标题页

提升自动化港口安全：一项关于时间压力下行人与自动驾驶车辆交互的虚拟现实研究、视觉限制和车辆尺寸

Yuan Che[1,2], Mun On Wong[3], Xiaowei Gao[4], Haoyang Liang[5], Yun Ye[1,2,6†]

[1] 宁波大学海事与交通学院，中国宁波[2] 东南大学现代城市交通技术协同创新中心，中国南京[3] 澳门大学土木与环境工程系，中国澳门[4] 帝国理工学院地球科学与工程系，英国伦敦[5] 同济大学交通工程学院及教育部道路与交通工程重点实验室，中国上海[6] 帝国理工学院交通工程与建模中心、土木与环境工程系，英国伦敦

† **通讯请联系**： yun.ye25@imperial.ac.uk

致谢： 本研究获得国家自然科学基金委员会（项目编号：72501150）、浙江省自然科学基金（项目编号：LQN25E080011）、宁波市自然科学基金（项目编号：2024J440）以及国家海桥安全与智能运营“111”中心（项目编号：D21013）资助。资助方未参与研究设计、数据收集与处理、论文撰写或发表决策。

作者贡献声明

Yuan Che： 概念构思、数据整理、正式分析、调查、方法论、可视化、撰写—初稿。**Mun On Wong：**可视化、撰写—审阅与编辑。**Xiaowei Gao：**验证、撰写—审阅与编辑。**Haoyang Liang：**撰写—审阅与编辑、资源。**Yun Ye：**概念构思、项目管理、经费获取、监督、资源、撰写—审阅与编辑。

利益冲突声明

作者声明，他们不存在可能被认为会影响本文所报告研究工作的已知竞争性经济利益或个人关系。

提升自动化港口的安全：在时间压力、视觉限制和车辆尺寸变化条件下研究行人与自动驾驶车辆交互的虚拟现实研究

摘要

自动驾驶能够提高交通效率，但在复杂港口环境中也带来了安全挑战。本研究考察了环境因素、交通因素和行人特征如何影响港口自动驾驶车辆与行人之间的交互安全。通过对典型港口场景进行虚拟现实（VR）仿真，33名参与者在不同能见度、车辆尺寸和时间压力条件下完成了行人过街任务。结果表明，低能见度条件、部分遮挡以及较大的车辆尺寸会显著增加感知风险，促使行人等待更长时间并接受更大的间隙。具体而言，与大型自动驾驶卡车编队交互时，行人倾向于接受更大的间隙并等待更长时间，这反映了他们因感知到更高威胁而表现出的谨慎程度。然而，局部障碍物也会缩短侵入后时间，压缩安全余量。年龄、性别和驾驶经验等个体属性进一步影响决策，而时间压力会削弱补偿行为并增加风险。基于这些发现，本文提出了多项安全策略，包括在多个视角安装广角摄像头、实现实时车路通信、改善港口照明和标识，以及加强行人安全培训。本研究为提升基于视觉的自主系统在港口环境中的安全性和部署提供了切实可行的建议。

关键词：港口安全；行人与自动驾驶车辆交互；虚拟现实；时间压力；视觉限制；车辆尺寸。

1. 引言

随着全球物流的快速发展和智慧港口建设的不断提速，自动驾驶已成为提升港口物流作业效率、降低成本的有前景方案（Vaca-Recalde 等，2024年）。与开放道路环境复杂多变的特点不同，港口环境相对封闭且结构化，因此自动驾驶的实施难度相对较低（Fiedler 等，2019年）。由于作业流程明确，港口被视为自动驾驶最有望率先实现产业化部署的高价值情境。在港口推广自动驾驶，有助于显著降低人力成本、提高作业效率并提升安全性（Qin 等，2020）。

随着港口逐步迈向全面无人化作业，在可预见的未来，工人和自动驾驶车辆仍不可避免地会继续共享作业空间，这类冲突也依然普遍存在（青岛西海岸新区政府，2022年；Son 等，2021）。近期部署的无人驾驶集装箱卡车和场内牵引车经常出现在混合交通场景中，机器与人员近距离作业。例如，在2022年的一个荷兰码头试点项目中，自动驾驶电动场内牵引车在常规作业期间与其他卡车、车辆和行人一同作业（Terberg Special Vehicles，2022年）。在中国，梅山港和妈湾港等主要枢纽也出现了类似做法：无人驾驶车辆与地面人员在堆场与运输区域共存（人民网，2025年；Häne 等，2017年；Cheng 等，2021年；Shit，2020年）。

然而，将自动驾驶车辆（AV）引入港口运营也带来了独特的安全要求和挑战。首先，受环境和基础设施因素的影响，港口环境往往能见度较差（Lucio 等，2024年；Vaquero 等，2018年）。其中，两种截然不同的视觉受限形式尤为常见，并会带来不同类型的挑战：全局性（对称性损害）和局部性（非对称）障碍物。全局性视觉损害是指雾、大雨和夜间黑暗等环境条件，它们会均匀降低自动驾驶车辆传感器和行人的可视距离。这些

环境条件会削弱深度感知、模糊运动线索，并降低行人和自动驾驶车辆在过街时评估空间和时间间隙的信心（Wang 等，2025年）。相比之下，堆叠集装箱、停放的拖车、起重机或施工设备等局部障碍物，会形成具有空间不对称性的视觉屏障，阻挡特定方向上的视线。这些障碍物往往导致检测延迟，以及车辆或行人突然出现，大幅增加冲突发生的可能性（Yang 等，2016年；Ge 等，2020年）。例如，在英国港口，超过30%的事故与运输有关，其中常有工人在货场因大型物体周围实时可见性有限而遭车辆撞击（HSE，2024年；HSENI，2020年）。全局性视觉损害会削弱整体态势感知，而局部障碍物则会造成突然、不均匀且难以预判的盲区（Yoon 等，2025年；Macedo 和 Apolinario，2021年）。这两种视觉限制并存，对港口环境中行人与车辆的安全交互构成了复合威胁。

此外，港口中的车辆尺寸可能会加剧安全风险。自动驾驶集装箱卡车和堆场起重机比普通汽车大得多、重得多，这意味着一旦发生碰撞，后果很可能严重得多（Amini 等，2022年）。统计综述发现，与被乘用车撞击相比，行人被重型车辆撞击时死亡的可能性高出 40–50%（Robinson 等，2025年）。除了身体伤害，车辆尺寸也会影响人类行为和风险感知。面对大型卡车或车队时，行人往往会更加谨慎，并留出更长的间隙，这反映出他们感知到的威胁更大（Ye 等，2024年）。在港口环境中，这种动态可能导致高风险决策——例如，如果一辆逼近的巨型自动驾驶车辆引发恐惧或紧迫感，工人可能会犹豫过久，或突然冲出去。

港口物流作业受到严格的时间要求约束，往往受船期、货物吞吐量配额和实时车辆调度系统的驱动。在这种高需求环境中，时间压力成为无处不在的因素，影响着人机行为（HumanElement Industry Group, 2023）。在港口环境中工作的行人可能面临隐性或显性的压力，需要快速穿过车道；尤其是在需要与自动驾驶车辆反复交互的作业场景中。众所周知，时间压力会缩短决策时间、减少信息扫描，并

抑制谨慎行为（Hogenboom et al.,2021），这些因素共同损害过街决策的质量（Dhoke 和 Choudhary, 2025年; Guo et al., 2024年）。此外，自动驾驶系统本身经过效率优化，除非明确采用以人为中心的交互协议进行设计，否则可能会优先确保遵守计划。因此，时间约束与另外两个因素——能见度受损和大型车辆出现——相互作用，构成高风险三重因素。

这些挑战凸显了在自动化港口环境中系统研究行人行为与风险感知的迫切性。鉴于港口中行人与–车辆交互具有动态性、视觉受限且风险极高等特点，传统观察方法往往难以满足需求。为弥补这一不足，本研究采用沉浸式虚拟现实（VR）技术。这是一种经过验证、安全且可重复的方法，可用于在受控但逼真的情境中探索人类行为（Ye 等，2020；Ye 等，2023；Wong 等，2023；Ye 等，2024）。本研究提出一种基于虚拟现实的实验方法，用于探究港口环境中行人与–自动驾驶车辆的交互行为及风险。通过模拟典型的港口交通状况，虚拟现实平台能够精确操控车辆尺寸、天气、照明、视觉障碍物和时间压力等关键环境因素，并收集和分析多项行为指标，包括间隙接受、侵入后时间（PET）、等待时间、过街时间和主观风险感知，从而揭示行人如何根据环境复杂性和运营需求调整决策。本研究的主要贡献如下：

◆ 据我们所知，本研究是最早在港口环境中系统考察行人与自动驾驶车辆交互行为及风险的研究之一，并探讨了时间压力、视觉限制和车辆尺寸的效应。

◆ 本研究采用沉浸式基于虚拟现实的实验方法模拟高风险港口条件，从而能够开展受控、可重复且安全的实验，量化关键影响因素对行人行为的效应。

◆ 本研究为港口环境中的行人行为提供了实证证据，揭示了环境因素和车辆相关因素如何

影响攸关安全的决策。这些发现为优化自动驾驶车辆的感知算法、决策模型、行人与车辆交互设计，以及港口环境中的安全管理策略提供了科学依据。

本文其余部分安排如下：第2节回顾相关文献。第3节介绍方法论，包括虚拟现实实验、数据收集和数据分析。第4节呈现研究结果。第5节讨论主要发现及其意义。第6节总结本研究，并提出未来研究方向。

2. 文献综述

2.1 视觉限制与风险感知

低能见度条件会显著削弱行人准确感知和判断交通状况的能力，进而影响风险评估。例如，夜间照明不足会损害视觉处理能力，导致行人误判驶近车辆的速度（Balasubramanian 和 Bhardwaj，2018年）。同样，浓雾或霾会提高感知风险。近期的沉浸式仿真研究发现，行人在雾天条件下过街时报告的风险更高（Kummeneje 和 Rundmo，2019年；Ferenchak 和 Abadi，2021年），尤其是在黄昏时分（Zhu 等人（2025））。这些发现与关于态势感知的人因理论一致：当关键视觉线索缺失或模糊时，行人的感知信心会降低，可能因此谨慎犹豫，也可能在判断安全间隙时出错。事实上，能见度下降还会消除或遮蔽非语言沟通信号（例如眼神接触或车辆信号），使行人更难决定何时从驶近车辆前方穿过；当车辆为缺少人类驾驶员信号的自动驾驶车辆时，这一问题尤其突出。例如，Hamka（2017年）通过故障树分析指出，行人与集装箱车辆共用的区域是港口码头的关键风险点。类似地，Zhu 等人（2025）发现，在低照度条件下，行人与迎面驶来的车辆互动时往往会感知到显著更高的危险，因此表现出更保守的间隙接受行为。

环境中的另一项相关约束是物理遮挡，它会阻挡行人和车辆的视线。关于道路过街的既有研究表明，常见的遮挡（例如停放车辆、建筑物）会显著增加

危险，因为它们会让行人直到最后一刻才看到驶近的交通（Morrongiello 等人，2018年；Zhu 等人，2021年）。在港口环境中，遮挡问题更为严重：海运集装箱堆、 大型货物装卸设备以及起重机结构会形成不断移动的盲区，并造成比典型城市环境广泛得多的视线阻碍。这些港口特有的障碍物可能使行人直到很晚才看到驶来的自动驾驶车辆（也会使车辆的传感器直到很晚才检测到行人）。尽管人们普遍认识到，遮挡会损害行人的态势感知和风险感知，但几乎没有研究在海港或码头情境下考察这一问题。尽管大量研究已阐明视觉受限如何影响城市交通中的行人安全，但人们对这些效应如何延伸至港口环境知之甚少；在港口环境中，遮挡往往规模更大、具有动态性且空间分布不对称，会带来独特的感知与行为挑战，而这些挑战尚未得到实证研究。

2.2 车辆尺寸与行为反应

实证证据证实，行人会根据驶近车辆的尺寸调整过街行为。在交通实验中，行人在小型车辆前过街时，往往会接受较小的间隙（较短的车头时距）；而面对公共汽车或卡车时，则需要更大的间隙（Petzoldt等，2017年）。换言之，紧凑型汽车驶近时，行人可能会趁着仅剩的一点时间迅速穿过马路；但如果迎面驶来的是大型卡车，他们就会等待更大的间隙。这种行为差异体现在侵入后时间（PET）上，该指标用于衡量过街后的安全裕度。面对较小车辆时，更常出现侵入后时间较短、风险较高的情况。从感知角度看，众所周知的“尺寸–到达效应”可能是导致这一模式的原因之一：与较小车辆相比，人们会觉得大型车辆到达得更快（且显得更具逼近感）（Petzoldt等，2017年），从而促使行人更加谨慎（Yu等，2020年）。此外，大型车辆会引发更强的感知威胁，这种心理上的阻碍与车辆尺寸相关。相比之下，人们直觉上认为小型车辆威胁较小，因此可能会做出更大胆的过街决策（Petzoldt等，2017年）。这些行人–车辆互动动态—由车辆尺寸和感知风险驱动—根植于可供性理论和风险感知研究之中。该

大型机器逼近时带来的压迫感意味着潜在伤害更大，促使行人增加安全缓冲距离。

在港口环境中，车辆的尺寸和外形差异极大，其中包括一些在道路上行驶的最大型机械。跨运车、门式起重机和场内牵引车等港口专用车辆不仅远大于普通卡车或汽车，还会在具有特定行驶模式的半结构化环境中作业。可以预期，行人（例如步行的港口工人）可能会对这些体型庞大的车辆做出强烈反应，表现出极为保守的间隙接受行为或回避行为。然而，关于行人在此类港口车辆（无论由人工驾驶还是自动驾驶）周围的过街行为，实证研究仍然有限。尽管先前研究表明，车辆尺寸会显著影响行人的谨慎程度和安全裕度，但现有研究大多未能考量在港口作业的超大型工业车辆。这一缺失限制了我们对这些高风险环境中行人—车辆协调的理解。

2.3 时间压力与决策偏差

有充分文献记载，时间压力会使行人更倾向于做出风险更高的决策。在时间压力下——例如，迟到或试图赶上截止时间时——行人往往会缩短观察来车交通的时间，也更可能接受车辆之间较小的间隙（Morrongiello 等人，2015）。在虚拟过街实验中，相较于没有时间压力的情形，受到时间约束的参与者评估交通状况所花的时间更少，选择了危险性更高的间隙，并以极小的安全裕度过街（Morrongiello 等人，2015）。

一项近期的系统综述同样指出，“赶时间”是违规过街行为最有力的预测因素之一（Dhoke andChoudhary, 2023）。这表明，紧迫性可能会压过通常的谨慎行为，这或许是因为决策策略发生了转变：人在压力之下，更倾向于依赖快速启发式，并在当下将节省时间看得比安全更重要——这与压力下有限理性的理论模型相符。值得注意的是，时间压力对行人冒险行为的影响似乎在不同年龄群体和情境中都具有一致性（Morrongiello et al., 2015），这表明它是一种具有普遍性的

人为因素，而非孤立现象。不过，该领域的文献仍然有限。现有研究大多聚焦于受控模拟中的简单路段中部横穿，鲜有研究直接考察紧迫性如何影响行人行为中更细致的方面，例如在现实情境中的视觉扫描模式或间隙估计（Dhoke and Choudhary, 2023）。尽管这一局限意味着在推广研究发现时应保持谨慎，但总体趋势十分明确：紧迫性会提高行人决策中的风险容忍度。

这与港口运营直接相关：海事和码头环境通常要求严格遵守时间安排。此类运营时间压力可能会促使步行的港口人员在穿越车辆通道或与自主设备互动时冒险，尤其是在绕行或延误可能扰乱工作流程的情况下（Human Element Industry Group, 2023）。在时间压力较大的情况下，港口行人也可能跳过标准安全检查。例如，由于倾向于迅速采取行动的认知偏差，他们可能未仔细确认驶近的自动驾驶车辆是否已发现自己便直接穿行。然而，目前尚无实证研究专门考察港口物流情境中的时间压力如何影响行人在自动驾驶车辆周围的决策。尽管已有充分确立的行为模式表明，紧迫性会增加过街风险，但针对时间敏感型港口环境的研究仍然有限。因此，运营期限可能如何扭曲行人与自主系统互动时的判断，目前仍不清楚。

总体而言，这些研究领域凸显了在自动化港口运营背景下考察行人行为的迫切需求。尽管现有交通安全文献提供了相关的理论见解，但鲜少考虑集装箱码头和货运枢纽中存在的独特视觉、车辆及时间约束。关注这些被忽视的条件，对于指导自动驾驶车辆技术和安全策略的开发至关重要，以确保其反映港口运营在现实中的需求与压力。

3. 方法

为构建用于实验研究的真实港口交互情境，本研究首先利用官方视频、照片及其他视觉材料等公开来源，对实际港口环境进行了全面调查。基于这些参考资料，提取了关键空间

和运营特征，例如集装箱堆垛、自动驾驶卡车、道路结构及能见度限制，并使用虚幻引擎将其重建为虚拟港口环境。该基于虚拟现实的仿真平台能够在保持生态效度的同时，对多种环境因素进行受控操纵，适用于风险评估中的数据收集。(Meng 等，2025)。 表 1展示了此类环境中常见的碰撞风险场景，例如，场内牵引车以正常速度行驶，驶近一名即将横穿道路的工人 (Son 等，2021)。这些现实观察和有记录的事故表明，在港口环境中，行人与车辆交叠的情况并非罕见或微不足道，而是当前港口运营中的一种系统性特征。因此，有必要重新审视自动化港口环境对安全的影响，尤其应从影响人机交互的关键风险因素这一角度进行考量。–。

表 1。港口场景中人车交互案例示意

港口场景快照	可视化
一辆场内卡车正在行驶，同时一名行人从相邻作业区域向同一过街点靠近。交汇区域行人路径与卡车的轨迹被确定为“交互危险区”。	

如图1所示，实验设计系统地改变了自动化港口运营中常见的五个关键因素：（1）天气条件（晴天、雨天、雾天）；（2）一天中的时段（白天或夜间）；（3）是否存在视觉障碍物（例如堆叠集装箱）；（4）车辆类型（小型或大型自动驾驶卡车编队）；以及（5）时间压力（是否设有过街时间限制）。这些因素经正交组合，生成了八种不同的仿真场景。在存在障碍物的条件下，分别构建了小型和大型车辆编队的代表性行人过街场景，以考察环境压力因素和车辆特征如何影响行人反应。

参与者需使用头戴式VR设备和手持控制器与虚拟港口环境进行交互，在自动驾驶车辆编队驶近时穿越交通车道。每次试验均收集两类数据：（1）行为数据，包括间隙接受（GA）、侵入后时间（PET）、等待时间和穿越时长；（2）问卷数据，涵盖风险感知、行为倾向、沉浸感和模拟器晕动症。研究采用单因素方差分析（ANOVA）考察实验条件的主效应，并使用广义线性混合模型（GLMMs）处理重复测量和个体差异。结合这两种分析方法，全面评估了各种环境因素和个体因素如何影响自动化港口环境中的行人决策与安全结果。

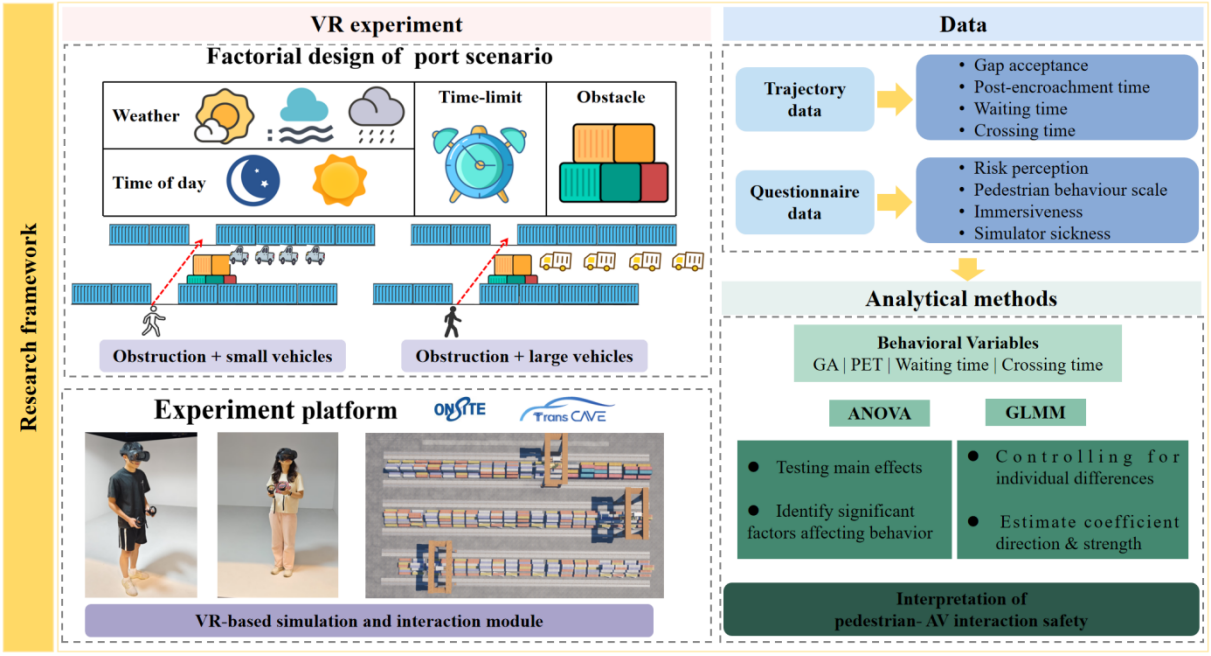


图 1。 研究框架。

3.1 参与者

共招募了33名参与者（25名男性、8名女性），他们来自大学社区，并参加了基于VR的仿真实验；人口统计信息见表2。尽管受访问限制影响，无法招募真正的港口工人，但我们仍谨慎选择了样本，以确保其与研究情境相关。值得注意的是，72.7%的参与者具有海事与交通运输领域的学术或职业背景，包括

来自航海、物流和交通工程专业的学生。这些背景使他们对港口运营、车辆类型和空间限制有了基本了解，因此能够在模拟港口环境中做出较为合理的判断。

参与者的年龄介于20至28岁之间，其中大多数（84.8%）为研究生。大多数人持有有效的驾驶执照（90.0%），且超过60%拥有至少一年的驾驶经验。这些特征确保参与者熟悉车辆行为和交通决策过程，从而提高了他们在虚拟行人与车辆交互任务中的反应的生态效度。

表2。人口统计特征。

变量	**频数**	**比例**
性别		
女性	8	24.2%
Male	25	75.8%
Age		
20-22	9	27.3%
23-25	18	54.5%
26-28	6	18.2%
教育水平		
本科生	5	15.2%
研究生及以上	28	84.8%
驾驶证		
Yes	30	90.0%
No	3	9.1%
驾驶经验年限		
0	5	15.2%
＜1	7	21.2%
1-3	11	33.3%
3-5	7	21.2%
＞5	3	9.1%
海事与交通运输领域的专业经验		
Yes	24	72.7%
No	9	27.3%
碰撞经历		
Yes	10	30.3%
No	23	69.7%

3.2 实验设备

实验平台采用同济大学洞穴式自动虚拟环境（CAVE）实验室（https://tops.tongji.edu.cn/jxpy/sypt.htm）。该平台支持头戴式VR设备，特别适用于开展以行人为中心的交通实验，可收集城市街道、码头内部和封闭作业区域等多种情境下的行为和运动数据。为支持本研究，研究团队使用虚幻引擎构建了虚拟港口环境，其中包含门式起重机、集装箱、塔式起重机、自动驾驶车辆和道路网络等精细的视觉元素，如图2(a)所示的仿真界面所示。

本实验中的行人模拟器采用立体头戴式显示器 (HMD)，具体型号为 VIVE Focus 3。该设备的分辨率为 4896×2448 像素（2448×2448 每只眼睛），刷新率为 90 Hz，可提供身临其境的 360° 虚拟现实体验。参与者使用手持控制器在虚拟港口中移动，能够自由移动和调整方向，如图 2(b)所示。此外，实验使用一台工作站来启动和结束试次、向参与者展示虚拟环境的第三人称视角，并管理数据收集。该工作站配备 Intel Core i7-14700K CPU 和 NVIDIA RTX 4070 Ti GPU，显存为 12 GB。



(a) 模拟港口场景　　(b) 实时监控工作站

图 2. 虚拟现实设备和场景。

3.3 实验设计

本研究采用了一种设计，系统操控了与自动化港口环境相关的五个关键因素：天气（晴天、雨天、雾天）、时间

（白天与夜间）、视觉遮挡（有或无堆叠集装箱）、时间压力（有或无）以及车辆类型（大型或小型自动驾驶卡车编队）。这些变量经过正交组合，生成了八种代表性情境，如表3所示。这种方法能够高效且均衡地调查环境和运行因素如何影响行人过街行为及感知安全性。

表3。虚拟现实实验场景设计。

场景	Time	天气	障碍物	时间压力	车辆尺寸
1	白天	晴天	Yes	No	大型
2	白天	雨天	No	Yes	大型
3	白天	雾天	Yes	Yes	小型
4	白天	晴天	No	No	小型
5	夜间	晴天	Yes	Yes	大型
6	夜间	雾天	No	No	大型
7	夜间	雨天	Yes	No	小型
8	夜间	晴天	No	Yes	小

为确保生态效度，所有情境均设置在一个逼真的虚拟港口环境中，该环境使用虚幻引擎构建，并基于现实世界的港口布局（Son 等，2021）。每个过街场景均模拟了一条宽10米、两侧堆放着集装箱的道路。参与者需要穿过这处间隙，从道路一侧走到另一侧，同时与驶近的自动驾驶车辆编队互动，如图3所示。

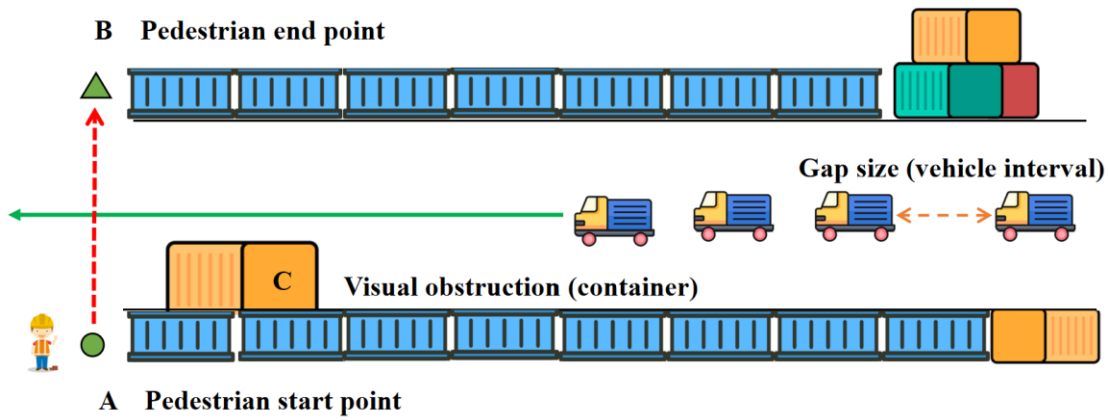


图3。 行人过街场景。

车辆编队由11辆以恒定速度行驶的相同车辆组成，形成10个车辆间隙。车辆尺寸分为

大型（9.5米× 4 米× 4.1米）和小型（5米× 2 米× 2 米）车队。为模拟真实交通流，间隙大小逐渐增大，并在特定位置（第3、5、7和8个间隙）有意设置了几个较短的间隙，以考察不同时间压力下的间隙选择行为（Paschalidis 等, 2018），如表4所示。

表4。间隙大小设置。

间隙编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
间隙大小（s）	3	4	3.5	5	4.5	6	5.5	7	6.5	8

通过设定40秒的穿越截止时间来引入时间压力，该时限经先导测试确定。在有时间限制的情境中，虚拟环境内会显示倒计时器，并每隔10秒发出听觉警报，以强化倒计时效果，模拟港口工人在高强度运营期间常有的任务紧迫感。

为使交互过程标准化，参与者被要求等待车队中的第一辆车辆通过线段AB后再开始过街。这项要求确保参与者确实与车辆间隙进行互动，并将这些间隙的大小记录为每位参与者的接受间隙，如图3所示。

每位参与者均按随机顺序完成全部八种情境。在正式试验前，参与者有时间自由探索虚拟港口环境，以熟悉导航控制器和空间布局。此探索阶段确保参与者——尤其是具有海事与交通运输背景的参与者——能够合理模拟实际港口运营中的决策过程。

3.3 基于可见性的减速触发距离标定

为开展这项调查，研究引入了一个名为减速触发距离的参数，将其定义为基于视觉的自动驾驶车辆检测到行人后开始制动直至完全停车时的临界前向距离。该参数反映了系统的感知-反应阈值，并直接受到环境能见度条件的影响。鉴于基于视觉的自动驾驶车辆的感知范围对照明、天气和遮挡高度敏感，研究假设减速触发距离会因不同情境而异。通过采用针对特定能见度条件校准的固定阈值，本研究

重点关注行人与车辆交互的行为动态，尤其是行人的过街决策和心理反应，同时排除自适应传感器性能带来的混杂效应。

为通过实证确定这一阈值，我们在虚拟现实环境中嵌入了一项可读性校准任务。一张印有文字的标准化测试图表被放置在自动驾驶车辆的接近路径上。在不同能见度条件下，包括不同的天气情景（晴天、雨天、雾天）和时段（白天与夜间），逐渐调整图表与参与者视点之间的距离。针对每种条件，记录参与者（经预筛查以排除存在视力障碍者）能够清晰读出文字的最远距离。随后将这一阅读距离作为感知阈值的替代指标，用以表示行人与车辆相互探测发生的距离，以及行人启动过街或制动决策的距离。

这种方法借鉴了基于仿真的人因研究中的成熟做法：在不同能见度条件下，通常以可读距离——即能够清晰读出文字或标识的最远距离——作为视觉探测阈值的替代指标。既有研究曾采用类似方法，在驾驶模拟器中对能见度和感知进行校准（Ting 等人，2008年；Zhong 等人，2011年），并在虚拟现实中评估能见度下降条件下标识的识别距离（Krösl 等人，2018年）。类比而言，将最远可读距离用作减速触发点，可为低能见度港口环境中最坏情况下的行人与车辆交互建模，提供基于感知且有实证依据的阈值。

通过将自动驾驶车辆设置为恰好在该阈值处开始减速，该协议实现了两个关键目标：

（1）确保只有在现实中的基于视觉的自动驾驶车辆能够通过感知看到行人之后才触发制动，从而避免过早或人为的反应；

（2）在能见度受限的情况下复现最不利的交互情境，从而最大限度地体现能见度条件对行人与车辆交互安全的影响。

各能见度条件下经过标定的减速触发距离汇总于表 5中，标定过程如图 4所示。

表 5. 不同能见度条件下的减速触发距离 .

白天	天气	减速触发距离（m）
白天	晴天	9
白天	雨天	8.5
白天	雾天	7
夜间	晴天	8
夜间	雨天	6
夜间	雾天	5



(a) 晴天、白天条件



(b) 雨天、白天条件



（c）雾天、白天条件



（d）晴天、夜间条件

图 4。减速触发距离的标定。

上述距离指的是自动驾驶车辆的纵向行驶方向。然而，由于行人可能从横向接近，因此还需要考虑横向可见性和响应时机。假设行人以速度横向移动，自动驾驶车辆以速度向前行驶。为确保自动驾驶车辆及时作出反应，行人进入决策区域期间车辆行驶的纵向距离不得超过该区域的有效半径。从数学上讲，若 表示行人到达车辆行驶路径所需的时间（见图5），则必须满足以下不等式：

v_{ped}

v_{veh}

t

$$v_{\text{veh}}\ t \le R \tag{1}$$

其中 是R车辆感知区域的径向范围。基于几何假设展开这一关系，可得以下约束：

$$\frac{X-\frac{1}{2}w}{v_{ped}} \le R \quad v_{\text{veh}} \tag{2}$$

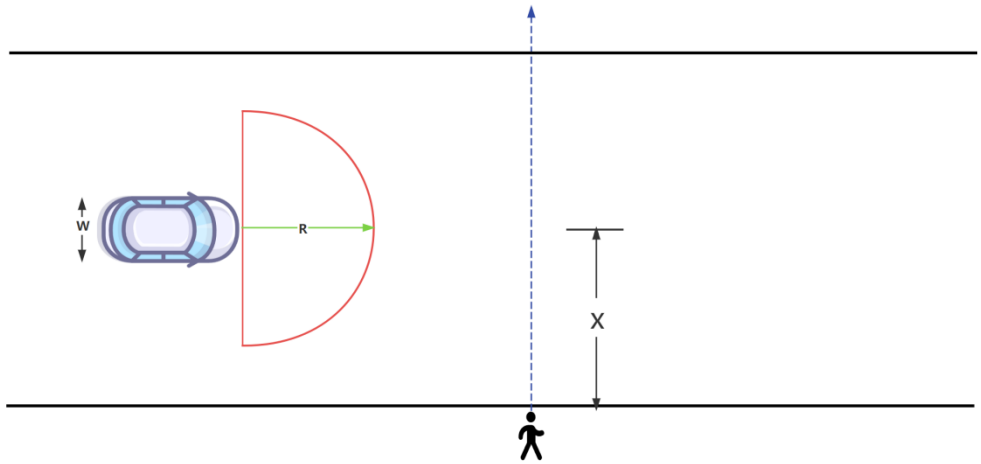


图5. 减速触发距离。

这一约束确保自动驾驶车辆会在行人到达关键碰撞区域之前开始制动，即使行人横向穿越时也是如此。

此外，在某些情境中，研究人员特意放置堆叠集装箱以遮挡车辆的侧向视野。在这种部分遮挡下，横向感知范围实际上会缩小。如图6所示，假设横向触发区域缩小至车辆宽度的一半，以模拟港口环境中常见的真实盲区。

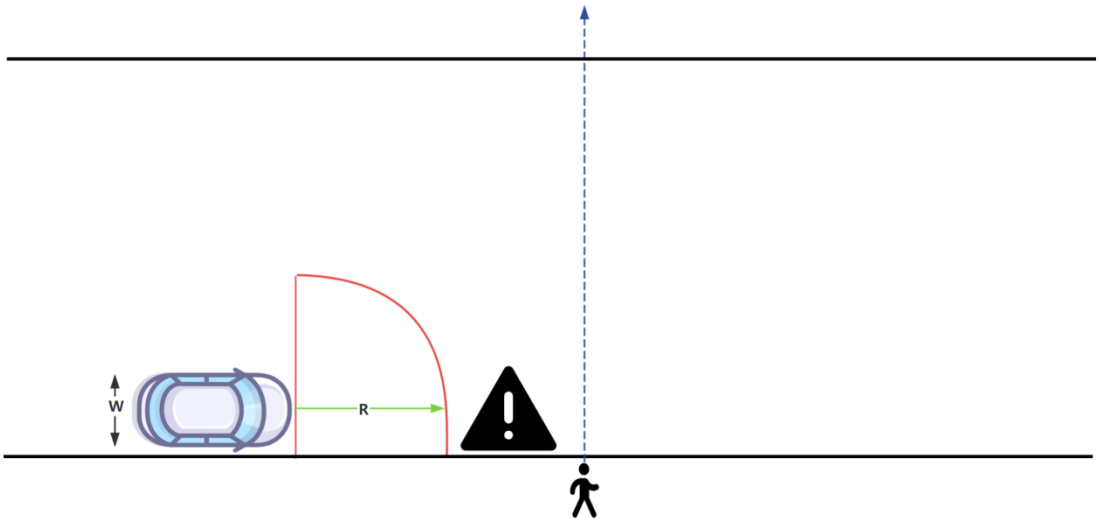


图6. 存在横向视觉遮挡时的减速触发距离。

3.4 实验流程

该研究经同济大学科学技术伦理委员会审查批准，实验在同济大学CAVE实验室进行。共有33名参与者完成了基于虚拟现实的港口交互试验。在正式实验开始前，每位参与者均接受了健康筛查。报告有不适症状或容易晕动症的人员被排除在外。随后，参与者接受了关于研究目标、流程和安全须知的详细说明。

正式试验开始前，所有参与者都可以自由探索虚拟港口环境。此熟悉阶段旨在帮助参与者建立空间定向能力，并增强其完成任务的信心。熟悉环境后，参与者填写了虚拟现实晕动症问卷（VRSQ；参见附录 A），这是一种用于评估虚拟环境中晕动症症状的经验证工具，重点关注眼动不适和定向障碍（Kim等, 2018）。只有未报告任何不良症状的参与者才进入正式实验。

每位参与者按照正交实验设计确定的随机顺序完成全部八种情境（见表3）。每次试验开始时，参与者的虚拟化身位于指定的A点；在障碍条件下，堆叠集装箱放置于C点（见图3）。参与者须等第一辆车驶过AB线后才能开始过街，以确保其与车辆间隙进行真实互动。

参与者使用手持控制器在虚拟现实场景中移动，系统则持续记录行人和车辆的三维坐标及运动方向。在涉及时间压力的试验中，系统提供了40秒倒计时器和听觉警报，以模拟紧迫性。

完成每次试验后，参与者需要对该情境进行主观风险感知（RP）评估，包括感知到的危险、发生碰撞的可能性、发生事故时预期的严重程度，以及对自动驾驶车辆的担忧 （CAV；参见 附录B）。每个条目均采用10点李克特量表进行评分（1 = 完全没有， 10 = 极其严重）。完成所有试验后，参与者还填写了其他问卷，包括多模态临场感量表（MPS；参见 附录 C），这是一种经过验证的工具

用于测量虚拟环境中的身体临场感、社会临场感和自我临场感（Makransky 等人，2017年），以及行人行为量表（PBS；参见附录B）（Granié 等人，2013年），该量表评估了行为倾向和沉浸程度。实验结束时还再次施测了虚拟现实晕动症问卷（VRSQ），以评估模拟器晕动症是否出现延迟症状。

如果参与者感到不适，可随时退出实验。整体实验工作流程如图7所示。

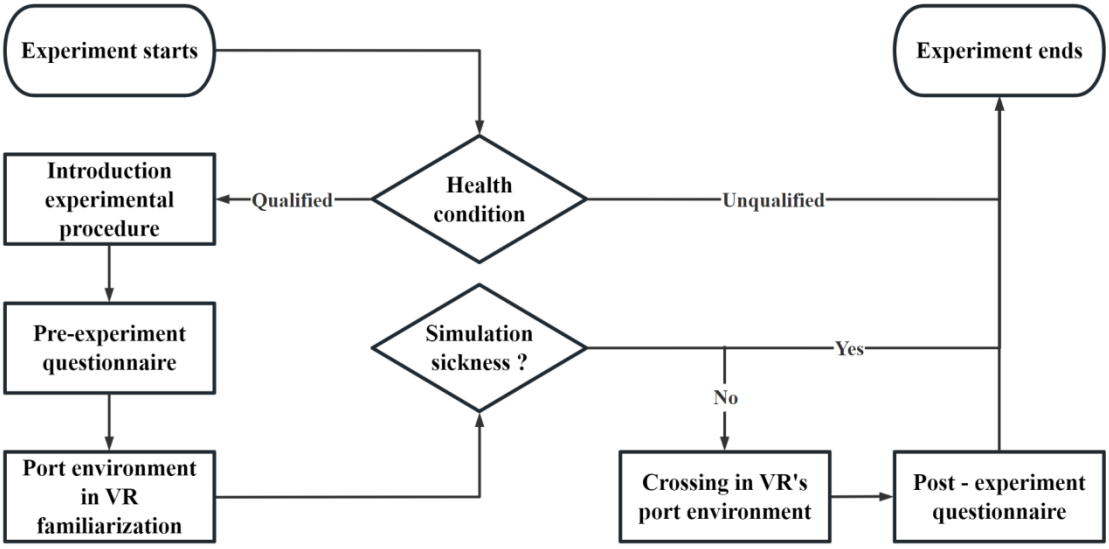


图7。整体实验工作流程。

3.5 因变量

为评估不同港口条件下的行人安全与决策，本研究基于行为数据和问卷回答，定义了四个关键行为结果变量。此外，还记录了人口统计信息（如性别、年龄），以纳入混合效应建模。

- **间隙接受（GA）**指行人在评估车辆之间的时间间隙后，决定是否穿越交叉口或道路路段。作为衡量行人如何感知可用交通间隙的指标，间隙接受是评估过街行为和感知风险的重要指标。因此，本研究记录了每位参与者的可接受间隙大小。

- **侵入后时间（PET）**用于量化行人进入冲突区域后，行人与迎面驶来的车辆之间的时间安全裕度。具体而言，当行人在车辆到达冲突点之前通过该点时，侵入后时间表示剩余时间

缓冲时间。该指标已被验证为碰撞风险的可靠替代指标，并为交通冲突安全评估提供了方法学支持。较低的侵入后时间值表示更严重的冲突和更高的碰撞风险，而较高的数值则表明交互更为安全（Hermans 等人，2009）。

- **等待时间**定义为行人最初产生过街意图到实际踏上道路之间的时长。该变量既反映风险评估，也反映决策延迟。

- **过街时间**是指行人第一次踏上道路到抵达对侧路缘之间的时长。它反映了行人在不同环境条件下的移动效率，以及所承受的心理或情境压力。

综合来看，这四个变量全面呈现了自动化港口环境中行人与自动驾驶车辆交互的行为特征。

3.6 分析方法

本研究采用单因素方差分析，评估各实验因素（包括天气、一天中的时段、障碍物存在情况、时间压力和车辆类型）是否会对行人行为指标（如间隙接受、侵入后时间、等待时间和过街时间）产生显著影响。该分析作为初步筛查，用于确定哪些因素会独立影响行人行为，从而为后续更深入的分析提供依据。

广义线性混合模型通过纳入固定效应和随机效应扩展了广义线性模型，因此适用于分析层级数据或相关数据，以及非正态分布的结果变量。本研究使用广义线性混合模型，同时估计实验操控的平均影响（固定效应），并考虑参与者之间的个体差异（随机效应），为分析不同港口环境情境下的行人行为提供了稳健的框架。广义线性混合模型可表示如下：

$$g(E(y_{ij})) = \beta_0 + \beta_1 X_{1ij} + \cdots + \beta_p X_{pij} + b_i \quad (3)$$

其中第 i 组中的第 -th 个观测值， 表示因变量的期望值，并通过指定的链接函数与预测变量的线性组合相关联。各项，，...， 是

y_{ij} $E(y_{ij})$ $g(\cdot)$ β_0 β_1 β_p

固定效应系数，而， 是与这些固定效应相关的协变量。项 表示随机效应成分。x_{ij} z_{pij} b_i

具体而言，因变量包括间隙接受、侵入后时间、等待时间和过街时间。这些变量被建模为五个固定效应因素的函数：天气（晴朗、降雨、雾）、一天中的时段（白天或夜间）、障碍物存在情况（有或无集装箱）、时间压力（存在或不存在）以及车辆类型（大型或小型）。将参与者身份纳入随机效应，以捕捉行为反应中的个体间变异。这种模型结构考虑了数据的嵌套性质，即每位参与者在八种情境下均接受了重复测量。

广义线性混合模型特别适用于本研究，主要有两个原因。首先，它通过使用灵活的链接函数，能够处理偏离正态分布的因变量，例如间隙接受和侵入后时间。其次，它能有效建模重复测量设计中固有的被试内相关性，从而支持有效的统计推断。

4. 结果

4.1 方差分析

为确定哪些实验变量和人口统计学变量对行人行为有显著影响，我们针对四个关键因变量进行了单因素方差分析：间隙接受、侵入后时间、等待时间和过街时间。该分析作为初步筛选步骤，用于确定哪些因素应保留，以便进一步使用广义线性混合模型进行建模。完整的统计结果见表6，显著效应则以图示形式呈现于图8。

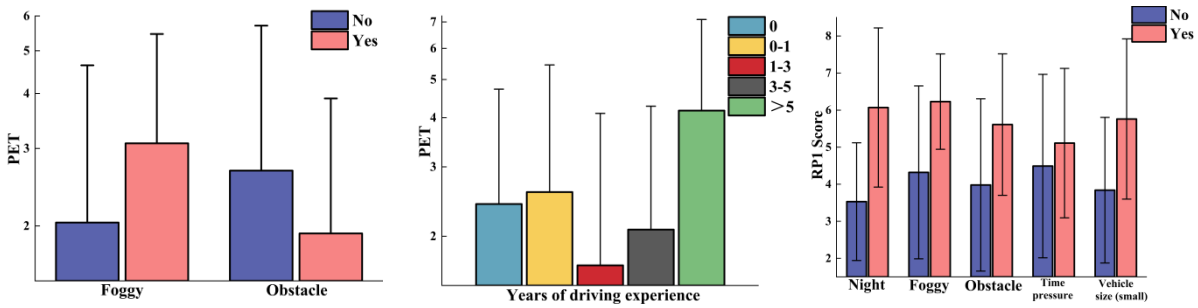
表6。实验因素和人口统计因素对行人行为影响的单因素方差分析结果。

自变量	**因变量**	F	η_p^2
夜间	GA	9.963**	0.037
雨天		6.797*	0.025
雾天		3.912*	0.015
时间压力		31.322***	0.107
车辆尺寸		23.955***	0.084
Age		2.89**	0.083
交通从业者		4.277*	0.016
雾天	PET	8.351**	0.031
障碍物		5.645*	0.021

Age		2.323*	0.068
驾驶经验年限		4.961*	0.071
障碍物	等待时间	11.784*	0.043
时间压力		4.676*	0.018
车辆		4.79*	0.018
性别		10.397**	0.038
Age		4.076***	0.113
驾驶经验年限		3.184*	0.047
碰撞经历		10.896*	0.040
雾天	过街时间	4.128*	0.016
性别		3.312*	0.012
驾驶经验年限		2.433*	0.036
夜间	RP1	119.084***	0.312
雾天		39.815***	0.132
障碍物		38.704***	0.129
时间压力		4.876*	0.018
车辆尺寸		56.824***	0.178
夜间	RP2	108.963***	0.294
雾天		39.46***	0.131
障碍物		26.192***	0.091
车辆尺寸		44.049***	0.144
夜间	RP3	14.827***	0.054
雨天		17.361***	0.062
雾天		12.499***	0.046
障碍物		21.661***	0.076
车辆尺寸		72.804***	0.217
性别		6.448*	0.024

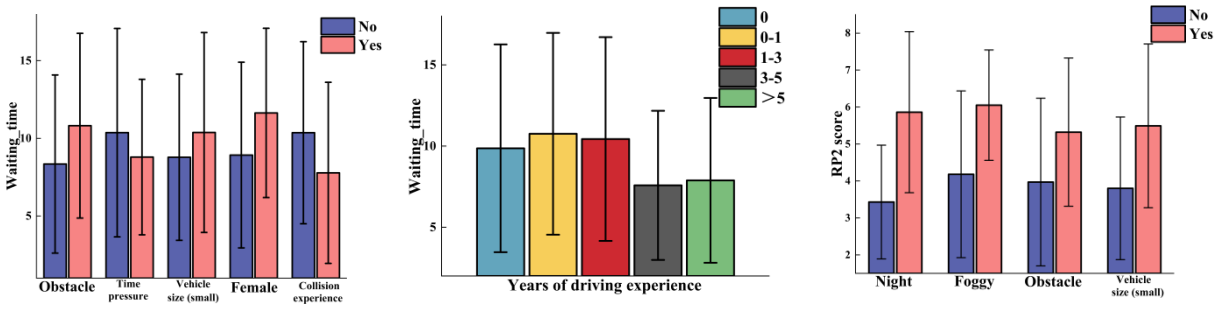
< < <* * *: 0.001; **: 0.01; *: 0.05 $p\,p\,p$

注：RP1、RP2、RP3：风险感知1、2、3（见附录B）。

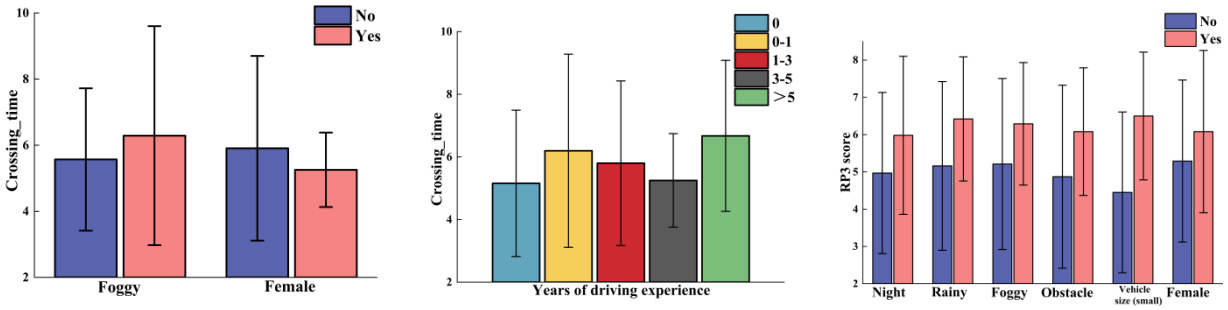


(a) 侵入后时间

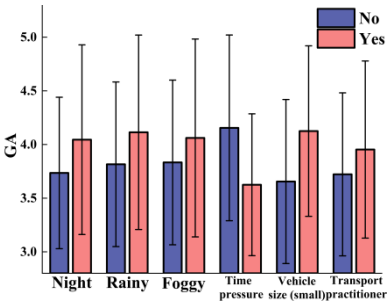
(b) RP1



(c) 等待时间　　(d) RP2



(e) 过街时间　　(f) RP3



(g) 间隙接受

图8。 在显著的实验因素和人口统计因素下，各组行为指标（间隙接受、侵入后时间、等待时间、过街时间；风险感知（RP））的比较。

如图8(g)和表6所示，环境因素和个体层面因素均显著影响了间隙接受。在所有变量中，时间压力的效应最强（F = 31.322，　　= 0.107），这表明，在设定穿越截止时间时，参与者接受的间隙显著更小。这说明紧迫性可能凌驾于风险考量之上，从而导致更具攻击性的过街行为。车辆尺寸也产生了显著效应（F = 23.955，　　= 0.084）：与大型自动驾驶卡车交互时，参与者始终接受更大的间隙，反映出他们面对大型车辆带来的感知威胁时更加谨慎。在

η_p^2

η_p^2

能见度方面，降雨（$F = 6.797$, $\eta_p^2 = 0.037$）、雾（$F = 3.912$, $\eta_p^2 = 0.015$）和夜间（$F = 9.963$, $\eta_p^2 = 0.037$）条件均显著增大了可接受间隙大小，这表明视觉确定性降低会促使行人在过街前预留更多缓冲时间。在人口统计学因素方面，年龄（$F = 2.890$, $\eta_p^2 = 0.083$）和交通从业者身份（$F = 4.277$, $\eta_p^2 = 0.016$）与更保守的间隙选择相关，这可能是因为他们的风险意识或交通知识更丰富。

如图8(a) 和表6所示，雾天条件（$F = 8.351$, $\eta_p^2 = 0.031$）和视觉障碍物的存在（$F = 5.645$, $\eta_p^2 = 0.021$）对侵入后时间（PET）的影响最为显著。从人口统计学特征来看，年龄（$F = 2.323$, $\eta_p^2 = 0.068$）和驾驶经验年限（$F = 4.961$, $\eta_p^2 = 0.071$）与侵入后时间呈正相关，表明年龄较大、经验较丰富的参与者往往会保持更大的冲突后安全裕度。

值得注意的是，雾和视觉遮挡对侵入后时间（PET）的影响相反（图8(a)）。雾天条件会增加侵入后时间，而集装箱导致的遮挡则会显著缩短侵入后时间。这种差异可归因于视觉受损的不同性质。雾会造成全局对称性能见度降低，促使行人和车辆都采取更加谨慎的行动，并留出更长的观察时间和过街缓冲时间。相比之下，局部障碍物（如堆叠集装箱）会导致非对称信息丢失：行人直到迎面驶来的车辆突然出现时才能看到它们，而纯视觉自动驾驶车辆也可能无法探测到从障碍物后方接近的行人。这些局限性会缩短反应时间，并导致行人与车辆更快发生冲突，从而降低侵入后时间。这一发现表明，局部遮挡比普遍的低能见度带来更大的安全风险，凸显了在遮挡环境中采用冗余感知机制以维持安全裕度的重要性。

如图8(c)和表6所示，视觉遮挡成为最强的过街前等待时间的预测因素（$F = 11.784$, $\eta_p^2 = 0.043$）。当参与者的视线被集装箱或其他障碍物遮挡时，他们需要更长时间才开始过街，这表明不确定性有所增加。车辆尺寸（$F = 4.790$, $\eta_p^2 = 0.018$）和时间压力（$F = 4.676$, $\eta_p^2 = 0.018$）也产生了

显著效应。较大型车辆会引发犹豫，而倒计时器则会缩短决策延迟。

在个体变量中，年龄（$F = 4.076$, $\eta_p^2 = 0.113$）呈现出较强的负相关关系：年龄较大的参与者等待时间较短。虽然这看似有悖直觉，但可能反映了他们能更快地评估情境。相比之下，碰撞经历（$F = 10.896$, $\eta_p^2 = 0.04$）和驾驶经验（$F = 3.184$, $\eta_p^2 = 0.047$）与较长的等待时间相关，这可能是因为风险敏感度较高。

过街时间在不同环境条件下相对稳定，只有雾表现出边缘显著的效应（$F = 4.128$, $\eta_p^2 = 0.016$），如图8(e)和表6所示。然而，性别（$F = 3.312$, $\eta_p^2 = 0.012$）和驾驶经验（$F = 2.433$, $\eta_p^2 = 0.036$）确实产生了较小但显著的效应。平均而言，女性参与者和驾驶经验较少的参与者过街速度更快，这可能反映了防御性移动策略：减少在冲突区域内暴露的时间。

总体而言，方差分析结果表明，时间压力、车辆尺寸以及能见度相关因素（雾、夜间和视觉遮挡）会持续影响行人过街决策和感知安全裕度。年龄、驾驶经验和既往碰撞经历也在行为变异中发挥重要作用。这些发现支持在后续广义线性混合模型分析中将全部五个实验变量纳入固定效应。为考虑重复测量以及个体间的行为差异，模型中纳入了参与者特定的随机截距。这种方法使广义线性混合模型能够控制个体层面变异，同时着重估计环境条件对行人行为的平均效应。

4.2 广义线性混合模型

4.2.1 间隙接受

广义线性混合模型结果汇总见表7，结果显示，若干环境变量显著影响行人的接受间隙大小。时间压力产生了最强的负向效应（$\beta = -0.135$, $p < 0.001$），这表明，受到时间约束的行人倾向于接受更小的间隙，可能是将任务紧迫性置于安全之上。车辆尺寸也具有强烈的正向

效应（β = 0.114, p < 0.001），这表明大型车辆会引发更多谨慎，这与直觉上的威胁感知一致。

表7。 行人间隙接受行为的广义线性混合模型结果。

参数	系数	标准误	z统计量	p值	95%置信区间
固定效应					
夜间	0.063	0.030	2.12	0.034	[0.005, 0.122]
雨天	0.119	0.027	4.42	0.000	[0.066, 0.171]
雾天	0.091	0.033	2.8	0.005	[0.027, 0.155]
障碍物	0.025	0.024	1.03	0.301	[-0.022, 0.071]
时间压力	-0.135	0.018	-7.7	0.000	[-0.170, -0.101]
车辆尺寸	0.114	0.028	4.05	0.000	[0.059, 0.169]
女性	0.012	0.054	0.22	0.825	[-0.094, 0.118]
Age	-0.001	0.014	-0.07	0.948	[-0.028, 0.026]
驾驶执照	-0.034	0.085	-0.4	0.686	[-0.201, 0.132]
驾驶经验年限	0.011	0.024	0.48	0.629	[-0.034, 0.058]
教育水平	-0.048	0.074	-0.64	0.519	[-0.192, 0.097]
专业经验	0.063	0.051	1.24	0.216	[-0.037, 0.163]
碰撞经历	0.016	0.044	0.36	0.716	[-0.071, 0.103]
违规	-0.001	0.014	-0.06	0.953	[-0.029, 0.027]
错误	-0.022	0.018	-1.2	0.232	[-0.058, 0.014]
疏忽	-0.005	0.006	-0.89	0.372	[-0.016, 0.006]
攻击性	0.011	0.012	0.9	0.370	[-0.013, 0.035]
正向	-0.027	0.012	-2.29	0.022	[-0.050, -0.004]
RP1	0.026	0.014	1.79	0.073	[-0.002, 0.053]
RP2	-0.017	0.012	-1.47	0.141	[-0.040, 0.006]
RP3	-0.013	0.009	-1.45	0.147	[-0.031, 0.005]
CAV	0.015	0.009	1.68	0.092	[-0.002, 0.033]
随机效应					
var(_cons)	0.006	0.002			[0.003, 0.011]

注：违规、错误、疏忽、攻击性和正向是 PBS 中的条目，CAV 指参与者对自动驾驶车辆的担忧（见附录B）。

能见度相关因素也影响了间隙接受。在雨天（β = 0.119, p < 0.001）、雾天（β = 0.091, p

0.01）和夜间（$= 0.063$, < 0.05）条件下，间隙大小显著增加，这反映了行人在感知不确定性较高时采取的补偿行为。

在个体因素中，正向行为倾向与显著更小的接受间隙相关（$=$ -0.027, $= 0.022$），这可能反映了过街时更快的决策和更强的自信。该模式表明，通常表现出礼貌、合作且专注的行人行为的个体，在评估交通间隙和开始行动时也可能更有信心。这些参与者可能具有更强的态势感知和行动准备度，因此能够更快地做出决策，并在不同环境条件下过街时减少犹豫。模型显示，年龄、性别和驾驶经验等其他个人特征对间隙接受没有显著影响。

参与者的随机截距方差估计为 0.006，表明基线间隙接受行为存在适度但不可忽略的个体差异。这支持在模型中纳入参与者特定的随机效应，以考虑被试内相关性并提高固定效应估计值的精度。

总之，间隙接受主要受外部风险线索影响，尤其是时间压力、车辆尺寸和能见度；而行为倾向等内在特质则发挥次要但有意义的作用。这些发现强调，设计行人与自动驾驶车辆交互系统时，应使其能够适应现实环境中的任务紧迫性和感知模糊性。

4.2.2 侵入后时间

广义线性混合模型（GLMM）的结果见表8，结果表明，视觉障碍物对侵入后时间（PET）有显著的负向效应（$=$ -0.492, $= 0.043$），这表明集装箱造成的遮挡缩短了冲突点处行人与车辆之间的安全缓冲距离。这说明局部障碍物会损害相互可见性，导致反应时间缩短，并使行人与车辆交互

更加紧密。相比之下，雾天条件呈现正向但不显著的效应（$=$ 0.371, $= 0.229$），这意味着雾天可能会促使人们更加谨慎，但其对侵入后时间的影响不太稳定，且更依赖具体情境。

表8。侵入后时间的广义线性混合模型结果。

参数	系数	标准误	z统计量	p值	95%置信区间
固定效应					
夜间	-0.027	0.285	-0.1	0.924	[-0.586,0.532]
雨天	-0.121	0.273	-0.44	0.657	[-0.657,0.414]
雾天	0.371	0.308	1.2	0.229	[-0.233,0.975]
障碍物	-0.492	0.243	-2.02	0.043	[-0.969,-0.015]
时间压力	-0.163	0.168	-0.97	0.335	[-0.493,0.168]
车辆尺寸	-0.449	0.271	-1.65	0.098	[-0.981,0.083]
女性	1.032	0.324	3.19	0.001	[0.397,1.667]
Age	0.164	0.081	2.04	0.042	[0.006,0.322]
驾驶驾照	-0.400	0.437	-0.91	0.361	[-1.257,0.458]
驾驶经验年限	0.315	0.133	2.37	0.018	[0.055,0.576]
教育水平	-0.256	0.425	-0.6	0.546	[-1.088,0.576]
专业经验	-0.402	0.276	-1.46	0.144	[-0.942,0.138]
碰撞经验	0.035	0.229	0.15	0.880	[-0.414,0.483]
违规	-0.007	0.077	-0.09	0.925	[-0.158,0.144]
错误	-0.016	0.113	-0.14	0.889	[-0.237,0.205]
疏忽	0.013	0.032	0.41	0.679	[-0.05,0.077]
攻击性	-0.015	0.073	-0.2	0.839	[-0.158,0.128]
正向	-0.094	0.064	-1.48	0.139	[-0.219,0.031]
RP1	0.046	0.129	0.36	0.720	[-0.207,0.300]
RP2	-0.080	0.102	-0.78	0.434	[-0.280,0.120]
RP3	0.098	0.079	1.24	0.216	[-0.057,0.252]
CAV	0.003	0.081	0.04	0.970	[-0.157,0.163]
随机效应					
var(_cons)	0		-	-	-

注：违规、错误、疏忽、攻击性和正向均为 PBS 中的条目；CAV 指参与者对自动驾驶车辆的担忧（参见附录B）。

车辆尺寸对侵入后时间（PET）呈边际显著的负向效应（ =-0.449, β = 0.098），表明行人可能会在大型车辆通过前较短时间穿过，这可能是由于决策延迟或穿越距离较长所致。模型显示，包括夜间、降雨和时间压力在内的其他环境因素对侵入后时间没有显著影响。 p

在个体层面，性别、年龄和驾驶经验都是显著的预测因素。女性参与者的侵入后时间值显著较高（ = 1.032, = 0.001），反映出她们过街时更加谨慎。此外，年龄（ = 0.164, = 0.042）和驾驶经验年限（ = 0.315,= 0.018）均与侵入后时间呈正相关，表明年龄较大、经验更丰富的个体在车辆前方过街时倾向于留出更大的时间缓冲。 β p β p β p

总之，视觉障碍物和个体谨慎相关特征对侵入后时间的影响最为显著，而雾和降雨等整体能见度条件的作用较小。这些发现凸显了不对称可见性带来的较高安全风险，并强调自动驾驶车辆感知系统需要考虑盲区和被遮挡的行人，尤其是在集装箱码头环境中。

4.2.3 等待时间

如表9所示，视觉遮挡是过街前等待时间最强的预测因素（ = 0.249, = 0.005）。当集装箱遮挡视线时，行人在开始行动前表现出更长时间的犹豫，这可能是因为他们对驶近车辆的不确定性增加。相反，时间压力显著缩短了等待时间（ = -0.152, = 0.020），这表明即使视觉信息有限，紧迫性也会缩短决策延迟。 β p

表9。 等待时间的广义线性混合模型结果。

参数	系数	标准误	z统计量	p值	95%置信区间
			固定效应		
夜间	0.041	0.111	0.37	0.715	[-0.177,0.259]
雨天	0.083	0.101	0.82	0.410	[-0.115,0.281]
雾天	0.060	0.121	0.5	0.620	[-0.177,0.296]
障碍物	0.249	0.089	2.8	0.005	[0.075,0.424]
Time 压力	-0.152	0.066	-2.32	0.020	[-0.280,-0.023]

车辆尺寸	0.055	0.101	0.55	0.585	[-0.143,0.254]
女性	0.029	0.201	0.14	0.886	[-0.366,0.423]
Age	-0.169	0.051	-3.29	0.001	[-0.27,-0.068]
驾驶许可证	0.286	0.315	0.91	0.364	[-0.331,0.902]
年 of 驾驶经验	0.011	0.088	0.13	0.898	[-0.161,0.184]
教育水平	0.579	0.273	2.12	0.034	[0.044,1.114]
专业经验	-0.021	0.189	-0.11	0.910	[-0.391,0.348]
碰撞经验	-0.277	0.165	-1.68	0.093	[-0.601,0.046]
违规	-0.003	0.053	-0.06	0.951	[-0.107,0.100]
错误	0.046	0.069	0.67	0.505	[-0.089,0.180]
疏忽	-0.025	0.021	-1.18	0.239	[-0.067,0.017]
攻击性	0.003	0.046	0.07	0.942	[-0.087,0.094]
正向	-0.060	0.044	-1.38	0.168	[-0.146,0.025]
RP1	0.043	0.054	0.8	0.424	[-0.063,0.150]
RP2	0.003	0.047	0.06	0.951	[-0.088,0.094]
RP3	-0.014	0.033	-0.44	0.662	[-0.078,0.050]
CAV	0.039	0.033	1.2	0.231	[-0.025,0.103]
随机效应					
方差(_一致性)	0.080	0.028			[0.040, 0.158]

注：违规、错误、疏忽、攻击性和正向均为 PBS 中的条目；CAV 指参与者对自动驾驶车辆的担忧（见附录B）。

年龄是等待时间的显著负向预测变量（ = -0.169, =0.001），表明年龄较大的参与者做出过街决策的速度更快。这可能反映了他们能够更快地进行风险评估，或在应对交通方面经验更丰富。相比之下，教育水平与等待时间呈正相关（ =0.579, = 0.034），说明受教育程度较高的人往往行动更谨慎。碰撞经历也呈现边缘显著的负向效应（ = -0.277, = 0.093），表明有过往事故经历的人在情境模糊时可能会采取更果断的策略。

年龄对等待时间和PET表现出相反的效应。随着年龄增长，行人往往更快开始过街（等待时间更短），但在离开冲突区域后也会保持更大的时间缓冲（PET更长）。这一模式表明，年龄较大的参与者虽然在开始移动时更加果断（可能是由于对交通动态更加熟悉或犹豫程度降低），但在过街过程中也表现出更强的风险规避策略。他们并非延迟行动，而是似乎更重视高效移动与保守时机相结合，以确保在车辆到达之前就已充分驶离车辆行驶路径。这些发现反映出一种兼具经验性与谨慎性的行为方式，即更早作出决策，同时保持更大的安全余量。

其他变量，包括天气、车辆尺寸和大多数个人特质，对等待时间均没有统计学上的显著效应。这表明，行人的犹豫主要由对环境的视觉通达性、任务紧迫性以及个体的认知或经验特质驱动，而非由更广泛的环境背景所决定。

总体而言，等待时间由环境能见度限制和个体决策倾向共同塑造。视线受阻会引发更多犹豫，而时间压力和年龄增长则会缩短 deliberation time。这些发现凸显了自动驾驶汽车系统将犹豫行为解读为不确定性指标的必要性，尤其是在行人能见度受限的情况下。

4.2.4 过街时间

在广义线性混合模型分析中，如表10所示，性别是过街时间的重要预测因素。女性参与者比男性参与者过街速度更快（β = -0.230, p = 0.016）。这可能反映了一种旨在减少在潜在危险环境中暴露时间的防御性移动策略。此外，正向行为倾向（β = -0.051, p = 0.014）和较高的疏忽评分（β = -0.023, p = 0.022）均与较短的穿越时长相关，这表明具有更冲动或更主动行为特征的个体往往能够更快完成过街。

表10。 过街时间的广义线性混合模型结果。

参数	系数	标准误	z统计量	p值	95%置信区间
固定效应					

夜间	-0.073	0.062	-1.18	0.238	[-0.193,0.048]
雨天	-0.047	0.055	-0.86	0.392	[-0.154,0.060]
雾天	0.003	0.067	0.05	0.959	[-0.129,0.136]
障碍物	0.005	0.049	0.11	0.915	[-0.092,0.102]
时间压力	-0.022	0.036	-0.62	0.533	[-0.093,0.048]
车辆尺寸	-0.106	0.058	-1.83	0.067	[-0.220,0.007]
女性	-0.230	0.095	-2.41	0.016	[-0.417,-0.043]
Age	-0.036	0.025	-1.46	0.145	[-0.084,0.012]
驾驶执照年 of	0.093	0.149	0.62	0.535	[-0.200,0.386]
驾驶经验	0.019	0.042	0.45	0.654	[-0.063,0.100]
教育水平	0.121	0.130	0.93	0.351	[-0.133,0.375]
专业经验	0.023	0.090	0.26	0.797	[-0.154,0.200]
碰撞经历	-0.102	0.078	-1.31	0.192	[-0.255,0.051]
违规	0.011	0.025	0.42	0.672	[-0.039,0.060]
错误	-0.034	0.032	-1.06	0.288	[-0.098,0.029]
疏忽	-0.023	0.010	-2.28	0.022	[-0.043,-0.003]
攻击性	0.025	0.022	1.18	0.240	[-0.017,0.068]
正向	-0.051	0.021	-2.46	0.014	[-0.091,-0.010]
RP1	0.038	0.028	1.36	0.175	[-0.017,0.094]
RP2	-0.004	0.024	-0.15	0.877	[-0.05,0.0420]
RP3	-0.004	0.018	-0.24	0.809	[-0.04,0.0310]
CAV	0.043	0.018	2.34	0.019	[0.007,0.0780]
随机效应					
var(_cons)	0.015	0.006			[0.007, 0.034]

注：违规、错误、疏忽、攻击性和正向是 PBS 中的条目，CAV 指参与者对自动驾驶车辆的担忧（参见附录B）。

一天中的时段、天气、障碍物和时间压力等环境变量对过街时间未显示出显著效应。这表明，一旦行人决定过街，环境差异对其通行速度的影响很小。然而，观察到了一项边缘效应

车辆尺寸的效应为β（$=$ -0.106, p $=$ 0.067），这表明较大型车辆可能会在一定程度上影响过街紧迫性。

随机截距方差估计为 0.015（95% CI [0.007，0.034]），反映出基线过街速度存在适度的个体差异。因此，纳入参与者层级随机效应仍然适用于控制被试内相关性并改善模型拟合。

总体而言，过街时间主要受个体行为特征而非环境条件影响。这表明，决策后执行更多地取决于个人行动风格，而非外部刺激。

5.讨论

5.1 视觉限制：全局效应与局部效应

实验结果表明，视觉限制对行人与自动驾驶车辆的交互产生显著不同的影响，具体取决于限制是全局性的还是局部性的。在存在局部视觉遮挡的情境中，例如堆叠集装箱紧邻过街路径时，侵入后时间（PET）显著缩短。这一缩短意味着行人通过冲突点与车辆抵达之间的时间缓冲变小。尽管参与者在障碍物遮挡下表现出更长的过街前犹豫，但等待时间的增加未能弥补侵入后时间（PET）的压缩。可能的解释在于可见性损失具有不对称性：一方可能直到进入冲突区域时才被另一方发现，使双方的反应时间都极为有限。

相比之下，全局能见度受损（包括雾和低照度条件）与更为保守的间隙接受相关。例如，在雾和降雨条件下，间隙接受增加，这表明当整个场景的能见度均匀下降时，受试者会有意扩大安全余量。这种行为适应与 Zhu 等人（2025）报告的发现一致，但与 Wang 等人（2025）的结果存在差异，后者观察到在城市夜间条件下间隙更小、暴露风险更高。这种差异可能反映了我们的仿真中港口运营具有结构化且可预测的空间组织特征；与公共道路动态且异质的环境相比，这种特征可能使人们在能见度普遍较差时采取更为审慎的决策。

全局性视觉损害与局部损伤之间的区别具有重要的机制意义。全局性视觉损害具有对称性，以可预测的方式同时影响行人和车辆感知，从而促进行为上的相互适应。另一方面，局部障碍物会造成突然而不均匀的可见性损失，通常会阻碍及时的相互探测。这类遮挡的不对称性和突发性解释了为何尽管决策延迟更长，侵入后时间仍然恶化。

局部障碍物带来的显著风险凸显了基于港口的自动驾驶车辆需要配备能够弥补不对称可见性的感知系统。有效的策略包括整合多传感器融合以检测被遮挡的行人、在盲角部署基于基础设施的监控，以及为地面人员配备可穿戴定位设备。这些措施有助于降低集装箱码头空间特征所固有的较高冲突风险。

5.2 车辆尺寸：风险感知与谨慎程度增强

实验结果表明，在自动化港口环境中，车辆尺寸会显著影响行人过街行为。与涉及小型车辆的情境相比，参与者在与大型自动驾驶卡车编队互动时表现出明显更保守的决策。这体现为平均可接受间隙更大，并且一旦开始过街，参与者倾向于更快地穿过车行道。此外，单因素方差分析显示，面对大型车辆时，参与者的运动前犹豫时间更长。这些结果表明，行人会调整行为：在踏入冲突区域前进行更长时间的评估，随后加快穿越阶段的速度，说明他们有意采取策略，尽量缩短在大型车辆附近的暴露时间。

这些行为倾向与以往的观察性研究结果一致。Mohan 和 Chandra（2021年）报告称，在相同间隙条件下，与小型车辆占主导的交通流相比，重型车辆占主导的交通流中的间隙接受率显著降低；而Tyndall（2021年、2023年）发现，涉及大型厢式货车或轻型卡车的碰撞对行人造成的后果往往格外严重。我们在受控虚拟现实实验中得出的研究结果与实地证据相一致，这表明行人更加谨慎并非仅仅出于感知，而是对

客观上较高风险的适应性反应。在港口环境中，大型车辆的运行特性可能会进一步强化这一行为模式，包括车身质量更大、前端轮廓更高以及机动性受限；当车辆以车队形式行驶时，这些特点尤为明显。

除了感知风险之外，大型车辆的物理特性也给相互探测带来了实质性挑战。由Jagtap 和 Jermakian（2025年）开展的仿真分析表明，大型卡车存在范围广泛的盲区，尤其是在转弯操作时，这会妨碍驾驶员和传感器识别行人。在我们的实验中，这种探测不确定性可能促使参与者在决定过街后缩短过街时间，从而尽量减少停留在车辆行驶路径上的时间。心理因素也可能有所影响，正如Fabricius 等人（2022年）在与重型卡车互动时记录到的“安全焦虑”，以及Rankavat 和 Gupta（2023年）报告的较高感知危险程度。这些因素共同为我们在大型车辆情境中持续观察到的更高谨慎程度提供了合理解释。

研究结果表明，大型自动驾驶车辆的部署应配备更完善的安全措施，包括扩大传感器覆盖范围以减少盲区，并集成醒目易见的外部人机界面，以传达让行意图。调整车队路线规划、降低车辆在行人通行区域内的速度，以及将重型车辆流与常见行人通道分开等运营措施，也能进一步降低感知风险和实际风险。这些措施不仅能应对人身安全方面的担忧，还可能缓解行人在大型车辆附近所承受的加剧的心理压力。

5.3 时间压力：紧迫性与风险权衡

实验结果清楚地表明，时间压力会改变行人过街行为，从而降低安全裕度。在设置倒计时时，参与者接受的时间间隙显著缩短，且更快开始过街，等待时间也随之缩短。尽管模型未显示碰撞或险些碰撞事件显著增加，但时间压力下 PET 的降低表明，行人与驶近车辆之间的时间缓冲

受到了压缩。这表明，紧迫感促使参与者优先完成任务，而非维持充足的安全裕度。

这些行为调整与Tian 等人（2022）基于模拟器的研究结果一致。他们报告称，被要求加快行动的参与者选择了更小的间隙、更早踏上道路，并且在冲突区域停留的时间更短。Çinar 等人（2022）还进一步观察到，长时间等待会产生一种“累积性的时间压力，即使没有明确的截止期限，也会导致类似的冒险倾向。Dhoke 和 Choudhary（2023）的综述进一步印证了这一模式的普遍性，指出“赶时间”是行人违规最稳定的预测因素之一。在我们的基于港口的仿真中，尽管不存在外部交通复杂性，这些倾向仍然出现，这表明其潜在机制是时间约束的认知效应，而非环境不可预测性。

这一结果还表明，紧迫情境下的决策策略可能发生转变。在倒计时清晰可见的情境中，等待时间缩短、可接受间隙变小，这表明参与者可能将更多注意力放在时间约束本身，而非评估驶近车辆的轨迹和速度上。这一解释与Colley 等人（2022）的研究结果一致；他们报告称，反复接触倒计时器会使行人形成条件反射，更早开始移动，有时却没有充分进行情境评估。在自动化环境中，这种对时间提示的依赖可能尤其成问题，因为车辆与行人通信（例如外部人机界面）可能被误解或根本不存在，正如Hochman 等人（2024）所指出的。

在高吞吐量港口作业中，紧张的日程安排十分常见，因此应将时间压力视为可控的安全变量。可采取的策略包括设置适度的日程缓冲时间，以减少行人匆忙过街的需要；避免在混合交通区域过度使用视觉紧迫性提示；并确保自动驾驶系统以清晰明确的方式传达其让行意图。这些措施有助于防止运营效率目标无意中助长更高风险的行人行为。

5.4 启示

本研究识别出的行为模式对提升自动化港口环境中的行人与自动驾驶车辆安全具有直接意义。

虚拟现实实验中观察到的不对称可见性、车辆尺寸和时间压力效应，凸显了采取多管齐下的方法的必要性，即将工程设计、运营执法与有针对性的安全教育相结合。

（1）工程

研究结果证实，堆叠集装箱或停放设备等局部视觉障碍物，对行人—车辆协调造成的影响可能比雾等全局环境因素更严重。为应对这一风险，自动驾驶车辆应配备能够将探测范围延伸至直接视线之外的感知系统。结合雷达、激光雷达和摄像头输入的多传感器融合架构，可提高遮挡区域内的识别准确率，使自动驾驶车辆能够及时响应从障碍物后方出现的行人。

对物理环境进行配套改造，还能进一步增强态势感知能力。在盲角处安装凸面镜、设置接近警告系统，并在混合交通区域提供视觉警报等措施，有助于自动驾驶车辆和行人预判潜在冲突。通过联网可穿戴设备为所有地面人员部署实时定位系统，可实现持续的位置跟踪，使自动驾驶车辆能够动态调整运行方式。

只要条件允许，对行人与车辆流线进行物理隔离仍是最有效的安全保障。专用人行道、固定屏障或立体交叉通道均可消除直接冲突。在共享区域，应优先确保能见度和通行的可预测性，通过清晰的人行横道标线、充足的照明和动态标志，标示安全过街点及行进路线。

（2）执法

实验结果表明，时间压力可能导致更具风险的过街决策，尤其是在运营需求高峰期。对纳入时间缓冲的调度计划和工作流程排序进行调整，可以减少在各运营区域之间匆忙移动的必要性。

在行人可进入区域对所有车辆（无论是自动驾驶还是人工驾驶）执行速度限制，对于降低动能并增加危险探测与规避的可用时间至关重要。明确

应制定明确的通行权规则，在指定过街处赋予行人优先权，并对自动驾驶车辆进行编程，使其相应地让行。

操作规程还应涵盖能见度相关危险。自动驾驶车辆在接近盲角或交叉路口时，应同时发出视觉和听觉警告；行人则应避免进入视线受阻的车道，除非能见度得到保障。要求所有工人使用联网定位设备，将有助于提升实时避碰能力，并改进事后事件分析。

营造安全优先文化同样重要。应鼓励工人报告危险因素，不必担心遭到报复；主管则应有权在发现不安全状况时暂时停止作业。在一些领先港口推行的“停工授权”政策，为将这一原则融入日常运营提供了范例。

（3）教育

教育对于树立安全意识、确保工程措施和政策干预措施得到有效落实至关重要。本研究表明，行人的风险感知和过街行为会随车辆尺寸、能见度和紧迫性而系统性变化。因此，培训应涵盖这些条件下的决策策略，尤其是在存在自动化系统的情况下。

教学内容应包括自动驾驶车辆的运行特性和局限性，尤其是其感知能力，以及在视线受阻或低能见度条件下可能存在的盲区。安全简报应强调始终使用标线过街处、避免在时间压力下仓促决策，并等待明确且可核实的过街信号。

最后，培训项目应说明可穿戴定位设备的作用和优势，强调使用这些设备如何提升个人安全以及自动化系统的整体态势感知。清楚了解这些功能有助于提高工人遵从性，并将这项技术融入日常实践。

6. 结论

本研究利用沉浸式虚拟现实模拟，系统考察了复杂港口环境中行人与基于视觉的自动驾驶车辆之间的交互。研究纳入了天气等关键环境变量，

包括照明、障碍物存在情况、车辆尺寸和时间压力，以及行人的个体特征，揭示了这些因素如何共同影响风险感知和过街行为。分析结果表明，低能见度条件和局部视觉障碍物会显著影响行人决策。这些效应会导致等待时间延长、可接受间隙增大，但也会缩短侵入后时间，从而缩小行人与车辆交互过程中的安全裕度。研究还发现，年龄、性别和驾驶经验等个人属性也会影响行为结果，而时间压力会进一步提高做出高风险决策的可能性。此外，车辆尺寸是影响行人行为的关键因素。大型车辆会促使行人采取更谨慎的决策，包括选择更大的可接受间隙和更快的过街速度。这些发现表明，必须根据行人风险敏感性对大型自动驾驶卡车的视觉系统和交互策略进行校准。

研究结果凸显了在港口进行自动驾驶车辆导航时仅依赖视觉感知的局限性，并强调了综合安全策略的重要性。建议安装广角摄像头和高位摄像头以减少盲区，开发车路协同通信系统以实现行人实时跟踪，并改善港口基础设施，例如照明和标识。此外，针对港口工人的安全培训对于增强态势感知、降低人机交互中的风险至关重要。

总之，本研究为提升港口环境中基于视觉的自主系统的安全性和有效性，提供了全面的行为框架和切实可行的设计指导。通过使技术解决方案与环境条件、车辆特征及人类认知反应相协调，本研究为在高风险现实环境中推进安全、高效的自主运行提供了可行路径。

参考文献

Amini, M., Bagheri, A., & Delen, D. (2022). 发现汽车碰撞事故中的伤害严重程度风险因素：一种用于决策支持的混合可解释人工智能框架。《可靠性工程与系统安全》, 226, 108720. Balasubramanian, V., & Bhardwaj, R. (2018). 夜间过街时行人对车辆的感知与反应。《事故分析与预防》, 110, 128-135. Cheng, W., Yang, S., Zhou, M., Liu, Z., Chen, Y., & Li, M. (2021). 利用稀疏语义视觉特征进行道路建图与定位。《*IEEE*机器人与自动化快报》, 6(4), 8118-8125.Ç inar, S., Yılmaz, Ş., & Öz, B. (2022). 行人的过街行为与过街偏好：一项实地研究。Colley, M., Bajrovic, E., & Rukzio, E. (2022, April). 行人行为、时间压力及重复接触对行人在配备外部通信功能的自动驾驶车辆前方过街决策的影响。载于《*2022*年计算机系统人为因素*CHI*会议论文集》（第1–11页）。Cristantiello, R. (2022, June 15). 比勒里卡男子在康利码头被拖车撞击身亡。《波士顿环球报》。
h
t
t
p
s://
w
w
w.
b
o
s
t
o
n.
c
o
m/
ne
ws/local-news/2022/06/15/billerica-man-fatally-struck-by-trailer-at-conley-terminal/。[2025-06-14]。Dhoke, A., & Choudhary, P. (2023). 时间压力与行人违规之间是否存在关联？一项系统综述。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 93, 68-89. Dhoke, A., & Choudhary, P. (2025). 时间压力下的行人行为：一项基于虚拟现实的信号控制交叉口等待时长与碰撞事故研究。《安全科学》, 185, 106807. Fabricius, V., Habibovic, A., Rizgary, D., Andersson, J., & Wärnestål, P. (2022). 重型卡车与弱势道路使用者之间的交互—为了解高度自动化卡车的交互能力而开展的系统综述。《机器人与人工智能前沿》, 9, 818019.

Ferenchak, N. N., & Abadi, M. G. (2021). 夜间行人死亡事故：对基础设施、使用者、车辆及情境因素的全面考察。《安全研究杂志》, 79, 14-25.Fiedler, R., Bosse, C., Gehlken, D., Brümmerstedt, K., & Burmeister, H. S. (2019). 自动驾驶车辆对港口基础设施需求的影响。弗劳恩霍夫海事物流与服务中心 *CML*, Hamburg. Garcia-Alonso, L., Moura, T. G. Z., & Roibas, D. (2020). 天气条件对港口技术效率的效应。《海洋政策》, 113, 103816. Ge, X., Zhou, Q., & Liu, Z. (2020). 空间站在轨维护任务复杂度评估。《可靠性工程与系统安全》, *193*, 106661. Granié, M.A., Pannetier, M., & Gueho, L. (2013). 开发一种自我报告方法，以测量各年龄段的行人行为。《事故分析与预防》, 50, 830-839. Guo, J., Ma, S., Zeng, S., Che, H., & Pan, X. (2024). 一种基于多重心智模型驱动态势评估的紧急情况下人机交互风险评估方法。《可靠性工程与系统安全》, 252, 110444. Hamka, M. A. (2017). 使用危险源辨识与风险评估及故障树分析方法评估集装箱码头的安全风险。《工程学*Procedia*》, 194, 307-314. Häne, C., Heng, L., Lee, G. H., Fraundorfer, F., Furgale, P., Sattler, T., & Pollefeys, M. (2017). 使用多相机系统实现自动驾驶汽车的三维视觉感知：标定、建图、定位与障碍物检测。《图像与视觉计算》, 68, 14-27. 北爱尔兰健康与安全执行局 (HSENI) (2020). 安全警示：港口与码头的交通流动。检索自：https://www.hseni.gov.uk/alert/traffic-movements-ports-and-docks.[2025-06-14]. 健康与安全执行局 (HSE) (2024). 港口与码头：工作场所交通安全。检索自：https://www.hse.gov.uk/ports/transport.htm. [2025-06-14].

Hermans, E., Van den Bossche, F., & Wets, G. (2009). 道路安全指数的不确定性评估。 《可靠性工程与系统安全》, 94(7), 1220-1228. Hochman, M., Parmet, Y., & Oron-Gilad, T. (2024). 全自动驾驶车辆环境中的行人过街意图；探讨过街机会、电子人机界面信息和等待时间。 《交通伤害预防》, 25(sup1), S126-S136. Hogenboom, S., Parhizkar, T., & Vinnem, J. E. (2021). 动态定位作业风险分析中的时间决策因素。 《可靠性工程与系统安全》, 207, 107347. Human Element Industry Group (2023). 海事行业的时间压力：船东／船舶管理人指南。 检索自：
https://www.nautinst.org/static/6e42c8f5-a24f-491c-8e273be629f2b11f/Time-Pressures-Guide-Ship-Owner-Manager-Nov-2023.pdf [2025-06-14]. Jagtap, S. R., & Jermakian, J. S. (2025). 交叉路口的车辆盲区与行人安全：利用数学模拟识别高风险情景。 《交通伤害预防》, 1-8. Kim, H. K., Park, J., Choi, Y., & Choe, M. (2018). 虚拟现实晕动症问卷 (VRSQ)：虚拟现实环境中的晕动症测量指标。 《应用人体工程学》, 69, 66-73. Krösl, K., Bauer, D., Schwärzler, M., Fuchs, H., Suter, G., & Wimmer, M. (2018). 一项基于虚拟现实的用户研究：视力障碍对建筑物内疏散路线标志识别距离的影响。 《视觉计算机》, 34, 911-923. Kummeneje, A. M., & Rundmo, T. (2019). 挪威人口的风险感知、担忧与行人行为。 《事故分析与预防》 , 133, 105294.Lucio, D., Lara, J. L., Tomás, A., & Losada, I. J. (2024). 港口气候相关影响与风险的概率评估。 《可靠性工程与系统安全》, 251, 110333. Macedo, M. C., & Apolinario, A. L. (2021). 增强现实中的遮挡处理：过去、现在与未来。 《*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊》, 29(2), 1590-1609.

Makransky, G., Lilleholt, L., & Aaby, A. (2017年). 虚拟现实环境多模态临场感量表的开发与验证：验证性因子分析与项目反应理论方法。《人类行为中的计算机》, 72, 276-285. Meng, H., Liao, J., Liang, J., & Liu, X. (2025年). 一种基于虚拟现实生成的信息和生成对抗网络的数据驱动风险分析方法。《可靠性工程与系统安全》, 261, 111157. 中华人民共和国交通运输部. (2021年, 11月30日). 中国自动化集装箱码头的快速发展。来源: https://www.gov.cn/xinwen/2021-11/30/content_5654959.htm.[2025-06-14]. Mohan, M., & Chandra, S. (2021年). 探究冲突流组成对异质交通条件下临界间隙的影响。《国际交通科学与技术杂志》, 10(4), 393-401. Morrongiello, B. A., Corbett, M., Switzer, J., & Hall, T. (2015). 利用虚拟环境研究行人行为：时间压力如何影响儿童和成人的过街行为？《儿科心理学杂志》, 40(7), 697-703. Morrongiello, B. A., Corbett, M., Beer, J., & Koutsoulianos, S. (2018). 一项试点随机对照试验，旨在检验行人培训计划的有效性；该计划教导儿童在何处以及如何安全过街。《儿科心理学杂志》, 43(10), 1147-1159. Mutabazi, M. (2010). 平面行人过街处的视线遮挡：关于锯齿线含义认知的综述。《安全科学》, 48(3), 283-287. Paschalidis, E., Choudhury, C. F., & Hess, S. (2018). 结合驾驶模拟器和生理传感器数据，对压力影响间隙接受决策的效应进行建模。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 59, 418-435. Petzoldt, T., Ngoc, Q. H. S., & Bogda, K. (2017年, June). 到达时间估计、（行人）间隙接受及尺寸到达效应。在驾驶评估会议 (Vol. 9, No. 2017年). 爱荷华大学。

人民网. (2025年, 4月1日). 智慧绿色双轮驱动：港口建设驶入发展“快车道”。人民网。来源：https://baijiahao.baidu.com/s?id=1828162052473225452&wfr=spider&for=pc. [2025-06-14]. Piyalungka, S., Kanitpong, K., & Karoonsoontawong, A. (2025年). 混合交通条件下无信号灯路段中部过街处的行人间隙接受行为。*IATSS Research*, 49(2), 105-113.Qin, K., Wang, B., Zhang, H., Ma, W., Yan, M., & Wang, X. (2020). 港口自动驾驶应用与测试研究 (No. 2020-01-5179). SAE技术论文。青岛西海岸新区政府. (2022年, 11月23日). 黄岛区青岛合盛嘉隆工贸有限公司“4·26”一般车辆伤害事故调查报告。来源：https://www.xihaian.gov.cn/zwgk/bmgk/qyjj/gkml/zdgz/dcbg/202212/t20221202_6542100.shtml.[2025-06-14]. Rankavat, S., & Gupta, V. (2023年). 行人对交通和道路特征的风险感知。*International Journal of Injury Control and SafetyPromotion*, 30(3), 410-418. Rezwana, S., & Lownes, N. (2024年). 行人与自动驾驶车辆之间的互动和行为：综述。*Future Transportation*, 4(3), 722-745. Robinson, E., Edwards, P., Laverty, A., & Goodman, A. (2025年). 发生碰撞事故时，运动型多用途汽车（SUV）和轻型卡车（LTV）是否比乘用车更容易导致行人和骑行者重伤？系统综述与荟萃分析。*Injury Prevention*.上海日报. (2024年, 11月16日). 上汽集团L4级智能集装箱卡车“落地”秘鲁钱凯港，助力建设南美洲首个智慧港口。上海日报。来源：https://baijiahao.baidu.com/s?id=1815847281557005784&wfr=spider&for=pc. [2025-06-14].

Shit, R. C. (2020). 实现下一代自主导航的精确定位：技术现状、分类体系与未来展望。《计算机通信》, 160, 351-374. Son, S. O., Park, J., Oh, C., & Yeom, C. (2021). 用于检测互联环境中卡车与行人之间碰撞风险的算法。《先进交通学报》, 2021(1), 9907698. Terberg Special Vehicles. (2022). Terberg自动化码头牵引车在弗利辛恩混合交通码头作业中成功通过测试。检索自：
https://www.terbergspecialvehicles.com/en/news/terberg-autonomous-terminal-tractor-successfully-tested-in-mixed-traffic-terminal-operations-in-vlissingen。[2025-06-14]. Tian, K., Markkula, G., Wei, C., Sadraei, E., Hirose, T., Merat, N., & Romano, R. (2022). 视觉和认知分心以及时间压力对行人过街行为的影响：一项模拟器研究。《事故分析与预防》, 174, 106770. Ting, P. H., Hwang, J. R., Fung, C. P., Doong, J. L., & Jeng, M. C. (2008). 驾驶模拟器中可读距离的校正。《应用人体工程学》, 39(3), 379-384. Tyndall, J. (2021). 行人死亡与大型车辆。《交通经济学》, 26, 100219. Vaca-Recalde, M. E., Marcano, M., Matute, J., Hidalgo, C., Martinez-Rodriguez, B., Bilbao-Arechabala, S., Jorge-Hernandez, F., Murgoitio, J., Rastelli, J. P., Santaella, J. & Camacho, A. (2024). 面向智慧港口车辆自动化的互联智能框架。《*IEEE*开放获取期刊》，12,120347 - 120361。Vaquero, V., Repiso, E., & Sanfeliu, A. (2018). 利用最少的二维激光雷达信息对运动目标进行稳健实时检测与跟踪，以推进港口自主货物装卸。《传感器》, 19(1), 107. Wang, X., Liu, Z., Wu, Y., & Liu, T. (2025). 运用虚拟现实方法研究夜间照明对行人过街行为的影响。虚拟现实, 29(3), 1-13. Yang, Y. L., Ding, J. F., Chiu, C. C., Shyu, W. H., Tseng, W. J., & Chou, M. T. (2016). 影响

高雄港集装箱码头安全装卸作业的核心风险因素。机械工程师学会论文集，*M*辑：海事环境工程学报， 230(2), 444-453. Wong, M. O., Zheng, Z., Liang, H., Du, J., Zhou, S., & Lee, S. (2023). 与渲染图相比，虚拟现实在人类感知办公室布局设计方面有何不同？对全尺寸沉浸式虚拟现实的定量评估。环境心理学杂志，*89*，102043. Ye, Y., Wong, S. C., Li, Y. C., & Choi, K. M. (2023). 不熟悉当地交通规则的醉酒行人的过街行为。《安全科学》，*157*，105924. Ye, Y., Wong, S. C., Li, Y. C., & Lau, Y. K. (2020). 不熟悉驾驶规则的交通系统中行人面临的风险：一种虚拟现实方法。《事故分析与预防》，*142*，105565. Ye, Y., Zheng, P., Liang, H., Chen, X., Wong, S. C., & Xu, P. (2024). 安全还是效率？利用逆强化学习估计醉酒行人的过街动机。旅行行为与社会，*35*，100760. Ye, Y., Che, Y., & Liang, H. (2024). 探究行人态度、倾向和风险感知对编队自动驾驶卡车之间间隙接受的影响。载于*2024*年*IEEE*第*27*届国际智能交通系统会议（*ITSC*）（第3645-3650页）。IEEE。Yoon, T., Choi, M., & Lee, S. (2025). 通过图像分割识别施工障碍物和隔离设施，并评估行人的感知风险。应用科学，15(10)，5261。Zhu, H., Iryo-Asano, M., Alhajyaseen, W. K., Nakamura, H., & Dias, C. (2021). 考虑对向车辆造成的遮挡时，自动驾驶车辆与行人在无信号灯路段中段人行横道处的交互。《事故分析与预防》，163，106468。Zhu, M., Graham, D. J., Zhang, N., Wang, Z., & Sze, N. N. (2025). 天气对路段中段过街处行人安全感知的影响：一项基于洞穴式自动虚拟环境的研究。《事故分析与预防》，215，107988。

附录

附录 A。 虚拟现实晕动症问卷（VRSQ）

VRSQ症状	眼动	定向障碍
1. 一般不适	O	
2. 疲劳	O	
3. 眼疲劳	O	
4. 难以聚焦	O	
5. 头痛		O
6. 头部胀满感		O
7. 视物模糊		O
8. 头晕（闭眼）		O
9. 眩晕		O

附录B. 变量和条目

变量	条目
违规	即使行人信号灯是红灯，我也会过街。
	为了节省时间，我会斜穿马路。
	即使附近不到50米处就有人行横道，我也会在横道外过街。
	为了节省时间，我会走禁止行人通行的通道。

错误	交通堵塞时，我从停在道路上的车辆之间穿行。 即使有车辆驶来，我也会过马路，因为我认为它们会为我停车。 明明可以走人行道，我却在人行道上骑自行车。 我赶时间时，会不看路就跑过街道。
疏忽	我意识到自己曾在没有留意交通的情况下穿过好几条街道和交叉路口。 我因为想着别的事情，过街前忘了观察。 我因为正在和别人交谈，没有观察就过街了。 我因为想去加入对面人行道上的某个人，过街前忘了观察。
攻击性行为	我对另一位道路使用者（行人、驾驶员、骑自行车的人等）感到愤怒，并对他大喊。 我故意慢慢地过马路，惹恼一位驾驶员。 我对另一位道路使用者（行人、驾驶员、骑自行车的人等）感到愤怒，并做出手势。 我对一位驾驶员感到愤怒，并打了他的车辆。
正向行为	我感谢停车让我过马路的驾驶员。 有人行人同伴时，在狭窄的人行道上我会排成一列行走，以免打扰迎面遇到的行人。 我在人行道右侧行走，以免打扰迎面遇到的行人。 即使我有优先通行权，只要后面没有其他车辆，我也会让一辆汽车先通过。
风险感知	你认为在该情境中过马路有多危险? 您认为过马路时发生事故的可能性有多大? 如果您在这种情况下过马路时发生事故，您认为事故的后果会有多严重？
对自动驾驶 关于	你认为视频中的自动驾驶卡车/汽车可能会突然失控并造成危险吗?

附录 C。 多模态临场感量表（MPS）

Item
物理临场感
虚拟环境对我来说似乎是真实的。
我感觉自己是在虚拟环境中进行操作，而不是从外部操控某个东西。
我在虚拟环境中的经验似乎与我在现实世界中的经验一致。
当我处于虚拟环境中时，我感觉自己“身临其境”。
我完全沉浸在这个虚拟世界中。
社会临场感
我觉得自己仿佛置身于虚拟环境中的另一个人面前。
我觉得虚拟环境中的人知道我的存在。
在我看来，虚拟环境中的人似乎具有感知能力（有意识且有生命）。
仿真过程中，有时计算机界面似乎消失了，我觉得自己仿佛
我当时正与另一个人直接合作。
我感觉自己是在虚拟环境中与其他人互动，而不是在与一个
计算机模拟互动。
自我临场感
我觉得自己的虚拟化身是我在虚拟环境中真实身体的延伸。
当我的虚拟化身发生什么事情时，我感觉就像是发生在我的真实身体上。
我感觉自己的真实手臂通过虚拟化身投射到了虚拟环境中。
我感觉自己的真实手就在虚拟环境中。
在仿真过程中，我感觉自己的虚拟化身与真实身体融为一体。