基于规则的方法。一个代表性方法是社会力模



(a) 真实环境

(b) 虚拟现实环境

Fig. 1. 用户研究中用于 VR 行人流模拟的触觉反馈实验场景: (a) 实际环境和 (b) VR 环境。(b) 中的红色字符表示 VR 模拟中的受试者运动。

型 [2]。特别是, 为局部碰撞避免行为 [9] 提出了一些方法。随着机器学习技术的进步, 数据驱动的方法也被用于人群模拟。许多方法使用长短期记忆 (LSTM) 型循环神经网络, 例如 Social LSTM [10] 和 Social-Scene-LSTM [11], 以及注意力机制 [12], [13]。

这样的人群模拟与虚拟现实 [14], [15], [16] 的结合是一种具有潜在应用的强大工具, 包括疏散训练 [17], [18] 和评估建筑布局 [19]。在 VR 系统中, 触觉反馈为用户提供了更沉浸式的体验。有许多研究探讨了用户行为如何随着触觉反馈在人群 VR 模拟中的变化。表 I 总结了这些研究的特点。Venkatesan 等人 [20] 进行了一项使用基于投影的 VR 系统和肩部触觉反馈的用户实验。Krogmeier 等人 [21] 通过测量电容性皮肤反应来研究用户的情绪唤醒, 假设一种情况: 用户佩戴头戴式显示器 (HMD) 和触觉背心静止站立, 而非玩家角色 (NPC) 走过他们身边。

Koiliias 等人 [22] 还使用了一种背心式的触觉套装, 并研究了单向行人流中的行走行为。Berton 等人 [23] 在假设 NPC 静止的情况下, 定量评估了手臂上带有触觉反馈的用户行走轨迹。Yun 等人 [24] 研究了在四个方向交叉流中手臂上的触觉反馈的影响, 尽管每个流相对稀疏。在这项研究中, 据报道触觉反馈提高了真实感, 但其他研究 [23] 报告称触觉反馈并未显著影响行走轨迹。此外, 先前的研究仅处理用户或

*This work is supported by JST PRESTO Grant Number JP-MJPR226A

¹Kyosuke Ishibashi, Atsushi Saito, Akihiko Sakurai and Ko Yamamoto are with Department of Mechano-informatics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan. ishibashi-kyosuke@yml.t.u-tokyo.ac.jp

²Zin Y. Tun is with the Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 94305, USA.

³Lucas Ray, Megan C. Coram and Allison M. Okamura are with the Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 94305, USA.

Related works	Density of NPCs	Pedestrian flow setting	User's behavior	Haptic feedback
Venkatesan et al. [20]	Low/High	Opposite to User	Standing	Arms
Krogmeier et al. [21]	One at a Time	Four Directions	Standing	Torso
Koiliias et al. [22]	High	Same as User	Walking	Torso
Berton et al. [23]	High	Stationary	Walking	Arms
Yun et al. [24]	Low	Opposite to User/Four Directions	Walking	Arms
Our study	High	Four Intersecting Flows	Walking	Arms and Torso

TABLE I

相关工作与本研究中实验设置的比较。

NPC 静止、单向行人流或多方向但稀疏的行人流的情况，而没有考虑用户穿越多方向且密集流动的更动态情况。

在这项研究中，我们调查了在这样的动态行人流动中触觉反馈的影响。据报道，人类的步态行为主要依赖于视觉感知 [25]，Berton 等人。[23] 认为这是触觉反馈没有影响用户行走路径选择的原因。然而，在动态情况下，由于有许多 NPC 从不同方向接近，并且头戴式显示器的视野有限，预期视觉信息会受到限制。我们制作了一件带有六个振动马达以实现全方位感知的触觉套装，并在 VR 模拟中进行了行人流动的用户研究。

II. 人类行人流 VR 模拟器

A. 行人轨迹模型

我们使用了由酒井等人创建的 VR 行人流模拟器。[26]。在这个模拟器中，NPCs 根据山本和冈田的行人模型移动 [27]，其中每个 NPC 的轨迹是通过类似于社会力模型 [2] 的基于规则算法生成的。2D 行走速度向量被给出为两种效应之和。一种是由一个二维速度场 [27] 给出的全局导航速度，在此我们可以设置一个参数用于基础速度，这是仅有一个行人时的理想行走速度。另一种是与其他 NPC（包括 VR 用户）避免碰撞的排斥速度。行走轨迹通过积分行走速度获得。这种基于速度的建模方式使我们能够轻松为不同的实验条件设定总体行走速度。

B. 运动匹配

通过 Büttner 和 Clavet 提出的运动匹配算法，从二维行走轨迹生成全身 NPC 运动 [28]。运动匹配算法使用两个数据库：一个由表示角色状态的特征向量 \mathbf{x} 组成的匹配数据库，以及一个由表示角色运动的姿态

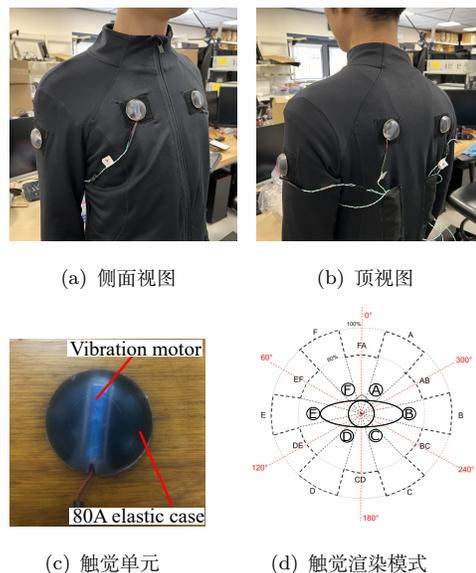


Fig. 2. 用于渲染受试者与虚拟角色之间触觉碰撞的触感穿戴套装。这些单元附着在胸部、上臂和上背部的左右两侧。

向量 \mathbf{y} 组成的动画数据库。我们计算一个表示当前状态的搜索向量 \mathbf{q} ，并使用匹配数据库根据 \mathbf{q} 和 \mathbf{x} 之间的距离来确定合适的帧 f 。

$$f = \arg \min_k \|\mathbf{q} - \mathbf{x}_k\| \quad (1)$$

通过在动画数据库中搜索与帧 f 对应的姿势向量，我们可以高效地获得角色的姿态。

为了降低计算成本并实现实时渲染，在 HMD 视图之外的 NPC 省略了运动匹配，保持可见 NPC 的动画真实 [26]。

III. 实验设计

A. 硬件

1) 计算机：我们使用 ZEFT PC（规格：Core i9-14900K，MSI RTX4090 Gaming X Slim，128GB）来

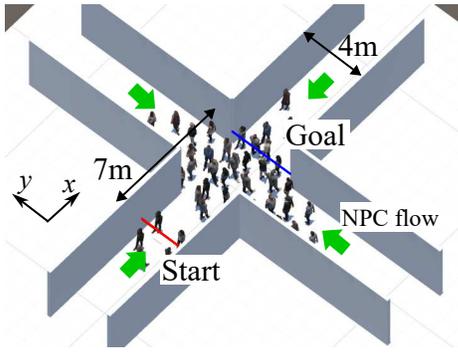


Fig. 3. 鸟瞰 VR 环境。在实验中，被试者被指示从红色条表示的起始位置走到蓝色条表示的目标位置，在此过程中需避开 NPC。

计算行人轨迹模型和运动匹配。

2) 头戴显示 (HMD) : 我们使用 Meta Quest2 将参与者沉浸在虚拟环境中 (规格: 120 Hz, 120°FoV, 1832×1920 分辨率)。

3) 运动捕捉: 为了在 VR 中提供一个自化身, 我们使用了 Mocopi[29], 它是一个基于 IMU (惯性测量单元) 的动作捕捉系统。Mocopi 通过连接到头部、手腕、脚踝和臀部的六个小型传感器来估计人体关节角度。

在实验中, 使用 Mocopi 获得的关节角度数据将用户的自我化身可视化以实现沉浸式体验。由于通过 Mocopi 获得的头部位置也包含误差, 我们使用 HMD 的测量值来渲染化身的头部位置。

4) 触觉设备: 为了在主题和虚拟角色之间实现触觉碰撞, 我们开发了一种触觉可穿戴套装, 如图 2 所示。每个触觉单元由一个振动电机和用邵氏 A80 橡胶材料 3D 打印的外壳组成。这些单元安装在胸部左右两侧、上臂以及背部上方。这种布局可以向用户提供全方位的碰撞信息, 而大多数相关工作仅提供肩部或胸部/背部的触觉反馈, 如表 I 所总结。根据碰撞 NPC 的方向, 触觉套装可以通过激活每次碰撞最多两个电机, 在 30 度增量下生成 12 种反馈模式。我们使用 ESP32 的蓝牙通信来驱动触觉单元。

B. 虚拟现实环境

图 3 展示了用户研究中使用的 VR 环境的俯视图。在实验的每次试验中, 受试者被指示从红色条表示的起始位置走到蓝色条表示的目标位置, 在走的过程中要避开 NPC。走廊的宽度为 4 米, 起始位置和目标位置之间的距离为 7 米。有四个行人流, 用绿色箭头显示, 分别朝 $\pm x$ 和 $\pm y$ 方向移动。每个流动中的 NPC

是通过第 II 节概述的方法生成的。每个速度向量场的基础行走速度被设定为 1.2 米/秒, 并且每 1.3 秒生成一个 NPC。这些值是从初步实验的结果中确定的。

图 1 展示了用户研究在 (a) 现实和 (b) VR 环境中的实验场景。(b) 中的红色字符表示由 Mocopi 和 HMD 测量的主体运动。当主体与其他 NPC 之间的距离小于 0.65 米时, 会根据碰撞方向触发触觉反馈。我们使用 RenderPeople Inc. 的 Mega Bundle Casual Rigged 001 - 005 作为 NPC 外观数据集。

C. 实验程序

我们在两个地点对二十名未支付报酬的受试者 (6 名女性和 14 名男性) 进行了实验: 9 人在斯坦福大学的斯坦福机器人中心, 另外 11 人在东京大学机械信息学系的行为工作室。实验程序的伦理批准由斯坦福大学 (协议编号 #22514: “虚拟环境与遥操作系统中的触觉”) (需确认), 以及东京大学信息科学与技术研究生院的人体研究委员会 (批准号: 22-408) 提供。

受试者被分为两组。在两组中, 每位受试者进行了 10 次试验。

- 在**第一组**中, 第一阶段包括 1 次练习后跟着 5 次没有触觉反馈的试验 (无触觉反馈); 最后一阶段包括 1 次练习后跟着 5 次有触觉反馈的试验 (触觉技术)。
- 在**第二组**中, 第一个环节是 1 次练习接着 5 次触觉技术的试验; 最后一个环节是 1 次练习接着 5 次无触感技术的试验。

每个阶段结束后, 受试者填写了表 II 中列出的问卷进行定性评估。

D. 假设与测量

- H1) 触觉反馈不会改变受试者的行走行为, 包括避碰行为, 因为人类的移动主要依赖于视觉感知 [25]。
- H2) 触觉反馈增加了受试者的视觉探索, 因为他/她可以注意到 NPC 从视野外接近。
- H3) 振动反馈会降低受试者的行走速度, 因为他/她在试图更小心地行走 [22]。

对于 H1, 我们分析了从目标方向出发的行走轨迹和骨盆角度 (第 V-A 节)。对于 H2, 我们分析了头部相对于骨盆的角度 (第 V-B 节)。对于 H3, 我们计算了受试者的平均行走速度及其标准差 (第 V-C 节)。此

外,当受试者与非玩家角色发生碰撞时,我们分析了他们在碰撞后的即时动作。

IV. 结果

A. 平均步行行为

为了验证假设,我们计算了以下各项的平均值:(a) 步行轨迹长度,(b) 骨盆角度朝向目标方向的位移,(c) 头部相对于骨盆的角度,(d) 行走速度以及(e) 其标准差,和(f) 受试者的碰撞次数。图4显示了这些指标的结果,其中红色和蓝色条形分别表示无触感技术和触觉技术情况下的结果。在每个图表中,左、中、右三组条形分别表示所有受试者、第一组以及第二组的平均值。误差线表示标准误,并且 p 值显示在每个图的左上角。

请注意,一些相关工作 [23] 使用肩部旋转角度作为回避动作的度量。在这项研究中,我们采用了骨盆旋转角度,因为从 Mocopi 获得的肩部角度存在误差。

B. 碰撞避免与视觉探索的瞬时响应

为了进一步探索 H1 和 H2,我们分析了主体在与 NPC 碰撞后立即的反应,重点关注碰撞后一秒内的数据。图5显示了 (a) 前后和 (b) 侧向位移,以及碰撞后的 (c) 骨盆和 (d) 头部角度的位移。

对于 (a) 前向位移,我们计算了在碰撞发生后一秒钟时主体在 x 轴上的位置与碰撞时刻的位置之间的位移,并绘制其在所有碰撞中的平均值。对于 (b) 横向位移,我们计算了在 y 轴上的位移的绝对值及其平均值。对于 (c) 骨盆和 (d) 头部的角度,我们在碰撞后的一秒钟内提取最大位移并计算其平均值。注意,头部角度的值是从骨盆到 HMD 的相对角度,用于表示颈部旋转角度以进行视觉探索。

在每个图中,我们也计算了以下五种碰撞情况的平均值:一种是 NPC 从视野内部或外部接近的情况(在视图中和外视图),以及三种 NPC 从前、侧或后方接近的情况(前面,边或后退)。

C. 自报等级

我们还通过一个五点李克特量表(1=强烈不同意,5=强烈同意)的问卷对参与者在 VR 模拟中的体验进行了定性评估。共有 12 个问题分为四类:临场感、具身化、真实性和意识。

表 II 列出了条件触觉技术和无触觉的问题集和分数。结果显示显著差异 ($p < 0.05$) 的部分在表格中用粗体突出显示。

V. 讨论

A. 避让动作

图 4(a) 和 (b) 显示,与无触觉反馈相比,在触觉技术中步行轨迹长度以及骨盆角度朝目标方向的位移增加(轨迹长度增加了 $p = 0.00001$,骨盆角度位移增加了 $p = 0.005$)。图 6 展示了受试者(用红线和圆圈表示)的行走轨迹示例,在 (a) 无触感技术情况和 (b) 力反馈技术情况下。在图中,蓝色和绿色的圆圈指示 NPC 的位置,而黑色线条代表它们的行走方向。可以观察到,触觉技术中的轨迹比无触感技术更长且更加曲折。

详细检查避碰行为,我们观察到在触觉技术中前方位移显著减少,如图 5 (a) ($p = 0.002$) 所示,而横向位移增加,如图 5(b) ($p = 0.006$) 所示,除了侧面和后退情况。特别在有 NPC 从前方接近的情况下,这一结果符合我们的直觉,即用户主要通过横向移动来避免碰撞。这一结果还表明,触觉反馈增强了这种避让动作。在图 5(c) 中,观察到骨盆角度位移在触觉技术 ($p = 0.003$) 增加,这表明通过旋转躯干,触觉反馈增强了避让动作。

这些结果不支持 H1,但表明触觉反馈改变了受试者的行为,使他们更加努力地避免与其他 NPC 碰撞。值得注意的是,在外视图和在视图中情况下都观察到了显著差异。这表明即使接近的 NPC 在视野内,触觉反馈也增强了回避动作。我们认为可能有些情况下这样的 NPC 没有被受试者识别到。因此,有可能触觉反馈支持了用户对这种未被识别的 NPC 的感知。

B. 可视化探索

从图 4(c),相对于骨盆的平均头部角度在触觉技术 ($p = 0.047$) 中增加。此外,如图 5(c) ($p = 0.035$) 所示,在瞬时响应中此指标也有所增加。这支持 H2: 触觉反馈增强了视觉探索,使受试者更有可能环顾四周。

C. 行走速度

从图 4(d) 中,我们发现平均行走速度没有显著差异,这不支持 H3 ($p = 0.53$)。然而,图 4(e) 表明行走速度的标准差在触觉技术 ($p = 0.0004$) 中增加了。我们认为这是因为被试者在检测到碰撞的那一刻倾向于

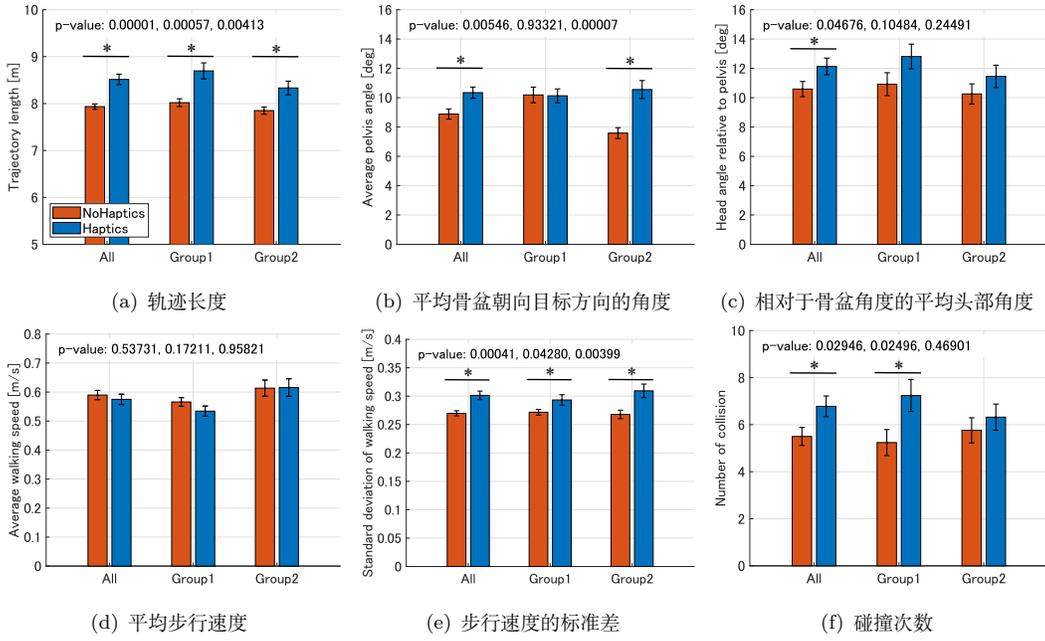


Fig. 4. 虚拟实验的行走动作数据。蓝色条形代表试验触觉技术的数据，而红色条形则显示了试验无触觉的数据。在每个图中，左侧条形组呈现所有受试者的数据，中间条形组展示了第 1 组（如第 III-C 节所述）受试者的数据，右侧条形组显示了第 2 组受试者的数据。误差线表示标准误，显著的触觉条件的 p 值在每个图的左上角显示，并且当触觉和无触觉之间存在显著差异时，在这些组上方会显示出水平线，阈值为 $p < 0.05$ 。

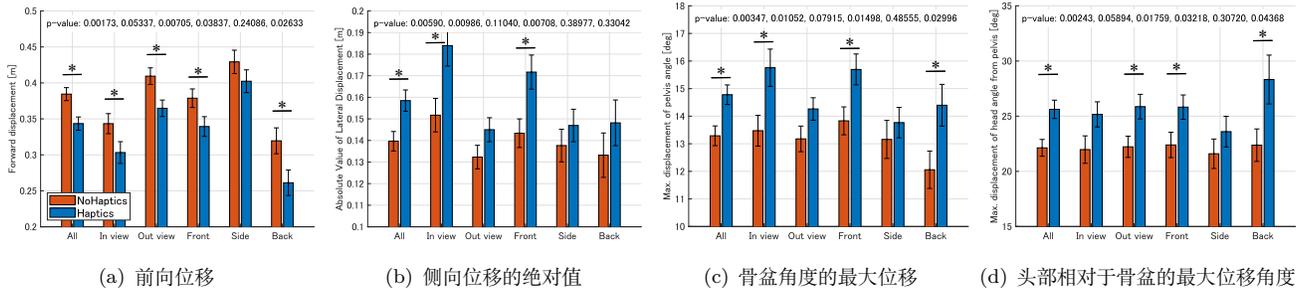


Fig. 5. 避碰运动：(a) 前进和 (b) 横向位移，碰撞后 (c) 骨盆和 (d) 头部角度的位移。对于头部和骨盆的角度，我们分析了碰撞后一秒钟期间的最大头部或骨盆角度。误差棒表示标准误差，触觉条件显著性的 p 值显示在每个图的左上角，并且当 Haptics 和 NoHaptics 组之间的差异显著时，在这些组上方显示水平线，阈值为 $p < 0.05$ 。

停止或让步，这使得行走速度偏差变大。这一结果表明触觉设备增强了被试者对碰撞的敏感性。

D. 问卷调查

表 II 中的结果表明，带有触觉反馈的受试者对从侧面和身后接近他们的 NPC 更加警觉，支持 H2。虽然先前的研究 [23] 没有发现虚拟现实中的临场感存在显著差异，但我们的研究在这个方面观察到了一些细微的不同。这表明，在密集且动态的人流中，触觉反馈会增强临场感。Q3 的差异也解释了受试者避免行为的不同之处，这一点也不支持 H1。与先前的研究类似，我们没有发现虚拟现实中的具身感存在显著差异。此

外，我们观察到模拟的真实感与现实生活动作相比没有差别，这仍然是未来研究的一个领域。

E. 碰撞次数

从图 4(f) 可以看出，触觉技术 ($p = 0.029$) 中的碰撞次数增加。我们认为这是因为触觉技术中增加的规避动作使得受试者更有可能与这种密集且动态的行人流中的其他 NPC 发生碰撞。

VI. 结论

在这项研究中，我们调查了在虚拟现实环境中稠密和动态的行人流中的触觉反馈效果。结果总结如下：

Categories	Questions	非触觉	力反馈技术
存在	Q1: I felt like I was in a real crowded space	3.7 ± 0.2	4.1 ± 0.1
	Q2: I felt stressed while walking through the environment	3.8 ± 0.2	4.2 ± 0.2
	Q3: 我担心会与非玩家角色发生碰撞	3.3 ± 0.3	4.2 ± 0.1
实施方式	Q4: The movements of the virtual body felt like my own	3.9 ± 0.2	4.1 ± 0.2
	Q5: I felt like I was in control of the virtual body's movements	4.0 ± 0.2	4.3 ± 0.2
	Q6: The movements of the virtual body were synchronized with my own movements	4.2 ± 0.2	4.6 ± 0.1
现实	Q7: I think my movements were similar to how I would behave in a real situation	3.5 ± 0.2	4.0 ± 0.2
	Q8: I felt like the NPCs were actively trying to avoid me	2.3 ± 0.2	2.2 ± 0.2
	Q9: I was able to walk in sync with the other NPCs	3.1 ± 0.2	3.1 ± 0.2
意识	Q10: 我注意到 NPC 从侧面或背后接近我	2.9 ± 0.3	4.0 ± 0.3
	Q11: 我注意到了来自侧面或我身后的 NPC 们	3.0 ± 0.2	3.9 ± 0.2
	Q12: I think I was able to successfully avoid collisions with NPCs	2.5 ± 0.2	2.9 ± 0.2

TABLE II

定性评估问卷（1=强烈不同意，5=强烈同意）。结果显示显著差异（ $P < 0.05$ ）的在表中以粗体突出显示。

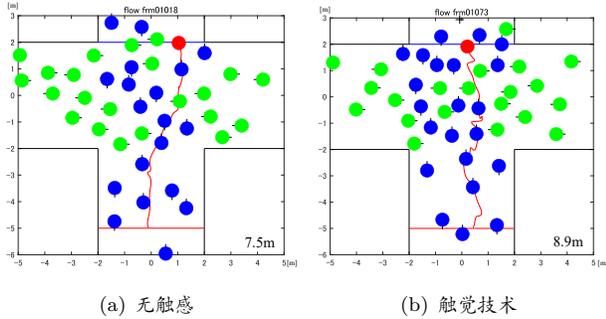


Fig. 6. 示例中主体的行走轨迹（用红线和圆圈表示）在（a）无触感和（b）触觉技术情况下。蓝色和绿色圆圈表示 NPC 的位置。

- 1) 力反馈增加了回避动作，因为行走轨迹长度和骨盆角度位移显著增加。碰撞回避的即时响应也显著提高，即使 NPC 在视野范围内也是如此。这一结果表明力反馈支持了用户对 NPC 的视觉感知。
- 2) 触觉反馈增强了视觉探索，因为头部相对于骨盆的角度显著增加。这一结果表明受试者注意到 NPC 从侧面和后面接近，这在问卷中也有观察到。
- 3) 在我们的实验中，触觉反馈并未显著改变行走速度。然而，其标准差增加，这表明触觉反馈增强了受试者对碰撞的敏感性。

REFERENCES

- [1] H. Zhao et al., "Assessing crowd management strategies for the 2010 love parade disaster using computer simulations and virtual reality," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 17, 6 2020.
- [2] D. Helbing et al., "Social force model for pedestrian dynamics," *Physical review E*, vol. 51, pp. 4282–4286, 1995.
- [3] L. F. Henderson, "The Statistics of Crowd Fluids," *Nature*, vol. 229, pp. 381–383, 1971.
- [4] A. Treuille et al., "Continuum Crowds," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no. 3, 2006.
- [5] K. Yamamoto et al., "Control of swarm behavior in crossing pedestrians based on temporal / spatial frequencies," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 9, pp. 1036–1048, 2013.
- [6] V. J. Blue et al., "Modeling Four Directional Pedestrian Movements," *Transportation Research Record*, vol. 1710, pp. 20–27, 2000.
- [7] M. Asano et al., "Pedestrian Simulation Considering Stochastic Route Choice and Multidirectional Flow," in *International Symposium on Transport Simulation*, 2006.
- [8] L. Chen et al., "Modeling pedestrian flow accounting for collision avoidance during evacuation," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 82, pp. 1–11, 2018.
- [9] J. V. den Berg et al., "Reciprocal Velocity Obstacles for Real-time Multi-agent Navigation," in *Proc. of the IEEE ICRA*, 2008, pp. 1928–1935.
- [10] A. Alahi et al., "Social lstm: Human trajectory prediction in crowded spaces," 2016, pp. 961–971.
- [11] H. Xue et al., "Ss-lstm: A hierarchical lstm model for pedestrian trajectory prediction," vol. 2018-January. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 5 2018, pp. 1186–1194.
- [12] A. Vemula et al., "Social attention: Modeling attention in human crowds." [IEEE], 2018, pp. 4601–4607.
- [13] A. Sakurai et al., "Spatio-temporal multi-scale pedestrian flow model by using attention module." IEEE Computer Society, 2024, pp. 1842–1847.
- [14] B. Ulicny et al., "Crowd simulation for interactive virtual environments and vr training systems," 2001, pp. 163–170. [Online]. Available: <http://ligwww.epfl.ch/Branislav.Ulicny@epfl.ch,Daniel.Thalmann@epfl.ch>
- [15] A. H. Olivier et al., "A virtual reality platform to study crowd behaviors," vol. 2. Elsevier, 2014, pp. 114–122.

- [16] M. G. Nelson et al., “Within a virtual crowd: Exploring human movement behavior during immersive virtual crowd interaction.” Association for Computing Machinery, Inc, 11 2019.
- [17] M. Zhang et al., “Human decision change in crowd evacuation: A virtual reality-based study,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, 6 2023.
- [18] J. Zhang et al., “An improved social force model (isfm)-based crowd evacuation simulation method in virtual reality with a subway fire as a case study,” *International Journal of Digital Earth*, vol. 16, pp. 1186–1204, 2023.
- [19] S. M. Ventura et al., “Evaluation of building use scenarios by crowd simulations and immersive virtual environments: a case study,” 2018, pp. 554–561.
- [20] R. K. Venkatesan et al., “Haptic feedback in a virtual crowd scenario improves the emotional response,” *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 4, 2023.
- [21] C. Krogmeier et al., “Human – virtual character interaction: Toward understanding the influence of haptic feedback,” vol. 30. John Wiley and Sons Ltd, 5 2019.
- [22] A. Koiliias et al., “I feel a moving crowd surrounds me: Exploring tactile feedback during immersive walking in a virtual crowd,” vol. 31. John Wiley and Sons Ltd, 7 2020.
- [23] F. Berton et al., “Crowd navigation in vr: Exploring haptic rendering of collisions,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 28, pp. 2589–2601, 7 2022.
- [24] H. Yun et al., “Exploring the role of expected collision feedback in crowded virtual environments.” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 472–481.
- [25] A. E. Patla, “Understanding the roles of vision in the control of human locomotion,” *Gait & Posture*, vol. 5, pp. 54–69, 1997.
- [26] A. Sakurai et al., “Vr pedestrian flow simulator by real-time 3d motion reconstruction for multiple characters,” in *IFTToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*. Springer, 2023, pp. 266–275.
- [27] K. Yamamoto et al., “Control of swarm behavior in crossing pedestrians based on temporal/spatial frequencies,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 9, pp. 1036–1048, 2013.
- [28] M. Büttner et al., “Motion matching-the road to next gen animation,” *Proc. of Nucl. ai*, vol. 2015, no. 1, p. 2, 2015.
- [29] SONY, “mocopi,” Accessed January 27, 2025, <https://www.sony.jp/mocopi/>.